

УДК 5515.52

DOI: 10.52190/2073-2589_2025_3_48

EDN: RXROKA

Уточненная концепция парникового эффекта и последствия глобального потепления в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики

В. В. ТЕТЕЛЬМИН, д-р техн. наук

Институт экологии Российского университета дружбы народов имени Патриса Лумумбы,
Москва, Россия

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

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, усиливающегося за счет роста содержания в атмосфере антропогенных парниковых газов [1—13]. До 1900 г. объемные концентрации К трех ПГ в атмосфере были следующими: CO₂ — 280 ppm (млн⁻¹); CH₄ — 0,7 ppm; N₂O — 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 доиндустриальной атмосфере Земли в CO₂-эквиваленте составляло 370 ppm-eq (2,84·10¹² 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 тепловая энергия. Энергия электромагнитного излучения описывается уравнением Планка: $E = hc/\lambda$, где λ (м) — длина волны; h — 6,6·10⁻³⁴ 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].

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

Тетельмин Владимир Владимирович, главный специалист, член Общественного совета при Минэнерго РФ.
E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12.02.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

© Тетельмин В. В., 2025

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 $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (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 °С). Реальная средняя температура поверхности Земли в доиндустриальный период составляла 288 град по шкале Кельвина (+15 °С). Причина расхождения температуры в 33 градуса является следствием работы парникового эффекта. 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, которая перехватывалась в доиндустриальный период парниковыми газами: $J_R = 150$ Вт/м². Именно такую мощность поглощения ИК-излучения Земли обеспечивали парниковые газы (ПГ), которая увеличила среднюю глобальную температуру нашей планеты примерно на 33 градуса и поддерживала её на протяжении всего доиндустриального периода.

Парниковые газы 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 парниковые газы 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 %, который участвует в двух противоположных атмосферных процессах с обратной связью. Процесс с положительной обратной связью заключается в том, что потепление увеличивает испарение воды, повышает концентрацию пара, что через парниковый эффект дополнительно нагревает Землю. Процесс с отрицательной связью заключается в том, что увеличение облачности увеличивает альбедо, что способствует охлаждению земной поверхности. У водяного пара рост концентрации ограничен сверху, потому что его относительная влажность 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, имеющий высокий уровень поглощения теплового

излучения Земли в двух вышеуказанных областях ИК-диапазона. 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 $9 \cdot 10^{25}$ молекул этого газа. Каждая из этих молекул способна перехватывать определенную долю отраженной Землей радиации, формируя тем самым парниковый эффект. Поглощение одного фотона теплового излучения молекулой вызывает в ней колебания атомов. Набор возможных частот колебаний является уникальным для каждого вида молекул. 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 $1,39 \cdot 10^{-20}$ Дж и вызывают изгибные колебания этой молекулы [5]. Приземные молекулы CO₂, как и других ПГ, получают от излучения Земли свою порцию тепловой энергии, уходят вверх, а на их место в процессе конвекции спускаются и подзаряжаются тепловой энергией новые молекулы ПГ.

После 1900 г. главным фактором глобального изменения климата является парниковый эффект, которому дается множество определений, и концепция которого нуждается в уточнении. Антропогенный парниковый эффект, как причина глобального изменения климата, до сих пор является предметом широкого общественного обсуждения и политических дискуссий. Парниковый эффект (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 парниковым эффектом, а является всего лишь одним из многих следствий его работы.

В Пятом оценочном докладе МГЭИК дается такое лаконичное определение парниковому эффекту: "Инфракрасный радиационный эффект всех составляющих атмосферы, поглощающих земное инфракрасное излучение" [3]. Существует также следующее определение парникового эффекта: "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 как физические явления имеют конкретное энергетиче-

ческое содержание и соответствующую размерность, о чем в приведенных определениях не говорится.

Как отмечено выше, главным фактором наблюдаемого глобального изменения климата является антропогенный парниковый эффект, концепция которого ввиду неполноты существующих формулировок нуждается в развитии. Упомянутое явление "инфракрасный радиационный эффект" — это и есть основа парникового эффекта, который формируется парниковыми газами и появляется в атмосфере одновременно с появлением в ней парниковых газов. Попавшие в атмосферу молекулы антропогенных ПГ в соответствии с законами молекулярной физики поглощают часть отраженного земной поверхностью излучения в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн ($\lambda = 3,0\text{—}70$ мкм).

В связи со сказанным парниковому эффекту как "радиационному эффекту" 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 общедоступное определение, как и приведенные выше определения, требуют своего развития, так как парниковый эффект как физическое явление имеет четкую зависящую от содержания в атмосфере парниковых газов количественную характеристику с размерностью мощности (интенсивности) радиационного излучения, приходящейся на единицу земной поверхности.

Парниковый эффект 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 парникового эффекта удобно выражать в единицах мощности J_R (Вт/м²), заключенной в столбе атмосферы с основанием 1 м² [12]. В прикладных климатических расчетах удобно использовать термин "потенциал радиационного усиления" как энергетический эквивалент парникового эффекта, который формирует процесс глобального потепления и многие другие наблюдаемые события в климатической системе (КС) Земли.

С учетом изложенного парниковому эффекту 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/м²) 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/м²), в результате чего выведенная из термодинамического равновесия климатическая система Земли возвращается в исходное радиационно-равновесное состояние.

Потенциал радиационного усиления J_R (Вт/м²) определяет количественную характеристику парникового эффекта как потока идущей от Земли и перехватываемой парниковыми газами части излучаемой тепловой энергии. Потенциал радиационного усиления

как энергетический эквивалент парникового эффекта 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 парниковый эффект в его многочисленных проявлениях может быть представлен рядом функций. Основной функциональной зависимостью между двумя упомянутыми в определении парникового эффекта физическими параметрами J_R и T_{\max} является уравнение Стефана-Больцмана [1, 5]:

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

где J_R — потенциал радиационного усиления, формируемый совокупным спектром поглощения содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов, Вт/м²; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴; 240 Вт/м² — получаемая Землей солнечная радиация; 150 Вт/м² — потенциал радиационного усиления, сформированный всеми ПГ, которые присутствовали в атмосфере в доиндустриальный период; 288 К — средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы в доиндустриальный период в градусах Кельвина; T_{\max} — средняя максимальная температура глобального потепления относительно температуры доиндустриального периода 288 градусов по шкале Кельвина (15 °С), по достижении которой климатическая система (КС) Земли приходит в радиационно-равновесное состояние, °С.

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

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

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 $(288 + T_{\max})$.

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/м²), является основным фактором, определяющим и характеризующим антропогенный парниковый эффект как физическое явление (рис. 1, а). 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 $T_{\max} = 8,9$ °С (рис. 1, б).

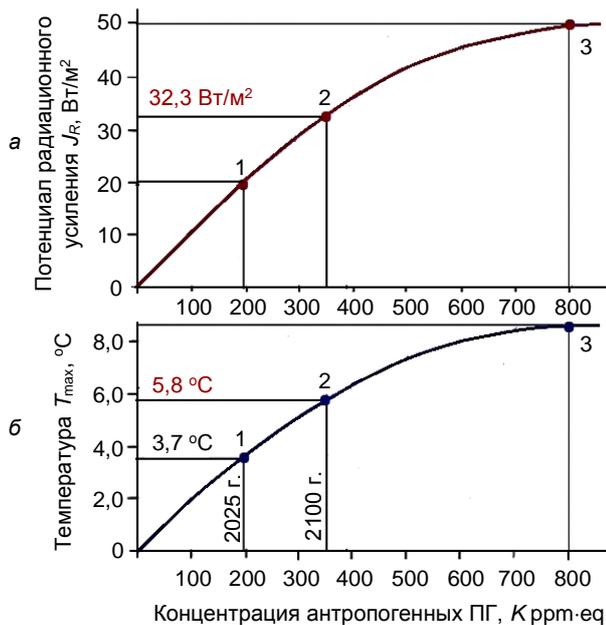


Рис. 1. Графики зависимости потенциала радиационного усиления J_R (а) и максимальной температуры глобального потепления T_{max} (б) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере

Точка 1 рис. 1 соответствует потенциалу радиационного усиления $J_R = 20 \text{ Вт/м}^2$ и температуре $T_{max} = 3,7 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $K = 350 \text{ ррм-ек}$, которая установится в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации с темпом снижения выбросов ПГ $\Delta K = 2 \text{ ррм-ек}/10 \text{ лет}$. Точка 3 соответствует состоянию насыщения атмосферы антропогенными ПГ при температуре $T_{max} = 8,9 \text{ }^\circ\text{C}$ и максимально возможному проявлению антропогенного парникового эффекта 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 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 $T_{max} = 8,7 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $+2 \text{ }^\circ\text{C}$, как этого требует Парижское соглашение, челове-

ство должно было прекратить выбросы ПГ в далеком 1990 г., когда их концентрация в атмосфере составляла примерно 100 ррм-ек . Этот расчет подтверждает справедливость формулировки п. 17 Климатической доктрины РФ, в котором также отмечается, что "удержать рост глобальной температуры ниже $+2 \text{ }^\circ\text{C}$ по сравнению с 1990 г. не удастся". Действительно, в настоящее время при вдвое большем содержании в атмосфере (около 190 ррм-ек) 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 в., а ещё 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 ГИК 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 позволяет рассчитывать параметры глобального потепления и его основных последствий при всех возможных сценариях декарбонизации мировой энергетики.

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 $\Delta K = 2 \text{ ррм-ек}/10 \text{ лет}$ с современного уровня $29 \text{ ррм-ек}/10 \text{ лет}$ до $13 \text{ ррм-ек}/10 \text{ лет}$, в результате чего в атмосфере к 2100 г. накопится не более 350 ррм-ек антропогенных ПГ. В дальнейшем изложении именно этот сценарий будет использован в качестве примера расчета процесса глобального потепления как наиболее вероятного из всех возможных вариантов ожидаемого климатического будущего цивилизации.

Приведем ряд расчетных функций, определяющих основные параметры парникового эффекта, и остановимся на анализе процессов глобального потепления, которые будут происходить в XXI веке при реализации умеренного сценария декарбонизации энергетики. Из графика рис. 1, а следует, что в интервале увеличивающихся концентраций антропогенных ПГ от 190 ppm-eq до 350 ppm-eq мощность J_R потенциала радиационного усиления увеличивается от 20 Вт/м² в 2025 г. до 32 Вт/м² в 2100 г. по линейному закону:

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

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

Чем больше излучения J_R , идущего от поверхности Земли, поглощается парниковыми газами 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 парниковый эффект) J_R всегда приводит к повышению глобальной температуры до некоторого максимального значения T_{max} , по достижении которого парниковый эффект 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 $J_{от}$, так и собственное тепловое излучение нагревающейся земной поверхности $J_{зп}$. Парниковый эффект, как энергетический процесс, начинается с перехвата парниковыми газами отраженного земной поверхностью излучения, а завершается перехватом собственного теплового излучения Земли, нагревшейся до температуры T_{max} (2). Потенциал радиационного усиления представляет собой сумму двух радиационных потоков. В процессе работы парникового эффекта непрерывно меняется структура потенциала радиационного усиления J_R : насколько уменьшается доля отраженного излучения $J_{от}$, настолько увеличивается доля собственного излучения земной поверхности $J_{зп}$ в составе потенциала J_R . В процессе гло-

бального потепления соблюдается следующее условие:

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

Функция (5) отражает следующее свойство парникового эффекта: при постоянном содержании парниковых газов в атмосфере ($K = \text{const}$) процесс глобального потепления определяет доля нереализованного отраженного излучения $J_{от} = (J_R - J_{зп})$ 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 излучение $J_{от}$ в составе J_R будет стремиться к нулю, а собственное тепловое излучение Земли $J_{зп}$ будет увеличиваться до наступления равенства $J_{зп} = J_R$.

Накопленные в период с 1970 по 2020 гг. натурные данные свидетельствуют, что интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии единицей площади земной поверхности (нетто-поглощение) l_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):

$$l_0 = 0,11(J_R - J_{зп} - 3,5) \text{ Вт/м}^2, \quad (6)$$

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

Обозначения в табл. 2 имеют следующие значения:

K , ppm-eq — среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в CO₂-эквиваленте в расчетном 10-летию.

l_0 , Вт/м² — интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии (нетто-поглощение) единицей площади земной поверхности.

$T_{зп}$, °С — текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы.

$J_{зп}$, Вт/м² — собственное тепловое излучение нагревающейся земной поверхности (реализованная часть ПРУ).

T_{max} , °С — температура максимального глобального потепления.

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

$J_{от}$, Вт/м² — нереализованная часть потенциала радиационного усиления.

Таблица 2

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

Годы	K , ppm-eq	l_0 , Вт/м ²	$T_{зп}$, °С	$J_{зп}$, Вт/м ²	T_{max} , °С	J_R , Вт/м ²	$J_{от}$, 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

В табл. 2 приводятся натурные и расчетные данные значений энергетических параметров антропогенного парникового эффекта при растущих концентрациях антропогенных парниковых газов в атмосфере до 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики. Пока росла концентрация антропогенных ПГ в атмосфере, росла мощность потенциала радиационного усиления J_R и увеличивалось нетто-поглощение парниковой тепловой энергии КС Земли.

На рис. 2 приводится зависимость интенсивности поглощения i_0 парникового тепла КС Земли от не реализованной части потенциала радиационного усиления $J_{от}$ при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики. В период с 1970 по 2030 гг. эта зависимость является линейной и описывается функцией (1).

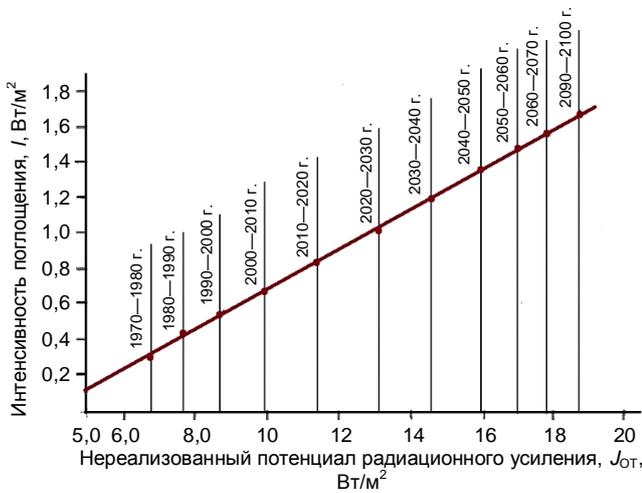


Рис. 2. Зависимость интенсивности поглощения парникового тепла от не реализованной части потенциала радиационного усиления $J_{от}$ при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики

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

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

Функции (6) и (7) поглощения парниковой тепловой энергии КС Земли получены на основании натур-

ных 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 парникового эффекта $J_R = \text{const}$ интенсивность поглощения тепловой энергии планетой будет по мере приближения к радиационно-равновесному состоянию уменьшаться до нулевых значений.

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

$$\Delta T = 0,175 \text{ град}/10 \text{ лет}$$

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

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 $\Delta T = 0,175 \text{ град}/10 \text{ лет}$ соответствует постоянное приращение собственного теплового излучения Земли как абсолютно черного тела на $\Delta J_{зп} = 0,955 \text{ Вт}/\text{м}^2$ за 10 лет.

В табл. 3 приводятся расчетные данные о средней чувствительности энергетических параметров парникового эффекта (ПЭ) к изменению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в пределах от современной 200 ppm-eq до 350 ppm-eq в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации энергетики. Например, в рассматриваемом диапазоне концентраций среднее значение "температурной чувствительности" равно $\Delta T_{\text{max}} = 0,015 \text{ град}/\text{ppm}\cdot\text{eq}$, а значение чувствительности потенциала радиационного усиления равно $\Delta J_R = 0,08 \text{ (Вт}/\text{м}^2)/\text{ppm}\cdot\text{eq}$.

Таблица 3

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

Энергетический параметр парникового эффекта, формируемого антропогенными ПГ	Среднее значение параметра в период 2020—2030 гг. ($K = 200 \text{ ppm}\cdot\text{eq}$)	Удельное приращение чувствительности параметра, $\Delta/\text{ppm}\cdot\text{eq}$
Потенциал радиационного усиления (явное тепло), J_R , $\text{Вт}/\text{м}^2$	20,8 $\text{Вт}/\text{м}^2$	+0,08 ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{ppm}\cdot\text{eq}$)
Температура максимального глобального потепления, T_{max} , $^{\circ}\text{C}$	3,7 $^{\circ}\text{C}$	+0,015 ($^{\circ}\text{C}/\text{ppm}\cdot\text{eq}$)
Интенсивность накопления тепловой энергии всей земной поверхностью, ΔQ , $\text{кВт}\cdot\text{ч}/10 \text{ лет}$	$47,2 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10 \text{ лет}$	+0,276 $\cdot 10^{15}$ ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/10 \text{ лет}\cdot\text{ppm}\cdot\text{eq}$)
Нетто-поглощение тепловой энергии Землей, i_0 , $\text{Вт}/\text{м}^2$	1,05 $\text{Вт}/\text{м}^2$	+0,006 ($\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{ppm}\cdot\text{eq}$)
Эквивалент уменьшения расстояния от Земли до Солнца за счет усиления ПЭ, ΔR , км	$114,3 \cdot 10^6 \text{ км}$	-11 $\cdot 10^3$ ($\text{км}/\text{ppm}\cdot\text{eq}$)

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 $\Delta K = 1 \text{ppm-eq}$ по обогревающему воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу на $\Delta R = 11 \cdot 10^3 \text{ км/ppm-eq}$ [5] (рис. 3).

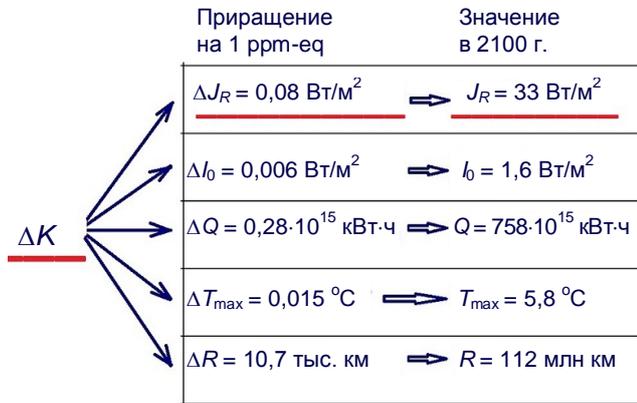


Рис. 3. Влияние роста концентрации ПГ в атмосфере на $\Delta K = 1 \text{ppm-eq}$ на мощность парникового эффекта и ряда последствий его работы в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации мировой энергетики, а также накопленные на Земле к 2100 г. значения энергетических параметров глобального потепления

В период с 2020 по 2030 г. человечеством будет выброшено в атмосферу не менее 29 ppm-eq ПГ (табл. 1). За счет выбросов в этот период мощность парникового эффекта усилится на $\Delta J_R = 2,23 \text{ Вт/м}^2$, температура максимального глобального потепления на $\Delta T_{\text{max}} = 0,435 \text{ }^\circ\text{C}$. 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 (1—8) позволяет выполнять прогнозные расчеты глобального потепления в XXI в. и его последствий для всех возможных сценариев декарбонизации мировой хозяйственной деятельности человечества. На рис. 4—6 приводятся графические результаты комплексного расчета всех энергетических составляющих ПЭ и наиболее вероятного климатического будущего цивилизации в XXI в. и за его пределами.

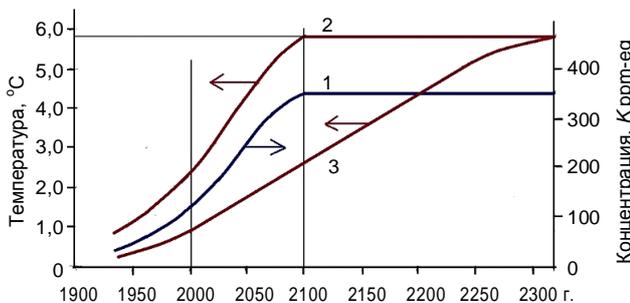


Рис. 4. Графики роста при умеренном сценарии декарбонизации энергетики:

- 1 — концентрация антропогенных ПГ в атмосфере;
2 — соответствующая максимальная температура глобального потепления; 3 — средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы

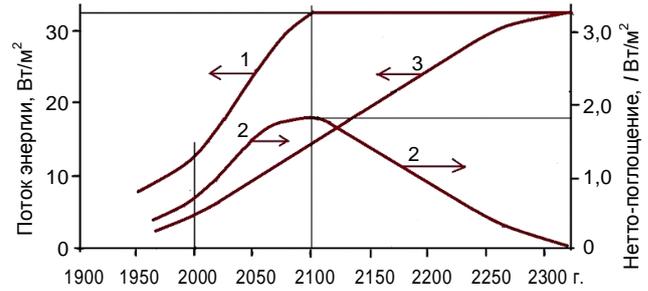


Рис. 5. Графики изменения при умеренном сценарии декарбонизации энергетики:

- 1 — потенциал радиационного усиления температуры (мощность парникового эффекта) J_R ; 2 — нетто-поглощение парниковой тепловой энергии; 3 — собственное тепловое излучение нагревающегося приземного слоя атмосферы $J_{\text{эл}}$

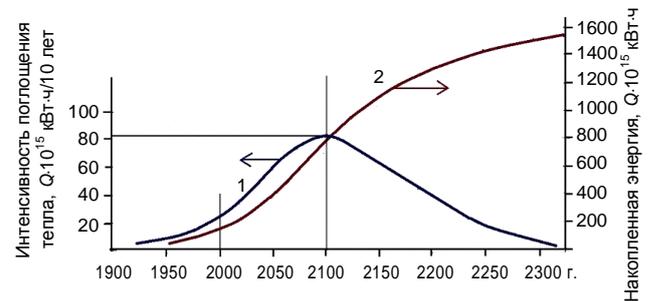


Рис. 6. Графики изменения при умеренном сценарии декарбонизации энергетики:

- 1 — интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью ΔQ ; 2 — количество накопленной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии

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 $I_0 = 1,63 \text{ Вт/м}^2$ (график 2 рис. 5), после чего будет уменьшаться до 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 $\Delta Q = 74 \cdot 10^{15} \text{ (кВт}\cdot\text{ч/10 лет)}$, 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 $720 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. За счет полученной тепловой энергии 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 $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (график 3 рис. 4) и далее до максимального значения $5,8 \text{ }^\circ\text{C}$ в 2320 г. По мере роста глобальной температуры будет расти собственное тепловое излучение Земли (график 3 рис. 5): к 2100 г. нагревающаяся Земля будет излучать собственный тепловой поток мощностью $J_{\text{эл}} = 13,8 \text{ Вт/м}^2$, а в 2320 г. её собственное излучение увеличится до значения мощности потенциала радиационного усиления $J_R = 32,5 \text{ Вт/м}^2$. В этот момент мощность парникового эффекта 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.

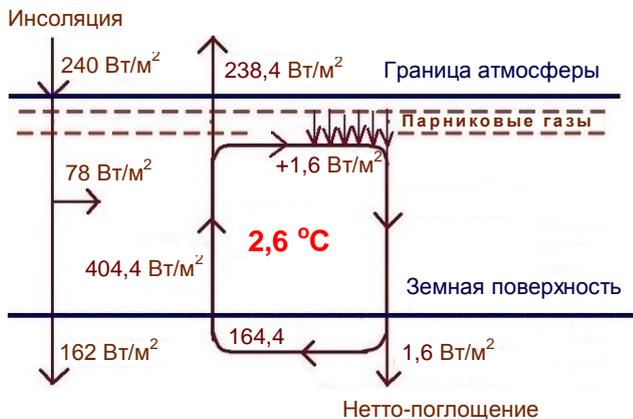


Рис. 7. Примерная схема радиационного баланса Земли в 2100 г. при содержании антропогенных ПГ в атмосфере $K = 350$ ppm-eq и соответствующей мощности парникового эффекта (потенциала радиационного усиления) $J_R = 32,5$ Вт/м²

На протяжении XXI века Земля будет нагреваться за счет парникового эффекта 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 будет возвращать в космическое пространство всего 238,4 Вт/м² тепловой 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

Парниковый эффект — это присутствующий в атмосфере в виде явного тепла поток радиации, являющийся частью теплового излучения Земли, перехваченного содержащимися в атмосфере парниковыми газами. Энергетической характеристикой парникового эффекта является "потенциал радиационного усиления" с размерностью мощности (интенсивности) теплового излучения J_R (Вт/м²). Например, в 2020 г. мощность сформированного антропогенными парниковыми газами потенциала радиационного усиления, а, следовательно, и мощность парникового эффекта составляла 18,8 Вт/м².

Уточненная концепция парникового эффекта и полученные на её основе эмпирические функции (2—8) позволяют выполнять прогнозные расчеты глобального потепления при любых сценариях декарбонизации мировой экономики. Предлагаемый способ аналитического расчета глобального потепления не имеет аналогов в мировой климатологии.

Тем самым достигается одна 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 периода предельная мощность антропогенного потенциала радиационного усиления (антропогенного парникового эффекта) определяется свободной не перехваченной мощностью 50 Вт/м² инфракрасного излучения Земли, которая в будущем может быть полностью перехвачена совокупным спектром поглощения антропогенных парниковых газов с соответствующим повышением температуры глобального потепления до максимально возможного значения около 8,9 °C.

Оптимальным для цивилизации сценарием декарбонизации энергетики в XXI в. является умеренный сценарий снижения выбросов парниковых газов 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 парниковых газов 1 ppm-eq увеличивает мощность парникового эффекта примерно на 0,08 Вт/м², температуру максимального глобального потепления на 0,015 °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 парникового эффекта) по мере роста концентрации ПГ в атмосфере будет увеличиваться в пределах от 12 до 32 Вт/м², в результате основные энергетические характеристики процесса глобального потепления к 2100 г. увеличатся до следующих значений: нетто-поглощение парниковой тепловой энергии до 1,63 Вт/м²; количество накопленной климатической системой Земли тепловой энергии до $720 \cdot 10^{15}$ кВт·ч; средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы до 2,6 °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 $K = 350$ ppm-eq глобальное потепление будет безостановочно продолжаться до достижения Землей в 2320 г. радиационно-равновесного состояния при температуре максимального глобального потепления около $T_{max} = 5,8$ °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, сообразуясь с технологическими возможностями и национальными интересами России;

– приступить к разработке и реализации долгосрочных мероприятий по адаптации населения, инфраструктуры и в целом жизненного пространства ко всё 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бринкман Э. Физические проблемы экологии. — М.: Интеллект, 2012. — 288 с.
2. Джирард 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 Пачаури Р. К. и Мейер Л. А.]. 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. 2024. № 4. С. 51—57.
6. Тетельмин В. В. Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 1. С. 45—57.
7. Тетельмин В. В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления // Энергия: экономика, техника, экология. 2023. № 3. С. 27—34.
8. Тетельмин В. В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий // Вестник РАЕН. 2023. Т. 23. № 3. 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. 2024. № 4. 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.

Refined Concept of the Greenhouse Effect and the Consequences of Global Warming in the 21st Century under the Scenario of moderate decarbonization of the global energy system

V. V. TETELMIN

Institute of Ecology of the Russian Peoples' Friendship University named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

Public Council at the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russia

A detailed scientific definition of the greenhouse effect as a physical phenomenon is given. For the first time, the concept of "radiation amplification potential" is introduced as an energy equivalent and as a synonym for 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. For the first time, forecast calculations and a complete analysis of all energy components of global warming in the 21st century and beyond have been performed for the most likely Scenario of moderate decarbonization of the global energy system.

Keywords: greenhouse effect, greenhouse effect power, radiation amplification potential, Scenario of moderate decarbonization, global warming.

Bibliography — 13 references.

Received February 12, 2025
Accepted February 25, 2025