

УДК 551.581.1

DOI: 10.52531/1682-1696-2023-23-3-91-99

Дискуссионная статья

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ И ЕГО ПОСЛЕДСТВИЙ

В. В. ТЕТЕЛЬМИНИнститут экологии РУДН
им. Патриса Лумумбы

Приводится сводная таблица энергетических показателей глобального потепления, рассчитанных с использованием накопленных мировой наукой натуральных данных. Анализ показывает, что в каждом последующем десятилетии по сравнению с предыдущим увеличивается вклад положительных обратных связей в глобальное потепление. Каждый киловатт-час производимой человечеством энергии нагревает нашу планету через парниковый эффект более чем на 20 кВт·ч.

Приводится функция зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере трех основных парниковых газов. Предлагаются функции зависимости количества накопленной тепловой энергии в климатической системе Земли и продолжительности глобального потепления от содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере. Дается прогноз роста уровня Мирового океана и предельного значения частоты природных стихийных бедствий с течением времени.

Если человечество снизит к 2050 г. выбросы парниковых газов в два раза, то после этого глобальное потепление будет прогрессировать в течение примерно 170 лет до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2°С.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глобальное потепление, климатическая система, парниковые газы, тепловая энергия, радиационно-равновесная температура

ВВЕДЕНИЕ

В XXI веке климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере. Выбросы парниковых газов (ПГ) расшатывают климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан (МО), атмосфера и суша. Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела к выбросу в

Original article

ENERGY ANALYSIS OF GLOBAL WARMING FEATURES AND ITS CONSEQUENCES

V.V. TETELMININSTITUTE OF ECOLOGY OF THE RUSSIAN
PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY NAMED
AFTER PATRICE LUMUMBA

The summary table of global warming energy patterns calculated using accumulated natural data accumulated by the world science is presented. The analysis shows that in each successive decade the contribution of positive feedbacks to global warming increases relative to the preceding decade. Each kilowatt hour of energy produced and used by humanity warms our planet through the anthropogenic greenhouse effect by 20 kWh.

The functions of dependence of the radiative temperature equilibrium on the content in the atmosphere of the three main greenhouse gases have been derived. We propose functions for the dependence of the amount of accumulated thermal energy in the Earth's climatic system and the duration of global warming on the content of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere. A forecast of the global sea level rise and the marginal frequency of natural disasters over time is provided.

If mankind has halved greenhouse gas emissions by 2050, global warming will progress for about 170 years until it reaches a radiative equilibrium temperature of 4,2°С.

KEYWORDS: global warming, climate system, greenhouse gases, thermal energy, radiation equilibrium temperature

атмосферу более 2 трлн т основного парникового газа CO₂, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой. Современные годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов примерно следующие: CO₂ около 40 млрд т.; CH₄ – 330 млн т.; N₂O – 8,2 млн т. К 2020 г. содержание накопленных в атмосфере выбросов антропогенных ПГ составило 1,35 трлн т CO₂-экв. (182 ppm-eq).

Современная наука предсказывает поджидающие человечество опасности и призывает постепенно отходить от использования ископаемого топлива с переходом на использование возобновляемой энергии.

Парижское соглашение к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата направлено на ограничение к 2050 г. роста глобальной температуры максимальным значением 2°C сверх доиндустриального уровня. Для достижения этой цели предлагается в ближайшие 30 лет в два раза сократить выбросы ПГ и добиться углеродной нейтральности.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для прогноза глобального потепления строятся сложные математические модели энергетического баланса, в которых задается дополнительное тепловое излучение, воспринимаемое земной поверхностью. В статье предлагается использовать в прогнозных расчетах ряд эмпирических функций, выведенных на основе анализа натурных данных о накопленной тепловой энергии КС Земли, росте уровня Мирового океана и частоте природных стихийных бедствий. Основными источниками информации явились Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов ООН (МГЭИК) по изменению климата [7, 21–24].

Основными показателями происходящих изменений в климатической системе являются: выбросы парниковых газов, сопутствующие производству антропогенной энергии [25]; повышение средней глобальной температуры атмосферы и увеличение накопленной в климатической системе Земли тепловой энергии [23]; увеличение частоты природных стихийных бедствий [8, 18, 19] и рост уровня Мирового океана [27].

Выявлены общие закономерности энергообмена между антропогенными ПГ атмосферы и КС Земли, экстраполяция которых позволяет рассчитывать темпы и пределы глобального потепления при различных сценариях антропогенных выбросов ПГ. Результаты выполненных расчетов энергетических характеристик процесса глобального потепления представлены в виде таблиц, рисунков и функций. Содержание основных ПГ в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O) приводится в единицах объемной концентрации, эквивалентных потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP на горизонте 100 лет (ppm-eq).

РЕЗУЛЬТАТЫ

За последние полтора века человечество произвело и использовало около $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч энергии, в результате чего к 2020 г. в атмосфере накопилось около 182 ppm-eq антропогенных парниковых газов, содержание которых повысилось до значений: CO_2 – 416 ppm, CH_4 – 1,88 ppm, N_2O – 0,335 ppm. Можно сказать, что «энерго-климатическая цена» использования человечеством ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый киловатт-час производства энергии обеспечивает накопление в КС Земли более 20 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Следствием выбросов ПГ явилось накопление в

климатической системе (КС) Земли тепловой энергии в количестве около $180 \cdot 10^{15}$ кВт·ч ($648 \cdot 10^{21}$ Дж). Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан – около 91%, на сушу приходится около 5%, на льды около 3%; на атмосферу около 1,0% энергии. На рис. 1 представлен график 1–2, определяющий рост тепловой энергии, накопленной КС Земли за 50 лет наблюдений, построенный на основании натурных данных Доклада МГЭИК [23]. Количество накопленной тепловой энергии до 1970 г. рассчитано с использованием графика роста уровня Мирового океана.

Активная фаза глобального потепления началась в период 1970–1980 гг. Повсеместное потепление более активно проходит на суше Северного полушария. Первой на активизацию глобального потепления отреагировала российская суша в 1970 г. с потеплением большой интенсивности $0,467^{\circ}\text{C}/10$ лет. За 50 лет наблюдений средняя температура поверхности российской суши поднялась на $2,34^{\circ}\text{C}$. Температура поверхности суши всей планеты начала активно подниматься с 1975 г. с интенсивностью $0,275^{\circ}\text{C}/10$ лет, и к 2020 г. поднялась на $1,24^{\circ}\text{C}$. Активный рост средней приповерхностной температуры Земли начался в 1980 г. с постоянным приращением $0,175^{\circ}\text{C}/10$ лет. Наиболее интенсивное потепление наблюдается в Арктическом поясе. Например, на берегах Гренландии и на побережье России тренд потепления характеризуется $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет, на островах Баренцева и Карского морей – до $1,5^{\circ}\text{C}/10$ лет [3, 9, 16]. При этом пространственная картина глобального потепления неоднородная. В районе 35 – 40° Северной широты потепление совпадает со средним значением глобального потепления, в то время как поверхность южнее указанной широты нагревается намного медленнее,

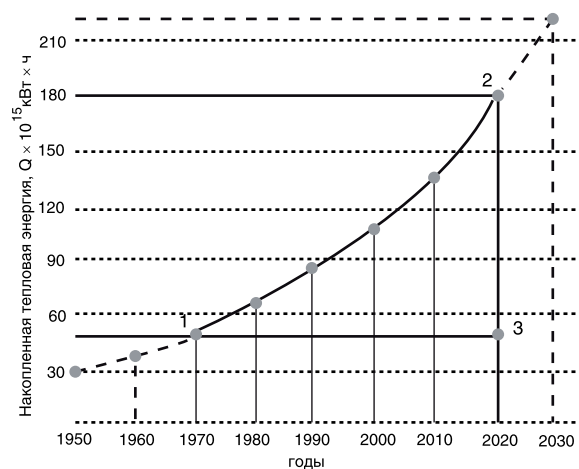


РИС. 1.

Рост количества парниковой тепловой энергии, аккумулированной климатической системой Земли. Площадь фигуры 1-2-3 определяет тепловую энергию, накопленную КС Земли с 1970 по 2020 гг.

а в районе Антарктического пояса даже наблюдается слабая тенденция к похолоданию. С 1980 по 2020 гг. нетто-поглощение КС Земли увеличилось с 0,36 Вт/м² до 0,9 Вт/м² [15].

При наблюдающихся рассогласованных действиях мирового сообщества наиболее вероятным результатом планируемого сокращения глобальных выбросов является следующий: содержание антропогенных ПГ в атмосфере удастся стабилизировать к 2050 г. на уровне 233 ppm-eq. После стабилизации концентрации ПГ на этом уровне средняя глобальная температура будет в течение продолжительного времени расти, приближаясь к некоторому предельному значению, соответствующему радиационно-равновесному состоянию системы «Земля–Космос». При современных параметрах орбиты Земли и значениях солнечной постоянной 1368 Вт/м², когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, зависимость максимального глобального потепления T_{\max} от содержания выбросов антропогенных ПГ определяется следующей функцией [14]:

$$T_{\max} = (20,9 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2) \text{ град}, \quad (1)$$

где T_{\max} – вклад антропогенных ПГ в увеличение радиационно-равновесной температуры относительно средней глобальной температуры доиндустриального периода 288 К (15° С); К ppm-eq – эквивалент объемного содержания в атмосфере антропогенных выбросов трех основных (CO₂, CH₄, N₂O) парниковых газов.

Эта функция подтверждает следующую особенность: «чем больше концентрация К, тем меньше чувствительность климата на вариации содержания ПГ» [11]. Из функции (1) следует, что содержание антропогенных ПГ, при котором наступает «парниковое насыщение» атмосферы $K_{\text{НАС}} = 850$ ppm-eq, а максимально возможный вклад антропогенных ПГ в глобальное потепление составляет $T_{\text{НАС}} = 8,9^\circ\text{С}$. При концентрации $K \geq 850$ ppm-eq атмосфера перестанет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы. Справедливость функции (1) подтверждается уравнением Стефана-Больцмана [2].

График реального роста накопленной тепловой энергии (рис. 1) позволил определить приращения тепловой энергии в КС Земли за 10-летние периоды наблюдений (табл. 1). При этом темп роста накопленного тепла существенно опережал рост накопленных выбросов ПГ. Наблюдаемый рост «парниковой эффективности» каждой единицы содержания ПГ объясняется тем, что со временем улучшаются условия передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану и КС Земли в целом. Причиной тому является усиление положительных обратных связей, к которым помимо снижения альбедо можно отнести усиление конвективного переноса тепла из тропиков в высо-

кие широты; деградацию криолитозоны арктического шельфа и тундры с выбросом метана из газогидратных кластеров [10]; увеличение влажности сухого арктического воздуха, сопровождающееся увеличением парникового эффекта [6].

В 1980 г., когда интенсивность поглощения тепловой энергии превысила пороговое значение $Q_{\text{П}} = 18 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет, атмосфера вышла на постоянный темп нагревания $0,175^\circ\text{С}/10$ лет (табл. 1). Этому темпу роста температуры атмосферы отвечает постоянное значение нетто-поглощения тепловой энергии атмосферой $q^A = 0,26 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет (5,75 мВт/м²). В этот переходный момент доля получаемого атмосферой тепла n составляет 1,44% (табл. 1).

Натурные данные показывают, что атмосфера способна принимать и удерживать поступающее парниковое тепло с интенсивностью не более 5,75 мВт/м², а все что больше атмосфера сбрасывает в окружающее пространство. Естественно предположить, что в дальнейшем наблюдаемый темп роста температуры $0,175^\circ\text{С}/10$ лет и соответствующее нетто-поглощение тепла атмосферой $q^A = 0,26 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет будут сохраняться до тех пор, пока КС Земли будет нагреваться с интенсивностью Q_0 , превосходящей $18 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет. Таким образом, в прогнозных расчетах глобального потепления при интенсивности нагревания КС $Q_0 \geq 18 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет (0,4 Вт/м²) следует учитывать следующие энергетические особенности потепления атмосферы:

$$\Delta T = 0,175^\circ\text{С}/10 \text{ лет}; q_A = 0,26 \cdot 10^{15} \text{ кВт·ч}/10 \text{ лет} (5,75 \text{ мВт}/\text{м}^2); n \leq 1,44\%. \quad (2)$$

По натурным данным табл. 1 построены графики зависимости интенсивности поглощения тепловой энергии КС Земли от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере (рис. 2). В начальной фазе глобального потепления до середины 1970-х годов при содержании антропогенных ПГ в атмосфере $K \leq 90$ ppm-eq эта зависимость была линейной: $Q_{0\text{Н}} = 172 \cdot 10^{12} \cdot K$ (кВт·ч). При $K \geq 90$ ppm-eq эта зависимость должна отходить от линейной в соответствии с известной закономерностью уменьшения «парниковой эффективности» по мере роста содержания ПГ [11]. Следованию этой закономерности отвечает функция (1), поэтому функцию $Q_{0\text{Н}}(K)$ для содержания ПГ $K \geq 90$ можно найти из условия равенства производных: $dT_{\max}/dK = dQ_{0\text{Н}}/dK$:

$$Q_{0\text{Н}} = 172 \cdot 10^{12} \cdot K - 101 \cdot 10^9 \cdot K^2. \quad (3)$$

Эта функция описывает теплообмен между ПГ и КС Земли в условиях естественного состояния атмосферы, «непотревоженного» глобальным потеплением. Если бы глобальное потепление не влияло на динамическое состояние атмосферы, то график зависимости

ТАБЛИЦА 1.

Средние значения накопленных выбросов антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетических характеристик процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за климатической системой Земли

Годы	Содержание выбросов ПГ в атмосфере, К ppm-eq	Рост содержания тепла в КС, $\Delta Q_0 \times 10^{15}$ кВт·ч/10 лет	Рост температуры атмосферы, ΔT град/10 лет	Рост уровня Мирового океана, Δh мм/10 лет	Мощность поглощения парниковой энергии, i Вт/м ²	Доля тепла, остающегося в атмосфере, %
1970–1980	77,5	13,3	0,165	20	0,30	1,84
1980–1990	101,4	19,8	0,175	20	0,44	1,3
1990–2000	121,0	24,6	0,175	20	0,55	1,05
2000–2010	141,4	31,0	0,175	30	0,69	0,84
2010–2020	168,6	38,3	0,175	40	0,86	0,68

интенсивности поглощения тепловой энергии ПГ от их концентрации при $K \geq 90$ ppm-eq имел бы вид кривой 0-1-3-4 (рис. 2). В действительности этот график в середине 1970-х г. претерпел излом (точка 1). В реальности КС Земли начала набирать тепловую энергию намного быстрее, следуя линейному графику 1–2. Усиление нетто-поглощения отраженной парниковыми газами ИК-радиации было вызвано усилением положительных обратных связей. В первую очередь это связано с активизацией конвективных атмосферных явлений и усилением горизонтального переноса тепла из тропического пояса в высокие широты [17]. Эмпирическая функция, описывающая график 1–2, имеет следующий вид:

$$Q_0 = 276 \cdot 10^{12} \cdot (K - 30) \text{ [кВт·ч/10 лет]}, \quad (4)$$

где K – среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в расчет-

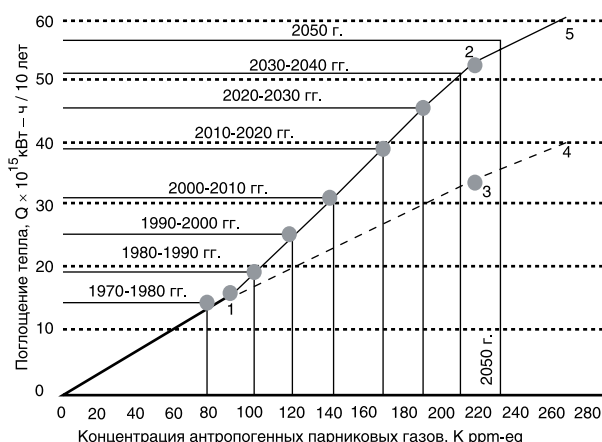


РИС. 2.

Графики зависимости интенсивности поглощения тепловой энергии (нетто-поглощения) климатической системой Земли от содержания ПГ в атмосфере: график (0–1–3–5) – для атмосферы в состоянии, невозмущенном глобальным потеплением; график (1–2–4) – реальное нетто-поглощение, усиленное положительными обратными связями

ном 10-летнем периоде времени. Это выражение, отражающее медианную реакцию КС на увеличение содержания ПГ в атмосфере, справедливо при изменении концентрации ПГ в следующих пределах: $90 \text{ ppm-eq} \leq K \leq 220 \text{ ppm-eq}$.

Отрезок 2-3 на рис. 2 представляет собой вклад в нетто-поглощение энергии положительных обратных связей относительно базового графика 1-3. Из функций (3) и (4) находим, что при $K = 220$ ppm-eq этот вклад равен $20 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет. Следовательно, при K больше 220 ppm-eq зависимость интенсивности получения КС Земли тепловой энергии от концентрации ПГ будет иметь следующий вид:

$$Q_0 = 172 \cdot 10^{12} \cdot K - 101 \cdot 10^9 \cdot K^2 + 20 \cdot 10^{15} \text{ (кВт·ч/10 лет)}. \quad (5)$$

Приведенные эмпирические функции (1–5), полученные с использованием натуральных данных, учитывают все виды радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, которые в полной мере невозможно учесть в математических моделях. Величину Q_0 можно выразить в размерности «нетто-поглощения» i_0 (Вт/м²), связь между которыми следующая: $i_0 = 22,2 \cdot 10^{-18} Q_0$ Вт/м². Физическая сущность величин i_0 и Q_0 одинаковая, поэтому в расчетах потепления в равной степени можно пользоваться обеими.

На рис. 3 приводится в развитие схемы К. Trenberth [28] примерная схема современного радиационно-энергетического баланса Земли при содержании в атмосфере 182 ppm-eq антропогенных ПГ и средней глобальной температуре 289,2 К, соответствующей глобальному потеплению 1,2°С. В соответствии с функцией (4) интенсивность поглощения тепловой энергии (нетто-поглощение) в 2020 г. составляет $Q_0 = 41,9 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет ($i_0 = 0,9$ Вт/м²). Этот получаемый от ПГ дополнительный поток тепловой энергии «захватывается» земной поверхностью и расходуется на нагревание всех составляющих КС Земли, поэтому в космическое пространство возвращается

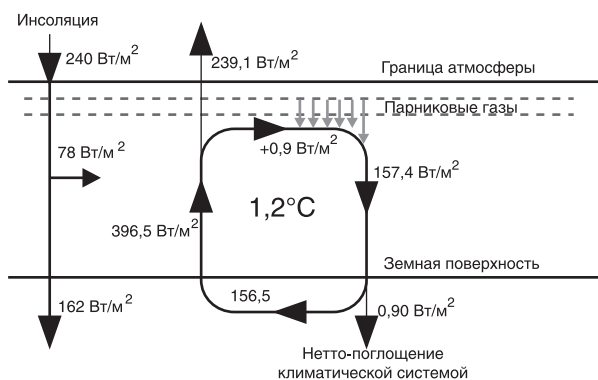


Рис. 3.

Примерная схема энергетического баланса Земли в 2020 г.

всего 239,1 Вт/м² из получаемой Землей от инсоляции 240 Вт/м² тепловой энергии (рис. 3).

До начала индустриальной эпохи земная поверхность при средней глобальной температуре 288К (15°С) отражала (240+150) Вт/м² ИК-излучения. Здесь второе слагаемое – это радиационное усиление $J = 150 \text{ Вт/м}^2$, создаваемое всеми ПГ, которые содержались в атмосфере в доиндустриальную эпоху. В процессе начавшегося потепления, согласно уравнению Стефана-Больцмана [2], каждое увеличение глобальной температуры на 0,175°С увеличивает отражение теплового излучения от земной поверхности (радиационное усиление) на $\Delta J = 0,955 \text{ Вт/м}^2$. К 2020 г. глобальная температура увеличилась на 1,2°С, следовательно, отражаемый вверх поток радиации в ИК-диапазоне спектра увеличился на $\Delta J = 6,5 \text{ Вт/м}^2$, отчего полное радиационное усиление составляет $J = 156,5 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 3). С учетом текущего значения нетто-поглощения $i_0 = 0,9 \text{ Вт/м}^2$ отражаемый вниз парниковыми газами поток ИК-излучения составляет 157,4 Вт/м².

Приведенная на рис. 3 схема современного радиационно-теплового баланса Земли не является застывшей и в дальнейшем будет непрерывно меняться до достижения планетой абсолютной радиационно-равновесной температуры 292,2 К ($T_{\text{max}} = 4,2^\circ\text{C}$), соответствующей концентрации антропогенных ПГ $K = 233 \text{ ppm-eq}$. Например, в 2050 г. нетто-поглощение увеличится до $i_0 = 1,2 \text{ Вт/м}^2$, что соответственно, уменьшит возвращение тепловой энергии в Космос до 238,8 Вт/м². Когда Земля нагреется на 4,2°С и придет в состояние радиационно-теплового баланса, полное радиационное усиление составит $J = 174 \text{ Вт/м}^2$. В этом состоянии нетто-поглощение будет отсутствовать ($i_0 = 0$), а Земля будет возвращать в космическое пространство всю получаемую от Солнца энергию.

Эффект глобального потепления от экранирующего действия антропогенных выбросов ПГ является отложенным во времени. Продолжительность глобаль-

ного потепления t_{max} до достижения радиационного баланса в системе «Земля-Космос» определяется следующей зависимостью [13, 15]:

$$t_{\text{max}} = 10^2 \cdot (T_{\text{max}} - T_0) \cdot m \cdot c_p / 0,5n \cdot Q_0 \text{ (годы)}, \quad (6)$$

где t_{max} – время, определяемое количеством 10-летних периодов; T_0 – начальная глобальная температура атмосферы; $m = 5,18 \cdot 10^{15} \text{ т}$ – масса атмосферы; $c_p = 0,286 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}\cdot\text{град}$ – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; n – доля (%) тепловой энергии, остающаяся в атмосфере в каждом 10-летнем акте теплообмена (табл. 1).

Накопленная в КС за время t тепловая энергия определяется следующей зависимостью [13]:

$$Q_{\text{КС}} = Q_0 \cdot (2t_{\text{max}} - t) \cdot t / 2t_{\text{max}} \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}, \quad (7)$$

где t – время, определяемое количеством 10-летних периодов.

После 2050 г. в условиях предполагаемого достижения КС углеродной нейтральности концентрация антропогенных выбросов ПГ в атмосфере составит около $K = 233 \text{ ppm-eq}$ и в дальнейшем будет держаться на постоянном уровне. В соответствии с функциями (1) и (5) этому значению концентрации ПГ отвечают следующие значения энергетических параметров: вклад антропогенных ПГ в радиационно-равновесную температуру (глобальное потепление) $T_{\text{max}} = 4,2^\circ\text{C}$; интенсивность поглощения КС Земли парникового тепла $Q_0 = 53,8 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч/10 лет}$ ($i_0 = 1,2 \text{ Вт/м}^2$). К 2050 г. средняя глобальная температура приземного слоя поднимется до $T_0 = 1,7^\circ\text{C}$.

На рис. 4 приводится кривая роста накопленной КС тепловой энергии, соответствующая рекомендованному Парижским Соглашением сценарию достижения углеродной нейтральности в 2050 г. при постоянной концентрации $K = 233 \text{ ppm-eq}$. Эта расчетная кривая является продолжением эмпирического графика рис. 1. В соответствии с (6) и с учетом условия (2) продолжительность глобального потепления составляет $t_{\text{max}} = 170 \text{ лет}$. Таким образом, после достижения углеродной нейтральности в 2050 г. нагревающаяся КС Земли достигнет равновесной температуры $T_{\text{max}} = 4,2^\circ\text{C}$ в 2220 г. К 2100 г. КС Земли всего накопит $558 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ энергии, а средняя глобальная температура поднимется до 2,6°С. В соответствии с функцией (7) после 2050 г. КС Земли дополнительно накопит $458 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии. За весь период глобального потепления с 1900 г. КС Земли аккумулирует $786 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии.

Глобальное потепление сопровождается рядом опасных для цивилизации последствий. В таблице 2 приводятся осредненные количественные характеристики отмеченных страховыми компаниями природных стихийных бедствий [19, 20, 27], а также их

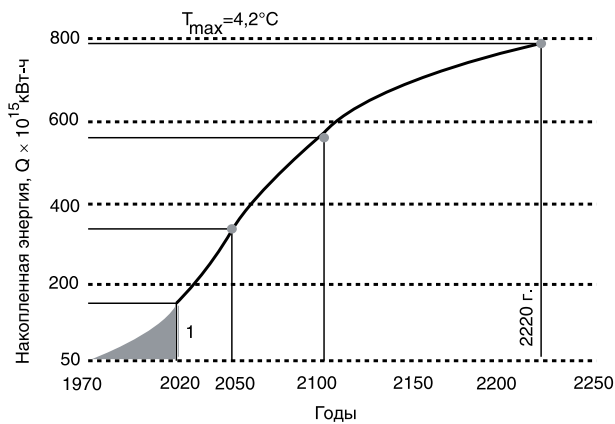


РИС. 4.

Расчетная кривая роста накопленной тепловой энергии для сценария достижения углеродной нейтральности в 2050 г. и постоянной концентрации ПГ в атмосфере $K = 233$ ppm-eq; 1 – эмпирическая кривая рис. 1

расчетные предельные значения в 2050 г. [12]. Расчеты роста частоты проявления природных стихийных бедствий выполнены с учетом энергетических особенностей глобального потепления.

Человечество, в частности, волнует проблема ускоряющегося роста таяния материковых льдов и роста уровня Мирового океана (МО), которые вызваны глобальным потеплением. Из материалов Доклада МГЭИК ОД-6 следует, что на нагревание МО до глубины 2000 м расходуется 84%, а на таяние льдов 2,7% накопленной тепловой парниковой энергии [24]. Анализ зависимости уровня h МО от накопленной Землей тепловой энергии позволяет прогнозировать изменение уровня [15] в любой момент времени. Приводим без вывода соответствующую расчетную функцию:

$$h = 10^{-15} \cdot Q + 62 \text{ мм}, \quad (8)$$

где Q определяется функцией (7). Форма кривой роста уровня МО во времени идентична графику рис. 4. Из функции (8) находим, что к 2100 г. за счет глобального потепления уровень МО поднимется примерно на 620 мм, а за весь период потепления с 1900 г. – на 848 мм. Подобная перспектива потребует строительства новых и увеличения высоты действующих за-

щитных сооружений, включая сооружения Санкт-Петербурга.

По мере роста глобального потепления активизируются спровоцированные гидрометеорологические и другие природные стихийные бедствия [4, 5], которые по силе воздействия на экономику выходят на первое место: на тропические циклоны и приносимые ими осадки и наводнения приходится 32%, на землетрясения 12%, на засухи 10% природных катастроф. Только в период 2000–2010 гг. отмечено 1260 метеорологических, 1944 гидрологических, 349 геофизических и 283 климатических стихийных бедствий [1]. Средняя энергия тропического циклона составляет $0,3 \cdot 10^{12}$ кВт·ч, что эквивалентно энергии взрыва 250 мегатонных бомб в тротиловом эквиваленте.

Анализ проявления природных стихийных бедствий позволил связать частоту их повторяемости N в течение года с накопленной тепловой энергией. В частности, для частоты спровоцированных глобальным потеплением метеорологических бедствий (СМ-бедствий) выведена следующая эмпирическая зависимость [12]:

$$N = 2,6 \cdot 10^{-15} \cdot Q - 4,7 \cdot 10^{-33} \cdot Q^2. \quad (9)$$

Из (9) следует, что при накоплении в КС Земли $276 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии частота повторяемости катастрофических СМ-бедствий достигнет своего максимального значения около $N = 360$ в год. Этот предел будет достигнут в период 2040–2050 гг. При дальнейшем глобальном потеплении частота СМ-бедствий N увеличиваться не будет, а будет наблюдаться возможное увеличение разрушительной энергии каждого отдельного катастрофического СМ-события. Примерно такая картина наблюдается в настоящее время во всем мире.

Страховые компании расценивают будущие последствия потепления как катастрофические, при которых страхование большинства рисков становится невозможным [18,27]. В случае, если наши расчеты верны, то к 2050 г. (табл. 2) частота проявления всех классов природных стихийных бедствий увеличится не более чем на 20% по сравнению с современными значениями.

ТАБЛИЦА 2.

Рост средних значений отмеченных природных стихийных бедствий, вызванных глобальным потеплением, а также их предельные расчетные значения в 2050 г.

Процессы	1980	1995	2015	2050
Частота геофизических бедствий (СГФ-событий), число в год	26	42	54	65
Частота метеорологических бедствий (СМ-бедствий), число в год	107	175	258	360
Частота гидрологических бедствий (СГ-бедствий), число в год	80	175	290	400
Частота климатических бедствий (СК-бедствий), число в год	26	48	79	100

Ещё одним негативным последствием глобального потепления является увеличение частоты землетрясений и других геофизических стихийных бедствий (табл. 2). В период 1970–2020 г. мощность нетто-поглощения тепловой энергии КС Земли увеличилась от $i = 0,30$ до $0,86 \text{ Вт/м}^2$ (табл. 1). Радиационное воздействие ПГ формирует в литосфере суши нисходящий тепловой поток, который является встречным по отношению к восходящему естественному геотермальному потоку 60 мВт/м^2 . Поток нетто-поглощения суши тепловой энергии искажает естественное температурное поле земной коры, снижает естественный геотермический градиент, чем затрудняет разгрузку восходящего геотермального потока. К 2020 г. за счет эффекта антропогенного глобального потепления в приповерхностных слоях континентальной земной коры накопилось около $9,4 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии. Эта энергия формирует в горных породах термоупругие напряжения, потенциальная энергия которых с учащающейся периодичностью самопроизвольно разгружается в виде землетрясений и других геофизических стихийных бедствий (горных ударов, оползней, селевых потоков, лавин и термокарстов в криолитозоне).

ВЫВОДЫ

Каждый киловатт-час произведенной человечеством энергии нагревает планету Земля за счет антропогенного парникового эффекта более чем на $20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Предлагаемые эмпирические зависимости позволяют при любом сценарии выбросов парниковых газов выполнять расчеты пределов, темпа и продолжительности глобального потепления до достижения климатической системой Земли состояния радиационно-равновесного состояния.

Примерно с 1970 г. по мере роста глобальной температуры во всем мире наблюдается активизация спровоцированных глобальным потеплением гидрометеорологических, геофизических и климатических стихийных бедствий и катастроф. Расчеты показывают, что к 2050 г. суммарная частота их проявления достигнет предельного значения и составит примерно 930 катастрофических событий в год, из которых на гидрометеорологические будет приходиться около 760 в год.

При сценарии снижения к 2050 г. глобальных выбросов в два раза и фиксации содержания парниковых газов в атмосфере на уровне $233 \text{ ppm}\cdot\text{eq}$ расчетные последствия глобального потепления будут следующими:

– к 2100 г. климатическая система Земли накопит $558 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ парниковой тепловой энергии; глобальная температура поднимется до $2,6^\circ\text{C}$; подъем уровня Мирового океана составит примерно 620 мм; частота повторяемости природных стихийных бедствий и катастроф приблизится к 930 в год;

– глобальное потепление будет продолжаться до 2220 г. до достижения радиационно-равновесной температуры $4,2^\circ\text{C}$. К этому времени в климатической системе Земли будет накоплено $786 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ тепловой энергии; общий подъем уровня Мирового океана составит около 860 мм; частота повторяемости природных стихийных бедствий останется на уровне 930 в год.

Достижение к 2050 г. одной из целей Парижского Соглашения с фиксацией содержания парниковых газов в атмосфере на уровне $233 \text{ ppm}\cdot\text{eq}$ предотвратит возможность дополнительного нагревания планеты Земля в будущем на $4,7^\circ\text{C}$.

Намечаемое ограничение глобальных выбросов парниковых газов является экономически затратным процессом, поэтому необходимо сопоставить экономическую цену предпринимаемых человечеством усилий по сдерживанию глобального потепления с ущербом от неконтролируемого роста частоты и силы спровоцированных природных стихийных бедствий и катастроф.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондур В.Г.** Что болит у Земли // В мире науки. 2022. №1/2. С. 5–12.
2. **Бринкман Э.** Физические проблемы экологии (пер. с англ.). М.: Интеллект. 2012. 288 с.
3. **Голицын Г.С., Васильев А.А.** Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. №11. С. 9–13.
4. **Горбатенко В.П., Кужевская И.В., Пустовалов К.И. и др.** Оценка изменчивости конвективного потенциала атмосферы в условиях изменяющегося климата Западной Сибири // Метеорология и гидрология. 2020. №5. С. 108–117.
5. **Кнутсон Т., Камарго С.Д., Чан Д.С. и др.** Оценка тропических циклонов и изменение климата: Часть II. **Прогнозируемый ответ на антропогенное потепление** // Бюллетень Американского метеорологического общества. 2020. Р. 303–322. 101(3) VAMS-D-18-0194.1.
6. **Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылев Л.П.** Явление арктического усиления и его механизмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. №3. С. 3–19.
7. **МГЭИК: Изменение климата, Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК** [основная группа авторов Р. Пачаури и Л. Мейер]. Женева: МГЭИК, 2014. С. 44.
8. **Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. и др.** Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. М.: Центр энергетики Московской школы управления Сколково. 2020.
9. **Мохов И.И.** Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулиро-

- вания // Вестник РАН. 2022. Т. 92. №1. С. 3–14.
10. **ОСИПОВ В.И.** Природные катастрофы: анализ развития и пути минимизации последствий / Проблемы анализа риска. М.: Деловой экспресс. 2015. Т. 12. С. 84–93.
 11. **СЕМЕНОВ С.М., ПОПОВ И.О.** Сравнительная оценка влияния изменения концентрации диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности // Метеорология и гидрология. 2011. №8. С. 34–43.
 12. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Количественная оценка глобального потепления // Горная промышленность. 2023. №3. С. 64–70.
 13. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Аналитический расчет глобального потепления // Экология промышленного производства. 2022. №3. С. 34–41.
 14. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Энергетические особенности и пределы глобального потепления // Экология промышленного производства. 2023. №1. С. 51–59.
 15. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Расчет темпа глобального потепления и роста уровня Мирового океана // Экология промышленного производства. 2023. №2. С. 32–38.
 16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России. Общее резюме / Росгидромет. СПб.: Научно-технологии. 2022. 144 с.
 17. **ЧЕРНОКУЛЬСКИЙ А.В., ЕЛИСЕЕВ А.В.** Опасные атмосферные явления конвективного характера в России // Метеорология и гидрология. 2022. №5. С. 27–41.
 18. **BROOKS H.E., DOSWELL C.A., ZHANG X. ET AL.** A century of progress in severe convective storm research and forecasting. Meteorol. Monographs, 2019. Vol. 59. P. 18.1–18.41.
 19. EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The International Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain.
 20. Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>. <https://munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards.html>.
 21. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 22. IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 23. 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.
 24. **SHUKLA P.R., SKEA J., SLADE R.** IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
 25. WMO, 2022. State of the Global Climate 2022. World Meteorological Organization. WMO-No 1316. 2023. Geneva, Switzerland.
 26. **TANAKA K.R.** The recent normalization of historical marine heat extremes. PLOS Clim 1(2). February 1. 2022. Maite de Castro. University of Vigo. Spain. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007>.
 27. The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper. Group Chief Risk Officer (CRO). January. 2019. 28. Laboratoire d'Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS); data from AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).
 28. **TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., KIEHL J.** Earth global energy budget. // American meteorological society, march 2009. P. 311–323.

REFERENSE

1. **BONDUR V.G.** What hurts the Earth. *V mire nauki*. 2022;1/2:5–12. (In Russian).
2. **BRINKMAN E.** Physical problems of ecology (translated from English). Moscow: Intellect. 2012:288. (In Russian).
3. **GOLITSYN G.S., VASILIEV A.A.** Climate change and its impact on the frequency of extreme hydrometeorological phenomena. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2019;11:9–13. (In Russian).
4. **GORBATENKO V.P., KUZHEVSKAYA I.V., PUSTOVALOV K.I.** Evaluation of the variability of the convective potential of the atmosphere under the changing climate of Western Siberia. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2020;5:108–117. (In Russian).
5. **KNUTSON T., KAMARGO S.D., CHAN D.S.** Tropical Cyclone Assessment and Climate Change: Part II. Projected response to anthropogenic warming. *Byulleten' Amerikanskogo meteorologicheskogo obshchestva*. 2020:303–322. 101(3) BAMS-D-18-0194.1. (In Russian).
6. **LATONIN M.M., BASHMACHNIKOV I.L., BOBYLEV L.P.** The phenomenon of Arctic amplification and its mechanisms. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2020;13;(3):3–19. (In Russian).
7. IPCC: Climate Change, Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the IPCC [core group of authors R.

- Pachauri and L. Meyer]. Geneva: IPCC, 2014:44. (In Russian).
8. **МИТРОВА Т., КХОКХЛОВ А., МЕЛНИКОВ Ю. ЕТ AL.** Global climate threat and the Russian economy in search of a special path. Moscow: Tsentr energetiki Moskovskoy shkoly upravleniya SKOLKOVO. 2020. (In Russian).
 9. **МОКHOB И.И.** Climate Change: Causes, Risks, Consequences, Problems of Adaptation and Regulation. *Vestnik RAN*. 2022;92;(1):3–14. (In Russian).
 10. **ОСИPOB В.И.** Natural Disasters: Analysis of Development and Ways to Minimize Consequences. Problems of Risk Analysis. Moscow: Delovoy ekspress. 2015;12:84–93. (In Russian).
 11. **СЕМЕHOV С.М., ПОПОВ И.О.** Comparative assessment of the effect of changes in the concentration of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the earth's surface. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2011;8:34–43. (In Russian).
 12. **ТЕТЕЛМИН В.В.** Quantifying global warming. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;3:64–70. (In Russian).
 13. **ТЕТЕЛМИН В.В.** Analytical calculation of global warming. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2022;3:34–41. (In Russian).
 14. **ТЕТЕЛМИН В.В.** Energy features and limits of global warming. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2023; 1:51–59. (In Russian).
 15. **ТЕТЕЛМИН В.В.** Calculation of the rate of global warming and growth of the level of the World Ocean. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2023;2:32–38. (In Russian).
 16. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of Russia. General summary. Roshydromet. Saint Petersburg: *Naukoyemkiye tekhnologii*. 2022:144. (In Russian).
 17. **СЕРНОКУЛЬСКИЙ А.В., ЕЛИСЕЕВ А.В.** Dangerous atmospheric phenomena of a convective nature in Russia. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2022; 5:27–41. (In Russian).
 18. **БРОУКС Х.Е., ДОСВЕЛЛ С.А., ЗHАNG X. ЕТ AL.** A century of progress in severe convective storm research and forecasting. Meteorol. Monographs, 2019;59: 18.1–18.41.
 19. EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The International Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain.
 20. Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>. <https://munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards.html>.
 21. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. Solomon S., D. Qin, M. Manning, H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 22. IPCC AR5, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
 23. 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.
 24. **SHUKLA P.R., SKEA J., SLADE R.** IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
 25. WMO, 2022. State of the Global Climate 2022. World Meteorological Organization. WMO-No 1316. 2023. Geneva, Switzerland.
 26. **TANAKA K.R.** The recent normalization of historical marine heat extremes. PLOS Clim 1(2). February 1. 2022. Maite de Castro. University of Vigo. Spain. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007>.
 27. The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper. Group Chief Risk Officer (CRO). January. 2019. 28. Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS); data from AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).
 28. **TRENBERTH K.E., FASULLO J.T., КIEHL J.** Earth global energy budget. American meteorological society, march 2009:311–323.

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

✉ 115093, г. Москва, Подольское ш., д. 8,
115093, Moscow, Podolskoye sh., 8,
e-mail: v-tetelmin@rambler.ru