

УДК 551.52

DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-1-127-137

Научная статья

EDN: UBJZUA

ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА И ЕГО РАБОТА НА ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА В XXI ВЕКЕ И ЗА ЕГО ПРЕДЕЛАМИ

В.В. ТЕТЕЛЬМИНИнститут экологии Российского
университета дружбы народов (РУДН)
им. Патриса Лумумбы, Москва,
Российская Федерация

Дается развернутое научное определение парникового эффекта как потока энергии определенной мощности. Вводится понятие «потенциала радиационного усиления» как энергетического эквивалента парникового эффекта, представленного в виде функции содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере. Впервые в климатологии основные результаты и последствия работы парникового эффекта представлены в виде функций мощности потенциала радиационного усиления. Впервые выполнен анализ и расчет всех энергетических составляющих парникового эффекта и процесса глобального потепления в XXI веке для наиболее вероятного умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики.

Ключевые слова: парниковый эффект, потенциал радиационного усиления, умеренный сценарий декарбонизации энергетики, глобальное потепление, радиационно-равновесное состояние

В XXI веке климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие парникового эффекта (ПЭ), усиливающегося за счет роста содержания в атмосфере антропогенных парниковых газов (ПГ) [3, 13]. До 1900 г. объемные концентрации трех ПГ в атмосфере были следующими: CO_2 – 280 ppm (млн^{-1}); CH_4 – 0,7 ppm; N_2O – 0,26 ppm. Если использовать общепринятые коэффициенты конверсии (GWP) для метана 28 и для закиси азота 260, то общее начальное содержание трех основных ПГ в доинду-

Original article

THE PHYSICAL ESSENCE OF THE GREENHOUSE EFFECT AND ITS WORK ON CLIMATE WARMING IN THE 21ST CENTURY AND BEYOND

V.V. TETELMININSTITUTE OF ECOLOGY OF THE PATRICE
LUMUMBA PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY
OF RUSSIA (RUDN UNIVERSITY), MOSCOW,
RUSSIAN FEDERATION

A detailed scientific definition of the greenhouse effect as a flow of energy of a certain power is given. The concept of “radiation amplification potential” is introduced as an energy equivalent of the greenhouse effect, presented as a function of the content of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere. For the first time in climatology, the main results and consequences of the greenhouse effect are presented in the form of power functions of the radiative amplification potential. The calculation and analysis of all energy components of the greenhouse effect and the process of global warming in the 21st century for the most likely Scenario of moderate decarbonization of the global energy system have been performed.

Key words: greenhouse effect, radiation amplification potential, Scenario of moderate decarbonization of the energy system, global warming, radiation-equilibrium conditions

стриальной атмосфере Земли в CO_2 -эквиваленте составляло 370 ppm-eq ($2,84 \times 10^{12}$ т-eq). Привнесение в атмосферу антропогенных ПГ сместило веками установившееся равновесие теплового взаимодействия Мирового океана, суши, атмосферы и Космоса. К 2020 г. за время активной хозяйственной деятельности выбросы и концентрация антропогенных парниковых газов (АПГ) в атмосфере увеличилась до современных экстремальных значений, приведенных в табл. 1 [5].

Солнечная энергия переносится в космическом пространстве как электромагнитное излучение, которое достигает Земли в различных формах: ультрафиолетовое и рентгеновское излучение, радиоволны и наиболее известные формы – световая и

ТАБЛИЦА 1.

Показатели роста выбросов антропогенных парниковых газов за указанные периоды и накопленной в атмосфере их объемной концентрации

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

тепловая энергия. Энергия электромагнитного излучения описывается уравнением Планка: $E = hc/\lambda$, где λ (м) – длина волны; $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме [2]. Среднее значение солнечной энергии, достигающей верхней части атмосферы, составляет около 1368 Вт/м², из которой земной поверхностью поглощается около 70%, остальные 30% отражаются обратно в Космос. На отражательную способность (альбедо) влияют облака, пыль, дым, вулканический пепел, тип поверхности. Например, океаны в зависимости от географической широты отражают от 6 до 20% лучистой энергии, лесная поверхность от 10 до 20%, пустыни – до 40%, снег – до 80% лучистой энергии. С учетом глобального альбедо средняя общая инсоляция составляет $J = 240$ Вт/м², из которой меньшая часть поглощается атмосферой, а большая часть поглощается Мировым океаном, сушей и биосферой [2].

В стационарном состоянии Земля как космическое тело отдает в виде теплового излучения в окружающее пространство столько энергии, сколько получает. Этот баланс между интенсивностью излучения с единицы земной поверхности J и температурой поверхности T определяется законом Стефана-Больцмана [1, 5]:

$$J = \sigma T^4, \quad (1)$$

где $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (Вт/м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

Из (1) при инсоляции $J = 240$ Вт/м² получаем среднее значение температуры земной поверхности $T = 255$ градусов по шкале Кельвина (–18°C). Реальная средняя температура поверхности Земли в доиндустриальный период составляла 288 град по шкале Кельвина (+15°C). Причина расхождения температуры в 33° является следствием работы ПЭ. Вследствие непрозрачности атмосферы для большей части инфракрасного излучения во внешнее пространство напрямую попадает лишь часть теплового излучения Земли. Общий радиационный баланс поддерживается благодаря тепловому излучению самой атмосферы. Из (1) можно найти интенсивность (мощность) части теплового излучения Земли, ко-

торая перехватывалась в доиндустриальный период парниковыми газами: $J_R = 150$ Вт/м². Именно эта мощность увеличила среднюю глобальную температуру нашей планеты примерно на 33 градуса и поддерживала ее на протяжении всего доиндустриального периода.

ПГ обеспечивают непрозрачность атмосферы для тепловых фотонов определенных длин волн, при этом полосы поглощения фотонов определяются массами входящих в состав молекулы атомов и прочностью ковалентных связей между атомами. Основные ПГ имеют следующие сильные полосы поглощения: водяной пар (1,35–1,45; 2,5–3,4; 5,5–7,5 мкм), диоксид углерода (4,5–5,0; 14–18 мкм), метан (7,5–8,0 мкм) и закись азота (3,0–5,0; 7,5–9,0 мкм). Средняя концентрация водяного пара в атмосфере составляет около 0,4%, ее рост ограничен сверху, потому что относительная влажность пара не может быть больше единицы. Хозяйственная деятельность человека не увеличивает содержание водяного пара в атмосфере, поэтому в расчетах глобального потепления он не приводится среди парниковых газов.

В настоящее время список ПГ по воздействию на глобальное потепление возглавляет диоксид углерода. До 1900 г. биосфера производила и успешно абсорбировала до 200 млрд т/год диоксида углерода, поддерживая его содержание на уровне 280 ppm-eq. В 2020 г. за счет сжигания ископаемого топлива концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась до 415 ppm-eq, чему соответствует содержание в единичном столбе атмосферы 9×10^{25} молекул этого газа. Каждая из этих молекул способна перехватывать определенную долю отраженной Землей радиации, формируя тем самым ПЭ. Поглощение одного фотона теплового излучения молекулой вызывает в ней колебания атомов. Например, в соответствии с уравнением Планка поглощаемые молекулами CO₂ тепловые фотоны с длиной волны $\lambda = 4,26$ мкм обладают энергией $4,65 \cdot 10^{-20}$ Дж и вызывают вибрационное асимметричное растяжение молекулы, а фотоны с большей длиной волны 14,29 мкм обладают энергией $1,39 \times 10^{-20}$ Дж и вызывают изгибные колебания этой молекулы [5]. Приземные молекулы CO₂, как и других ПГ, получают от излучения Земли свою пор-

цию тепловой энергии, уходят вверх, а на их место в процессе конвекции спускаются и подзаряжаются тепловой энергией новые молекулы ПГ.

Антропогенный ПЭ, как причина глобального изменения климата, до сих пор является предметом широкого общественного обсуждения и политических дискуссий. ПЭ дается множество определений, поэтому его концепция нуждается в уточнении. ПЭ – это сложное нелинейное спектральное явление, которому невозможно дать общедоступное и в то же время строгое научное определение. Некоторые специалисты определяют ПЭ как разность между текущей температурой земной поверхности и температурой, соответствующей идущему от «без-атмосферной» Земли инфракрасному излучению. Однако температура не является собственно ПЭ, а является всего лишь одним из многих следствий его работы.

В Пятом оценочном докладе МГЭИК дается такое лаконичное определение ПЭ: «Инфракрасный радиационный эффект всех составляющих атмосферы, поглощающих земное инфракрасное излучение» [3]. Существует также следующее определение ПЭ: «Радиационный эффект наличия в атмосфере парниковых веществ, выражающийся при прочих равных условиях в повышении температуры в приповерхностном слое по сравнению с ситуацией их отсутствия в атмосфере» [6]. Более четким является определение, содержащееся в Большой советской энциклопедии: «Парниковый эффект – это способность атмосферы задерживать часть теплового излучения поверхности Земли, что приводит к накоплению тепла в климатической системе Земли». Содержащиеся в приведенных определениях словосочетания «радиационный эффект» и «тепловое излучение» представляют собой поле фотонов, а потому имеют конкретное энергетическое содержание и соответствующую размерность, о чем в приведенных определениях не говорится.

Как отмечено выше, концепция ПЭ ввиду неполноты существующих формулировок нуждается в развитии. Упомянутое явление «инфракрасный радиационный эффект» – это и есть основа ПЭ, который формируется ПГ и появляется в атмосфере одновременно с появлением в ней ПГ. Попавшие в атмосферу молекулы антропогенных ПГ в соответствии с законами молекулярной физики поглощают часть отраженного земной поверхностью излучения в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн ($\lambda = 3,0\text{--}70\text{ мкм}$).

В связи со сказанным ПЭ можно дать следующее самое общее определение: «Парниковый эффект – это поток поступающей в атмосферу тепловой энергии за счет перехвата парниковыми газами части теплового излучения Земли». Такое определение требует своего развития, так как ПЭ как физическое

явление имеет четкую количественную характеристику с размерностью мощности (интенсивности) радиационного излучения.

ПЭ по своей энергетической сути и результатам воздействия на планету может быть количественно определен как «потенциал радиационного усиления температуры». Энергетическое содержание потенциала радиационного усиления в составе ПЭ удобно выражать в единицах мощности J_R (Вт/м^2), заключенной в столбе атмосферы с основанием 1 м^2 [12]. В прикладных климатических расчетах удобно использовать термин «потенциал радиационного усиления» как энергетический эквивалент ПЭ, который формирует процесс глобального потепления и многие другие наблюдаемые события в климатической системе (КС) Земли.

С учетом изложенного ПЭ как физическому явлению в климатической системе (КС) Земли можно дать следующее развернутое научное определение. «Парниковый эффект – это поток поступающей в атмосферу тепловой энергии за счет перехвата выбросами парниковых газов части теплового излучения Земли, мощность J_R (Вт/м^2) которого определяет потенциал радиационного усиления глобальной температуры на некоторую максимальную величину T_{MAX} и соответствующего усиления собственного теплового излучения Земли на величину перехваченной парниковыми газами мощности излучения J_R (Вт/м^2), в результате чего выведенная из термодинамического равновесия климатическая система Земли возвращается в исходное радиационно-равновесное состояние.

Потенциал радиационного усиления J_R (Вт/м^2) определяет количественную характеристику ПЭ как потока идущей от Земли и перехватываемой ПГ части излучаемой тепловой энергии. Потенциал радиационного усиления как энергетический эквивалент ПЭ присутствует в атмосфере в виде явного тепла, которое постепенно повышает среднюю глобальную приповерхностную температуру атмосферы, нагревает воды Мирового океана, плавит материковые и морские льды.

Антропогенный ПЭ в его многочисленных проявлениях может быть представлен рядом функций. Основной функциональной зависимостью между двумя упомянутыми в определении ПЭ физическими параметрами J_R и T_{MAX} является уравнение Стефана-Больцмана [1, 5]:

$$J_R = \sigma \times (288 + T_{\text{MAX}})^4 - (240 + 150) \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где J_R (Вт/м^2) – потенциал радиационного усиления, формируемый совокупным спектром поглощения содержащихся в атмосфере антропогенных ПГ; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{Вт/м}^2 \times \text{K}^4$) – постоянная Стефана-Больцмана; 240 Вт/м^2 – получаемая Землей солнеч-

ная радиация; $150 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$ – потенциал радиационного усиления, сформированный всеми ПГ, которые присутствовали в атмосфере в доиндустриальный период; 288K – средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы в доиндустриальный период в градусах Кельвина; $T_{\text{MAX}}^{\circ}\text{C}$ – средняя максимальная температура глобального потепления относительно температуры доиндустриального периода 288 градусов по шкале Кельвина (15°C), по достижении которой климатическая система (КС) Земли приходит в радиационно-равновесное состояние.

Входящая в (2) максимальная температура глобального потепления, определяющая результативность работы антропогенного ПЭ, определяется следующей функцией [6, 7]:

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

где K (ppm-eq) – объемное содержание в атмосфере антропогенных ПГ; T_{MAX} – средняя максимальная глобальная температура приземного слоя атмосферы, сформированная потенциалом радиационного усиления J_R , отвечающая радиационно-равновесному состоянию КС Земли при абсолютной температуре $(288 + T_{\text{MAX}})$.

На рис. 1 приводятся графики зависимости максимальной температуры глобального потепления T_{MAX} и потенциала радиационного усиления J_R от концентрации K антропогенных ПГ в атмосфере. Присутствующий в атмосфере потенциал радиационного усиления J_R (Вт/м^2), является основным фактором, определяющим и характеризующим антропогенный ПЭ как физическое явление (рис. 1А). 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. Из функции (3) следует, что при концентрации $K = 850$ ppm-eq наступит парниковое насыщение земной атмосферы, при которой температура глобального потепления достигнет своего максимального значения $T_{\text{MAX}} = 8,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 1Б).

Точка 1 рис. 1 соответствует потенциалу радиационного усиления $J_R = 20 \text{ Вт/м}^2$ и температуре $T_{\text{MAX}} = 3,7^{\circ}\text{C}$, которые соответствуют современному значению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере. Точка 2 определяет соответствующие параметры J_R и T_{MAX} при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере $K = 350$ ppm-eq, которая установится в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации с темпом снижения выбросов ПГ $\Delta K = 2 \text{ ppm-eq/10 лет}$. Точка 3 соответствует состоянию насыщения атмосферы антропогенными

ПГ при температуре $T_{\text{MAX}} = 8,9^{\circ}\text{C}$ и максимально возможному проявлению антропогенного ПЭ на Земле.

Земля отражает получаемую коротковолновую солнечную радиацию в виде длинноволнового теплового излучения мощностью 240 Вт/м^2 , из которых около 40 Вт/м^2 свободно проходят и будут проходить через «окно прозрачности» атмосферы в пределах длин волн от $7,5$ до 13 мкм при любых концентрациях трех антропогенных ПГ [2]. Из оставшихся 200 Вт/м^2 около 150 Вт/м^2 перехватывалось всеми ПГ еще в доиндустриальный период. Таким образом, на долю антропогенных ПГ остается ресурс мощности около $J_R = 50 \text{ Вт/м}^2$, который они могут реализовать через потенциал радиационного усиления. Подстановка этого значения потенциала в уравнение Стефана-Больцмана (2) дает максимальную температуру глобального потепления $T_{\text{MAX}} = 8,7^{\circ}\text{C}$, которую могут обеспечить антропогенные ПГ и которая хорошо ложится на точку 3 графика рис. 1. Таким образом, параболическую функцию максимального глобального потепления (3) можно уверенно использовать в прогнозных расчетах глобального потепления.

Расчет с использованием функции (3) приводит к следующему важному выводу: чтобы ограничить рост средней глобальной температуры значением $+2^{\circ}\text{C}$, как этого требует Парижское соглашение, че-

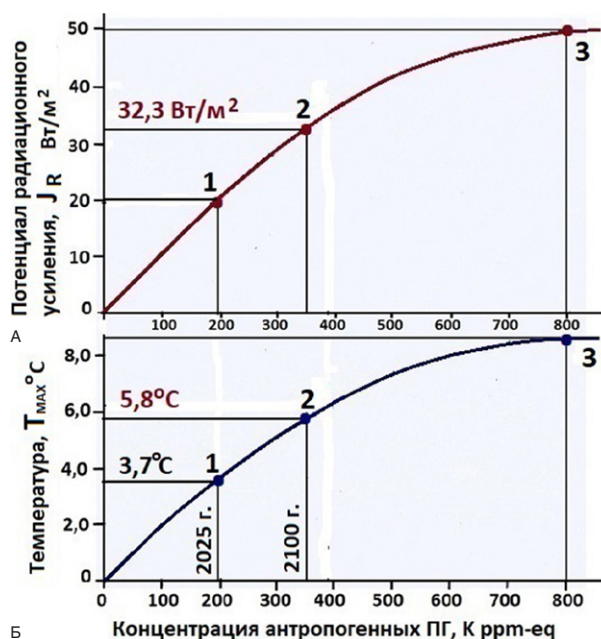


Рис. 1.

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

ловечество должно было прекратить выбросы ПГ в далеком 1990 г., когда их концентрация в атмосфере составляла примерно 100 ppm-eq. Этот расчет подтверждает справедливость формулировки п. 17 Климатической доктрины РФ, в котором также отмечается, что «удержать рост глобальной температуры ниже +2°C по сравнению с 1900 г. не удастся». Действительно, в настоящее время при вдвое большем содержании в атмосфере (около 190 ppm-eq) антропогенных ПГ ставить перед человечеством такую цель бессмысленно.

Следует отметить, что декарбонизация энергетики безусловно необходима, но не только ради смягчения отдаленных опасных последствий изменения климата за пределами XXI века, а еще и потому, что человечество должно готовиться к грядущей истощаемости ископаемого топлива, которое придется замещать альтернативными источниками энергии. Можно с уверенностью сказать, что история с быстрой декарбонизацией и быстрым энергопереходом по рецептам ПС закончится глубоким разочарованием. Не скомпенсированные биосферой выбросы ПГ будут существовать до тех пор, пока человечество будет производить и потреблять энергию в больших количествах [10]. При современных технологических возможностях человечеству не удастся обеспечить двойное снижение выбросов ПГ к 2050 г., а углеродную нейтральность энергетики с нулевыми выбросами не удастся обеспечить даже к 2100 г.

Ст. 13 Климатической доктрины РФ говорит о необходимости получения достоверных сведений об ожидаемых последствиях глобального изменения климата для своевременного реагирования на провоцируемые им угрозы для цивилизации. Эффективность и независимость климатической политики РФ должна быть обеспечена наличием собственного прогностического алгоритма расчета климатического будущего и его основных последствий. Такой алгоритм, основанный на анализе накопленных мировым научным сообществом данных мониторинга глобального потепления, в России разработан [9]. Прогностический алгоритм включает в себя ряд эмпирических функций, в которых в качестве граничных условий и независимой переменной является концентрация антропогенных ПГ в атмосфере и формируемый ими потенциал радиационного усиления. Предлагаемый способ расчета не имеет зарубежных аналогов и позволяет рассчитывать параметры глобального потепления и его основных последствий при всех возможных сценариях декарбонизации мировой экономики.

Наиболее приемлемым для человечества с технической и социально-экономической точек зрения вариантом действий по смягчению последствий глобального изменения климата является умеренный

сценарий декарбонизации хозяйственной деятельности [7]. При умеренном сценарии декарбонизации выбросы в атмосферу равномерно снижаются на $\Delta K = 2 \text{ ppm-eq}/10 \text{ лет}$ с современного уровня **29 ppm-eq/10 лет до 13 ppm-eq/10 лет, в результате чего в атмосфере к 2100 г. накопится не более 350 ppm-eq антропогенных ПГ.** В дальнейшем этот сценарий используется в качестве примера расчета наиболее вероятного из всех возможных вариантов климатического будущего цивилизации.

Приведем ряд расчетных функций, определяющих основные энергетические параметры ПЭ, и остановимся на анализе процессов потепления, которые будут происходить в XXI веке. Из графика рис. 1а следует, что в интервале увеличивающихся концентраций антропогенных ПГ от 190 ppm-eq до 350 ppm-eq мощность J_R потенциала радиационного усиления (антропогенного парникового эффекта) увеличивается от 20 Вт/м^2 в 2025 г. до 32 Вт/м^2 в 2100 г. по линейному закону:

$$J_R = 8,3 \times 10^{-2} \times K + 3,8 \text{ (Вт/м}^2\text{)}. \quad (4)$$

Эту функцию можно назвать «формулой антропогенного ПЭ», которая через потенциал радиационного усиления определяет энергетику ПЭ, формируемого выбросами антропогенных ПГ в процессе хозяйственной деятельности человечества в XXI веке.

Чем больше излучения J_R , идущего от поверхности Земли, поглощается ПГ атмосферы, тем выше должна становиться температура земной поверхности $T_{ЗП}$ и собственное тепловое излучение Земли $J_{ЗП}$, чтобы излучать больше тепловой энергии и тем самым восстановить нарушенное радиационное равновесие КС Земли. Потенциал радиационного усиления (он же ПЭ) J_R всегда приводит к повышению глобальной температуры до некоторого максимального значения T_{MAX} , по достижении которого ПЭ полностью исчерпает свой «нагревательный» ресурс.

Антропогенные ПГ имеют свои индивидуальные спектры поглощения и не различают происхождения тепловых фотонов, которые они перехватывают. Они одинаково охотно поглощают как полученное от Солнца отраженное тепловое излучение Земли J_{OT} так и собственное тепловое излучение нагревающейся земной поверхности $J_{ЗП}$. Потенциал радиационного усиления представляет собой сумму двух радиационных потоков. В процессе работы ПЭ непрерывно меняется структура потенциала радиационного усиления J_R : насколько уменьшается доля отраженного излучения J_{OT} , настолько увеличивается доля собственного излучения земной поверхности $J_{ЗП}$ в составе потенциала J_R . ПЭ, как энергетический процесс, начинается с перехвата ПГ отраженного

земной поверхностью излучения, а завершается перехватом собственного теплового излучения Земли, нагретой до температуры T_{MAX} (2). В процессе глобального потепления соблюдается следующее условие:

$$J_R = (J_{\text{OT}} + J_{\text{ЗП}}) \text{ Вт/м}^2. \quad (5)$$

Функция (5) отражает следующее свойство ПЭ: при постоянном содержании ПГ в атмосфере ($K = \text{const}$) процесс глобального потепления определяет доля нереализованного отраженного излучения $J_{\text{OT}} = (J_R - J_{\text{ЗП}})$ в составе потенциала радиационного усиления J_R , которая постепенно расходуется на нагревание Мирового океана и других составляющих КС Земли. По мере повышения средней глобальной температуры отраженное «чужое» излучение J_{OT} в составе J_R будет стремиться к нулю, а собственное тепловое излучение Земли $J_{\text{ЗП}}$ будет увеличиваться до наступления равенства $J_{\text{ЗП}} = J_R$.

Накопленные в период с 1970 по 2020 гг. натурные данные свидетельствуют, что интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии единицей площади земной поверхности (нетто-поглощение) I_0 зависит от содержания ПГ в атмосфере [7, 8]. Текущее значение нетто-поглощения может быть также представлено как линейная функция от нереализованного потенциала радиационного усиления (табл. 2, рис. 2):

$$I_0 = 0,11(J_R - J_{\text{ЗП}} - 3,5) \text{ Вт/м}^2, \quad (6)$$

где разность $J_{\text{OT}} = (J_R - J_{\text{ЗП}})$ представляет собой не реализованную часть мощности потенциала радиационного усиления, сформированную отраженным тепловым излучением Земли.

В табл. 2 приводятся натурные и расчетные данные значений энергетических параметров антропогенного ПЭ при растущих концентрациях антропогенных ПГ в атмосфере до 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики.

На рис. 2 приводится зависимость интенсивности поглощения I_0 парникового тепла КС Земли от не реализованной части потенциала радиационного усиления J_{OT} при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики. В период с 1970 по 2030 гг. эта зависимость является линейной и описывается функцией (1).

Интенсивность поглощения тепловой энергии всей земной поверхностью от мощности потенциала парникового усиления (ПЭ) J_R определяется следующей линейной функцией [8]:

$$\Delta Q = 4,95 \times 10^{15} \times (J_R - J_{\text{ЗП}} - 3,5) \text{ кВт} \cdot \text{ч/10 лет} \quad (7)$$

Функции (6) и (7) поглощения парниковой тепловой энергии КС Земли получены на основании натурных данных, поэтому учитывают все виды радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану, суше и атмосфере [8, 9]. При постоянном значении концентрации $K = \text{const}$ и соответственно при постоянном значении мощности ПЭ $J_R = \text{const}$ мощность собственного теплового излучения Земли $J_{\text{ЗП}}$ будет увеличиваться, поэтому интенсивности поглощения тепловой энергии I_0 и ΔQ будут по мере приближения к радиационно-равновесному состоянию уменьшаться до нулевых значений (рис. 5, 6).

Натурные данные отмечают важную особенность теплообмена в КС Земли в условиях работающего антропогенного ПЭ. При относительно больших значениях мощности потенциала радиационного усиления $J_R \geq 9,2 \text{ Вт/м}^2$ (или $i \geq 0,4 \text{ Вт/м}^2$, или $\Delta Q \geq 18 \times 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч/10 лет}$) глобальная температура получает постоянное приращение $\Delta T = 0,175 \text{ град/10 лет}$ [9]:

$$\Delta T = 0,175 \text{ град/10 лет} \\ \text{при } \Delta Q \geq 18 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч/10 лет} (i \geq 0,4 \text{ Вт/м}^2). \quad (8)$$

При постоянном значении потенциала радиационного усиления $J_R = \text{const}$ глобальная температура приземного слоя атмосферы будет расти от некоторого начального значения до максимальной температуры T_{MAX} , отвечающей радиационно-равновесному состоянию КС Земли. В соответствии с ростом глобальной температуры будет также расти собственное тепловое излучение Земли от некоторого начального значения до максимального значения J_R . Каждому приращению глобальной температуры на $\Delta T = 0,175 \text{ град/10 лет}$ соответствует постоянное приращение собственного теплового излучения Земли как абсолютно черного тела на $\Delta J_{\text{ЗП}} = 0,955 \text{ Вт/м}^2$ за 10 лет.

В табл. 3 и на рис. 3 приводятся расчетные данные о средней чувствительности энергетических параметров ПЭ к изменению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере при умеренном сценарии декарбонизации энергетики. Например, в XXI веке среднее значение «температурной чувствительности» равно $\Delta T_{\text{MAX}} = 0,015 \text{ град/ррм-eq}$, а значение чувствительности потенциала радиационного усиления равно $\Delta J_R = 0,08 \text{ (Вт/м}^2\text{)/ррм-eq}$. Увеличение мощности парникового эффекта от роста выбросов ПГ можно представить в виде эквивалента уменьшения расстояния от Земли до Солнца (табл. 3). Увеличение концентрации ПГ в атмосфере на $\Delta K = 1 \text{ ррм-eq}$ по обогревающему воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу на $\Delta R = 11 \times 10^3 \text{ км/ррм-eq}$ [5].

ТАБЛИЦА 2.

Средние значения энергетических параметров антропогенного парникового эффекта при росте концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере до 2100 г.

Годы	K ppm-eq	I_0 Вт/м ²	ТЗП °С	$J_{зп}$ Вт/м ²	TMAX °С	J_R Вт/м ²	J_{OT} Вт/м ²
1970–1980	80	0,31	0,425	2,07	1,6	8,82	6,75
1980–1990	101	0,44	0,588	3,29	1,99	10,97	7,68
1990–2000	121	0,56	0,762	4,21	2,35	13,0	8,79
2000–2010	141	0,68	0,938	5,2	2,71	14,97	9,77
2010–2020	168	0,85	1,102	6,07	3,17	17,54	11,47
2020–2030	197	1,02	1,265	6,95	3,64	20,18	13,23
2040–2050	250	1,30	1,61	8,88	4,46	24,50	15,63
2090–2100	350	1,63	2,50	13,8	5,81	32,52	18,70
2140–2150	350	1,10	3,4	18,82	5,81	32,52	13,7
2200–2210	350	0,41	4,48	24,9	5,81	32,52	7,60

Обозначения в таблице 2 имеют следующие значения:

K ppm-eq – среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в CO₂ – эквиваленте в расчетном 10-летии.

I_0 Вт/м² – интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии (нетто-поглощение) единицей площади земной поверхности.

ТЗП °С – текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы.

$J_{зп}$ Вт/м² – собственное тепловое излучение нагреваемой земной поверхности (реализованная часть ПРУ).

T_{MAX} °С – температура максимального глобального потепления.

J_R Вт/м² – потенциал радиационного усиления, сформированный антропогенными ПГ.

J_{OT} Вт/м² – нереализованная часть потенциала радиационного усиления.

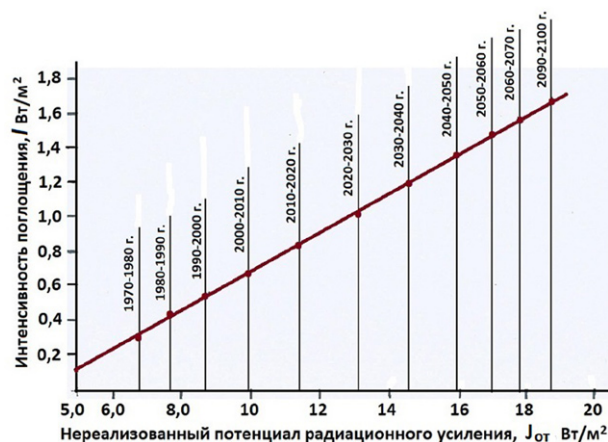


РИС. 2.

Зависимость интенсивности поглощения парникового тепла от нереализованной части потенциала радиационного усиления J_{OT} при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики

В период с 2020 по 2030 гг. человечеством будет выброшено в атмосферу не менее 29 ppm-eq ПГ (табл. 1). За счет выбросов в этот период мощность ПЭ усилится на $\Delta J_R = 2,23$ Вт/м², а температура максимального глобального потепления в будущем на $\Delta T_{MAX} = 0,435$ °С. Выбросы ПГ в этот период делают климат на Земле жарче настолько, как если бы Земля приблизилась к Солнцу на 310 тыс. км.

Приведенный ряд эмпирических функций (2–8) позволяет выполнять прогнозные расчеты глобального потепления в XXI веке и его последствий для всех возможных сценариев декарбонизации мировой хозяйственной деятельности человечества. На рисунках 4, 5 и 6 приводятся графические результаты комплексного расчета всех энергетических составляющих антропогенного ПЭ и наиболее вероятного климатического будущего цивилизации в XXI веке и за его пределами. Расчет выполнен для умеренного сценария декарбонизации, при котором концентрация антропогенных ПГ в атмосфере до 2100 г. растет в соответствии с графиком 1 рис. 4, а после 2100 г. предположительно обеспечивается углеродная нейтральность мировой хозяйственной деятельности человечества.

При умеренном сценарии декарбонизации (график 1 рис. 4) к 2100 г. в атмосфере накопится $K = 350$ ppm-eq антропогенных ПГ, которые сформируют потенциал радиационного усиления $J_R = 32,5$ Вт/м² (график 1 рис. 5) и обеспечат в будущем максимальную температуру глобального потепления $T_{MAX} = 5,8$ °С (график 2 рис. 4).

Если предположить, что человечеству удастся после 2100 г. обеспечить углеродную нейтральность своей деятельности, то процесс глобального потепления будет продолжаться до 2320 г. При этом нетто-поглощение парниковой тепловой энергии будет увеличиваться до значения $I_0 = 1,63$ Вт/м² в 2100 г. (график 2 рис. 5), затем будет уменьшаться до

ТАБЛИЦА 3.

Чувствительность энергетических параметров парникового эффекта к изменению концентрации антропогенных ПГ в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации энергетики

Энергетический параметр парникового эффекта, формируемого антропогенными ПГ	Среднее значение параметра в период 2020-2030 гг. (K = 200 ppm-eq)	Удельное приращение чувствительности параметра, $\Delta/\text{ppm-eq}$
Потенциал радиационного усиления (явное тепло), J_R (Вт/м ²)	20,8 Вт/м ²	+0,08 (Вт/м ² ×ppm-eq)
Температура максимального глобального потепления, T_{MAX} (°C)	3,7°C	+0,015 (°C/ppm-eq)
Интенсивность накопления тепловой энергии всей земной поверхностью, ΔQ кВт×ч/10 лет	$47,2 \times 10^{15}$ кВт×ч/10 лет	$+0,276 \times 10^{15}$ (кВт×ч/10 лет×ppm-eq)
Нетто-поглощение тепловой энергии Землей, I_0 Вт/м ²	1,05 Вт/м ²	+0,006 (Вт/м ² ×ppm-eq)
Эквивалент уменьшения расстояния от Земли до Солнца за счет усиления ПЭ, ΔR км	$114,3 \times 10^6$ км	$-11 \cdot 10^3$ (км/ppm-eq)

наступления в 2320 г. радиационно-равновесного состояния системы «Земля–Космос».

Соответствующим образом будет изменяться интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью (график 1 рис. 6): увеличиваться до $\Delta Q = 74 \times 10^{15}$ (кВт×ч/10 лет), а затем уменьшаться до нулевого значения в 2320 г. Поглощение парниковой тепловой энергии приведет к накоплению к 2100 г. в Мировом океане, суше и атмосфере тепловой энергии (график 2 рис. 6) около 720×10^{15} кВт×ч. За счет теплового расширения воды и таяния материковых льдов уровень Мирового океана к 2100 г. поднимется примерно на 800 мм [13].

По мере накопления тепловой энергии средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы к 2100 г. повысится до 2,6°C (график 3 рис. 4) и далее до максимального значения 5,8°C в 2320 г. По мере роста глобальной температуры будет расти собственное тепловое излучение Земли (график 3 рис. 5): в 2100 г. нагревающаяся Земля будет излучать собственный тепловой поток мощностью $J_{\text{ЗП}} = 13,8$ Вт/м², а в 2320 г. ее собственное излучение увеличится до значения мощности потенциала радиационного усиления $J_R = 32,5$ Вт/м². В этот момент мощность потенциала радиационного усиления (ПЭ) будет полностью реализована, и, как следствие, наступит радиационно-равновесное состояние климатической системы Земли.

На рис. 7 приводится примерная схема радиационного баланса Земли в 2100 г. В центре рисунка приводится текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы. На протяжении XXI века Земля будет нагреваться за счет ПЭ и принимать больше тепловой энергии, чем возвращать в Космос. В 2100 г. нетто-поглощение тепла Землей увеличится до максимального значения 1,60 Вт/м², а Земля в этом году будет возвращать в космическое пространство всего 238,4 Вт/м² тепло-

	Приращение на 1 ppm-eq	Значение в 2100 г.
ΔK	$\Delta J_R = 0,08 \text{ Вт/м}^2 \Rightarrow J_R = 33 \text{ Вт/м}^2$	
	$\Delta I_0 = 0,006 \text{ Вт/м}^2 \Rightarrow I_0 = 1,6 \text{ Вт/м}^2$	
	$\Delta Q = 0,28 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч} \Rightarrow Q = 758 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$	
	$\Delta T_{\text{MAX}} = 0,015^\circ\text{C} \Rightarrow T_{\text{MAX}} = 5,8^\circ\text{C}$	
	$\Delta R = 10,7 \text{ тыс. км} \Rightarrow R = 112 \text{ млн км}$	

РИС. 3.

Влияние роста концентрации ПГ в атмосфере на $\Delta K = 1 \text{ ppm-eq}$ на мощность парникового эффекта и ряда последствий его работы в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики, а также накопленные на Земле к 2100 г. значения энергетических параметров глобального потепления

вой энергии из получаемой от Солнца 240 Вт/м² лучистой энергии. При условии обеспечения после 2100 г. углеродной нейтральности хозяйственной деятельности процесс глобального потепления будет продолжаться до достижения в 2320 г. радиационно-равновесного состояния, при котором Земля будет возвращать в космическое пространство всю получаемую от Солнца тепловую энергию [5].

ВЫВОДЫ

Впервые дается развернутое научное определение ПЭ как присутствующего в атмосфере в виде явного тепла потока радиации, являющегося частью теплового излучения Земли, перехваченного содержащимися в атмосфере ПГ. Энергетической характеристикой ПЭ является «потенциал радиационного усиления» с размерностью единичной мощности (интенсивности) теплового излучения

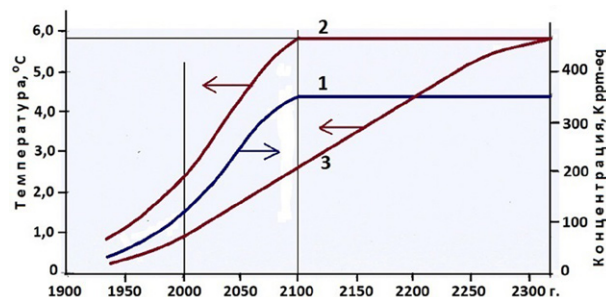


РИС. 4.

Графики роста при умеренном сценарии декарбонизации энергетики: 1 – концентрация антропогенных ПГ в атмосфере; 2 – соответствующая максимальная температура глобального потепления; 3 – средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы

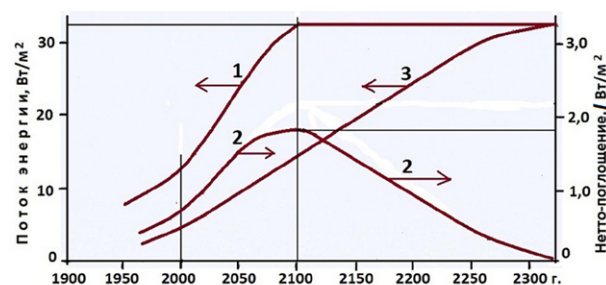


РИС. 5.

Графики изменения при умеренном сценарии декарбонизации энергетики: 1 – потенциал радиационного усиления температуры (мощность парникового эффекта) J_R ; 2 – нетто-поглощение парниковой тепловой энергии; 3 – собственное тепловое излучение нагревающегося приземного слоя атмосферы J_{3P}

J_R (Вт/м²). Например, в 2020 г. единичная мощность сформированного антропогенными ПГ потенциала радиационного усиления, а следовательно и ПЭ составляла 18,8 Вт/м².

Уточненная концепция ПЭ и полученные на ее основе эмпирические функции (2–8) позволяют выполнять прогнозные расчеты глобального потепления при любых сценариях декарбонизации мировой экономики. Разработанный способ аналитического расчета глобального потепления не имеет зарубежных аналогов. Разработанный алгоритм расчета обеспечивает достижение одной из целей «Федеральной научно-технической программы в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021–2030 годы», заключающейся в преодолении «отставания от мирового уровня в части прогнозирования состояния окружающей среды и климата», а также «в обеспечении надежности климатических прогнозов».

В современных условиях межледникового перио-

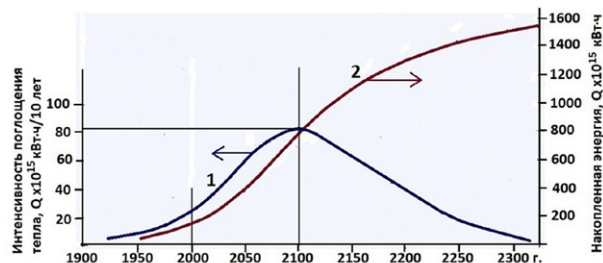


РИС. 6.

Графики изменения при умеренном сценарии декарбонизации энергетики: 1 – интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью ΔQ ; 2 – количество накопленной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии

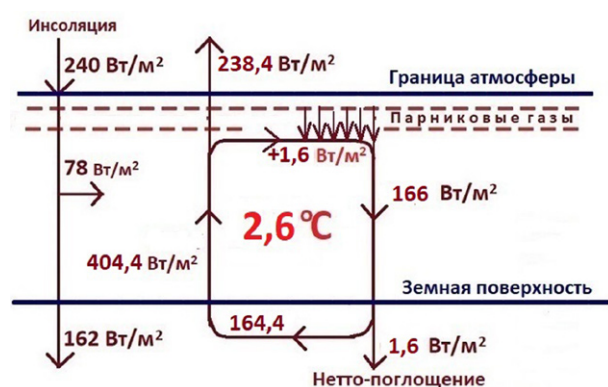


РИС. 7.

Примерная схема радиационного баланса Земли в 2100 г. при содержании антропогенных ПГ в атмосфере $K = 350$ ppm-eq и соответствующей мощности парникового эффекта (потенциала радиационного усиления) $J_R = 32,5$ Вт/м²

да предельная мощность антропогенного потенциала радиационного усиления (антропогенного ПЭ) определяется свободной неперехваченной мощностью 50 Вт/м² инфракрасного излучения Земли, которая в будущем может быть полностью перехвачена совокупным спектром поглощения антропогенных ПГ с соответствующим повышением температуры глобального потепления до максимально возможного значения около 8,9°C.

Оптимальным для цивилизации сценарием декарбонизации энергетики в XXI веке является умеренный сценарий снижения выбросов ПГ с темпом $\Delta K = -2$ ppm-eq/10 лет с современных 29 ppm-eq/10 лет до 13 ppm-eq/10 лет в 2100 г. и итоговым накоплением концентрации антропогенных ПГ в атмосфере около $K = 350$ ppm-eq.

При умеренном сценарии декарбонизации выброс в атмосферу одной объемной единицы антропогенных ПГ 1 ppm-eq увеличивает мощность ПЭ примерно на 0,08 Вт/м², температуру максималь-

ного глобального потепления на $0,015^{\circ}\text{C}$, что по кумулятивному тепловому воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу на 11 тыс. км.

В XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мощность потенциала радиационного усиления (антропогенного ПЭ) по мере роста концентрации ПГ в атмосфере будет увеличиваться в пределах от 12 до 32 Вт/м^2 , в результате основные энергетические характеристики процесса глобального потепления к 2100 г. увеличатся до следующих значений: нетто-поглощение парниковой тепловой энергии до $1,63 \text{ Вт/м}^2$; количество накопленной климатической системой Земли тепловой энергии до $720 \cdot 10^{15} \text{ кВт} \cdot \text{ч}$; средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы до $2,6^{\circ}\text{C}$.

При современном уровне технологического развития самые срочные действия по снижению использования ископаемого топлива ради снижения выбросов ПГ в атмосферу не помогут остановить процесс глобального потепления в XXI веке. После реализации к 2100 г. умеренного сценария декарбонизации и последующем гипотетическом обеспечении углеродной нейтральности при $K = 350 \text{ ppm-eq}$ глобальное потепление будет безостановочно продолжаться до достижения Землей в 2320 г. радиационно-равновесного состояния при температуре максимального глобального потепления около $T_{\text{max}} = 5,8^{\circ}\text{C}$.

Принимая во внимание, что декарбонизация способна обеспечить лишь отдаленные позитивные климатические изменения, Правительству РФ следует обратить внимание на выполнение следующих безотлагательных действий:

- при разработке Энергетической стратегии РФ до 2050 г. и будущей климатической повестки не следует руководствоваться нереальными рекомендациями Парижского соглашения по «быстрому и глубокому» отказу от использования ископаемого топлива, а предусмотреть постепенное снижение использования ископаемого топлива по мере его равнозначного замещения альтернативными источниками энергии, соотносясь с технологическими возможностями и национальными интересами России;

- приступить к разработке и реализации долгосрочных мероприятий по адаптации населения, инфраструктуры и в целом жизненного пространства ко все более учащающимся природным стихийным бедствиям: ураганам, наводнениям, засухам, тепловым волнам, землетрясениям, росту уровня Мирового океана и деградации вечной мерзлоты;

- совершенствовать национальное законодательство по страхованию жизни и имущества граждан в условиях растущих рисков природных катастроф.

В.В. ТЕТЕЛЬМИН
ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПАРНИКОВОГО ЭФФЕКТА
И ЕГО РАБОТА НА ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА В XXI
ВЕКЕ И ЗА ЕГО ПРЕДЕЛАМИ

ЛИТЕРАТУРА

1. БРИНКМАН Э. Физические проблемы экологии. М.: Интеллект. С. 288.
2. ДЖИРАД ДЖ. Основы химии окружающей среды. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2008. 640 с.
3. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в пятый оценочный доклад МГЭИК [основная группа авторов Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер]. МГЭИК. Женева, Швейцария. С. 44.
4. 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.
5. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Основные потоки энергии, формируемые антропогенными парниковыми газами в нагревающейся климатической системе Земли // Экология промышленного производства. №4. 2024. С. 51–57.
6. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. №1. Т. 30. С. 45–57.
7. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления // Энергия: экономика, техника, экология. №3. 2023. С. 27–34.
8. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий // Вестник РАЕН. 2023. №3. Т. 23. С. 91–99.
9. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Алгоритм аналитического расчета глобального потепления и примеры расчета его основных последствий // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2024. №2. С. 21–32.
10. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетное подтверждение недостижимости климатических целей Парижского соглашения // Экология промышленного производства. 2024. №2. С. 58–63.
11. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Особенности глобального потепления и роста уровня Мирового океана // Гидротехника. 2024. №3. С. 22–28.
12. ТЕТЕЛЬМИН В.В. Расчетные функции обогревающего воздействия антропогенных парниковых газов // Использование и охрана природных ресурсов в России. №4. 2024. С. 23–31.
13. 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.

REFERENCE

1. BRINKMAN E. Physical Problems of Ecology. Moscow: Intellect. 288. (In Russian).
2. GIRARD J. Fundamentals of Environmental Chemistry. Moscow: FIZMATLIT. 2008:640. (In Russian).
3. IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, III to the IPCC Fifth Assessment Report [core authors R.K. Pachauri and L.A. Meyer]. IPCC. Geneva. Switzerland. Page 44. (In Russian).
4. SEMENOV S.M. Greenhouse Effect: Discovery, Concept Development, Role in Shaping Global Climate and Its Anthropogenic Changes. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. 2015;2:103–126. (In Russian).
5. TETELMIN V.V. The main energy flows generated by anthropogenic greenhouse gases in the warming climate system of the Earth. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2024;4:51–57. (In Russian).
6. TETELMIN V.V. Formula for maximum global warming. *Vestnik RUDN. Seriya ekologii i bezopasnosti chiznedeyatel'nosti*. 2022;1;(30):45–57. (In Russian).
7. TETELMIN V.V. Energy features and limits of global warming. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2023;3:27–34. (In Russian).
8. TETELMIN V.V. Energy analysis of the features of global warming and its consequences. *Vestnik RAEN*. 2023;3;(23):91–99. (In Russian).
9. TETELMIN V.V. Algorithm for analytical calculation of global warming and examples of calculating its main consequences. *Ispolovanie i ochrana prirodnich resursov*. 2024;2:21–32. (In Russian).
10. TETELMIN V.V. Calculated confirmation of the unattainability of the climate goals of the Paris Agreement. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. . 2024;2:58–63. (In Russian).
11. TETELMIN V.V. Features of global warming and sea level rise. *Gidrotehnika*. 2024;3:22–28. (In Russian).
12. TETELMIN V.V. Calculated functions of the heating effect of anthropogenic greenhouse gases. *Ispolovanie i ochrana prirodnich resursov*. 2024;4:23–31. (In Russian).
13. 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.

Тетельмин Владимир Владимирович,
д.т.н., главный специалист Института экологии Российского
университета дружбы народов (РУДН) им. Патриса Лумум-
бы, 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