

# Климатические ресурсы

EDN FKNNPX

УДК 551.583

## Парниковый эффект и интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии планетой Земля в XXI веке

*В. В. Тетельмин, д.т.н.*

*Институт экологии Российского университета дружбы народов  
им. Патриса Лумумбы*

Приводится ранее выведенная автором функция чувствительности глобальной радиационно-равновесной температуры земной поверхности к антропогенным выбросам парниковых газов. Определены условия постоянства темпа роста глобальной температуры в условиях глобального потепления. Дается развернутое научное определение парникового эффекта как содержащегося в атмосфере потока отраженной тепловой энергии фиксированной мощности. Вводится понятие «потенциала радиационного усиления» как энергетического эквивалента парникового эффекта, представленного в виде функции содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере. Приводятся функции зависимости интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии земной поверхностью от мощности потенциала радиационного усиления, а также от градиента температуры в приземном слое атмосферы. Выполнены прогнозные расчеты энергетических параметров глобального потепления в конце XXI в. при умеренном и консервативном сценариях декарбонизации энергетики.

*Ключевые слова:* парниковый эффект, потенциал радиационного усиления, глобальное потепление, тепловое излучение, градиент температуры, умеренный сценарий декарбонизации энергетики, радиационно-равновесная температура.

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, 2]. До 1900 г. объемные концентрации К трех ПГ в атмосфере были следующими:  $\text{CO}_2$  — 280 ppm (млн<sup>-1</sup>);  $\text{CH}_4$  — 0,7 ppm;  $\text{N}_2\text{O}$  — 0,26 ppm. Если использовать общепринятые коэффициенты конвер-

сии (GWP) для метана 28 и для закиси азота 260, то общее начальное содержание трех основных ПГ в доиндустриальной атмосфере Земли в  $\text{CO}_2$ -эквиваленте составляло 370 ppm-eq ( $2,84 \cdot 10^{12}$  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 концент-

Таблица 1

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

Период, годы	$\text{CO}_2$ , ppm	$\text{CH}_4$ , ppm-eq	$\text{N}_2\text{O}$ , 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

**Накопленные выбросы антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетические характеристики процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за климатической системой Земли**

Годы	Содержание выбросов ПГ в атмосфере, Кррт-eq	Рост содержания тепла в КС, $Q_0 \cdot 10^{15}$ Вт·ч / / 10 лет	Рост температуры атмосферы, $\Delta T$ град / / 10 лет	Нетто-поглощение, $I_0$ Вт / м <sup>2</sup>	Рост уровня Мирового океана, h мм / 10 лет	Доля тепла, остающегося в атмосфере, n %
1970–1980	82,0	14,2	0,165	0,32	20	1,7
1980–1990	101,4	19,4	0,175	0,43	20	1,34
1990–2000	121,0	24,6	0,175	0,55	20	1,05
2000–2010	141,4	31,0	0,175	0,69	30	0,84
2010–2020	168,6	38,3	0,175	0,86	40	0,68

рация антропогенных парниковых газов (АПГ) в атмосфере увеличилась до современных экстремальных значений, приведенных в *табл. 1* [3].

В *табл. 2* приводятся систематизированные натурные данные об основных энергетических характеристиках процесса глобального потепления, накопленные мировой наукой в течение последних 50 лет наблюдений. Данные об изменении содержания ПГ в атмосфере и роста глобальной температуры взяты из Доклада Всемирной метеорологической организации [4]. Данные о средних значениях приращений тепловой энергии  $Q_0$ , полученной КС Земли и её составляющими за каждый 10-летний период наблюдений, получены из материалов ОД-6 МГЭИК [2].

На *рис. 1* (см. вклейку) приводятся графики изменения объемной концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере; накопленной климатической системой Земли тепловой энергии и средней глобальной температуры земной поверхности в период с 1970 по 2020 гг. Синхронность роста и соответствие изменения этих трех параметров глобального потепления свидетельствует об антропогенном происхождении наблюдаемого глобального потепления.

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  $\lambda$  (м) — длина волны;  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $c$  — скорость света в вакууме [5]. Среднее значение солнечной энергии, достигающей верхней границы атмосферы, составляет около 1368 Вт/м<sup>2</sup>, 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/м<sup>2</sup>.

Попавшие в атмосферу молекулы антропогенных ПГ в соответствии с законами молекулярной физики поглощают часть отраженного земной поверхностью излучения в дальнем инфракрасном диапазоне электромагнитных волн ( $\lambda = 3,0–70$  мкм) и формируют спектральное физическое явление, именуемое **парниковым эффектом**. Этому спектральному физическому явлению дается много самых общих определений [1, 6]. Например, в Пятом оценочном докладе МГЭИК дается такое лаконичное определение парникового эффекта: «Инфракрасный радиационный эффект всех составляющих атмосферы, поглощающих земное инфракрасное излучение». 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».

Парниковый эффект (ПЭ) по своей энергетической сути и результатам воздействия на планету может быть количественно определен как мощность потенциала радиационного усиления (ПРУ) глобальной температуры и собственного теплового излучения земной поверхности. Этот термин удобно использовать как энергетический эквивалент парникового эффекта, который формирует процесс глобального потепления и многие другие следующие за ним события в климатической системе (КС) Земли. Энергетическое содержание потенциала радиационного усиления в составе парникового эффекта удобно выражать в единицах мощности  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>), заключенной в столбе атмосферы с основанием 1 м<sup>2</sup> [13, 14].

С учетом изложенного парниковому эффекту как физическому явлению в климатической системе (КС) Земли можно дать следующее развернутое определение. «Парниковый эффект — это поток перехваченного ПГ теплового излучения Земли, мощность которого  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>) определяет потенциал радиационного усиления глобальной температуры земной поверхности  $T_{3п}$  до значения  $T_{МАХ}$ , соответствующего радиационно-равновесному состоянию земной системы, а также определяет потенциал радиационного усиления собственного теплового излучения земной поверхности  $J_{3п}$  до значения мощности  $J_R$ ».

Антропогенные ПГ имеют свои индивидуальные спектры поглощения и одинаково охотно поглощают как полученное от Солнца преобразованное и **отраженное** Землей тепловое излучение  $J_{OT}$ , так и **собственное** тепловое излучение нагревающейся земной поверхности  $J_{ЗП}$ . Потенциал радиационного усиления парникового эффекта (ПРУ ПЭ) представляет собой сумму этих двух радиационных потоков:

$$J_R = (J_{OT} + J_{ЗП}) \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

Функция (1) отражает следующее свойство парникового эффекта: процесс глобального потепления формируется преобразованным и отраженным земной поверхностью солнечным излучением  $J_{OT} = (J_R - J_{ЗП})$  в составе потенциала радиационного усиления  $J_R$ , мощность которого постепенно расходуется на нагревание земной системы (рис. 4). В процессе работы парникового эффекта меняется структура ПРУ — насколько уменьшается доля нагревающего отраженного солнечного излучения  $J_{OT}$  настолько увеличивается доля собственного теплового излучения земной поверхности  $J_{ЗП}$ :  $\Delta J_{OT} = \Delta J_{ЗП}$ . По мере повышения глобальной температуры земной поверхности  $T_{ЗП}$  и соответствующего роста собственного теплового излучения Земли  $J_{ЗП}$  отраженное солнечное излучение  $J_{OT}$  в составе  $J_R$  будет стремиться к нулю, а собственное тепловое излучение Земли  $J_{ЗП}$  будет увеличиваться до наступления равенства  $J_{ЗП} = J_R$ .

В стационарном состоянии Земля как космическое тело отдает в виде теплового излучения в окружающее пространство столько энергии, сколько получает. Современный радиационный баланс Земли, испытывающей воздействие процесса глобального потепления со стороны антропогенных парниковых газов, описывается законом Стефана-Больцмана [3, 9], определяющего зависимость между интенсивностью перехваченного парниковыми газами излучения с единицы земной поверхности  $J_R$  и соответствующей радиационно-равновесной температурой приземного слоя атмосферы  $T_{MAX}$ :

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

где:  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>) — потенциал радиационного усиления, формируемый совокупным спектром поглощения содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  (Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) — постоянная Стефана-Больцмана; 240 Вт/м<sup>2</sup> — получаемая Землей солнечная радиация; 288 К — средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы в доиндустриальный период в градусах Кельвина;  $T_{MAX}$  °С — средняя максимальная температура глобального потепления относительно температуры доиндустриального периода 288 по шкале Кельвина (15°С), по достижении которой КС Земли приходит в радиационно-равновесное состояние; 150 (Вт/м<sup>2</sup>) — потенциал радиацион-

ного усиления, сформированный всеми ПГ, которые присутствовали в атмосфере в доиндустриальный период. Именно мощность 150 (Вт/м<sup>2</sup>) радиационного усиления увеличила среднюю глобальную температуру нашей планеты примерно на 33 градуса и поддерживала её на протяжении всего доиндустриального периода.

Потенциал радиационного усиления  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>) характеризует энергетику парникового эффекта. Потенциал радиационного усиления как энергетический эквивалент парникового эффекта присутствует в атмосфере в виде явного тепла, которое постепенно повышает среднюю глобальную температуру приземного слоя атмосферы (земной поверхности), нагревает воды Мирового океана, плавит материковые и морские льды и др.

Входящая в (2) радиационно-равновесная температура глобального потепления, определяющая результативность работы антропогенного парникового эффекта, определяется предложенной ранее «функцией чувствительности» земной системы к антропогенным выбросам парниковых газов [10, 11]:

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

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

Функция (3) является подтвержденным аналитическим решением вековой задачи Аррениуса [10] о чувствительности земной системы к антропогенным выбросам парниковых газов. На рис. 2 (см. вклейку) приводятся графики зависимости глобальной радиационно-равновесной температуры  $T_{MAX}$  и потенциала радиационного усиления  $J_R$  от объемной концентрации К антропогенных ПГ в атмосфере. Присутствующий в атмосфере потенциал радиационного усиления  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>), является основным фактором, определяющим количественную характеристику антропогенного парникового эффекта как физического явления (рис. 2а).

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  $T_{MAX}$  до значения, соответствующего радиационно-равновесному состоянию КС Земли. Из функции (3) следует, что при концентрации К = 850 ppm-eq наступит парниковое насыщение земной атмосферы, при которой температура глобального потепления достигнет значения  $T_{MAX} = 8,7^\circ\text{C}$  (рис. 2б). Таким образом, в современных условиях межледникового периода «нагревательное действие» поглощения мощности 50 Вт/м<sup>2</sup> ограничивается предельной температурой глобального потепления  $T_{MAX} = 8,7^\circ\text{C}$ .

Точка 1 рис. 2 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  $T_{\text{MAX}}$  при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере  $K = 350 \text{ ppm-eq}$ , 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  $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ\text{C}$  и максимально возможному проявлению антропогенного парникового эффекта на Земле.

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

В период 1970–1980 гг. при концентрации антропогенных ПГ  $K = 80 \text{ ppm-eq}$  стал наблюдаться рост средней глобальной температуры с постоянным темпом  $\Delta T_{\text{ЗП}} = 0,175 \text{ град/10 лет}$  (см. рис. 1). В этот момент состояние КС Земли характеризовалось примерно следующими показателями: средняя глобальная температура земной поверхности  $T_{\text{ЗП}} = 0,4^\circ\text{C}$ ; соответствующая концентрации  $K$  радиационно-равновесная температура  $T_{\text{MAX}} = 1,6^\circ\text{C}$ ; градиент температуры в приземном слое атмосферы  $\text{grad}T = (T_{\text{MAX}} - T_{\text{ЗП}}) = 1,2^\circ\text{C}$ ; нетто-поглощение тепловой энергии КС Земли  $I_0 = 0,38 \text{ Вт/м}^2$ ; интенсивность поглощения тепловой энергии всей земной поверхностью  $\Delta Q = 17 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч/10 лет}$ ; потенциал радиационного усиления  $J_R = 8,82 \text{ Вт/м}^2$ ; перехваченное антропогенными ПГ собственное тепловое излучение Земли как абсолютно черного тела  $J_{\text{ЗП}} = 2,07 \text{ Вт/м}^2$ ; перехваченная антропогенными ПГ отраженная Землей солнечная радиация  $J_{\text{ОТ}} = 6,75 \text{ Вт/м}^2$  (табл. 3).

Наблюдаемое условие постоянства темпа роста средней глобальной температуры земной поверхности в широком диапазоне изменяющихся параметров глобального потепления можно записать следующим образом [12]:

$$\Delta T_{\text{ЗП}} = 0,175 \text{ град/10 лет} = \text{const} \quad (4)$$

при  $\Delta Q \geq 17 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч/10 лет}$ ;  $J_{\text{ОТ}} \geq 7 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\text{grad}T \geq 1,2^\circ\text{C}$ .

Таким образом, во всех случаях, когда процессы теплообмена в КС Земли характеризуются от-

носительно большими параметрами:  $\Delta Q \geq 17 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч/10 лет}$ ;  $J_{\text{ОТ}} \geq 7 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\text{grad}T \geq 1,2^\circ\text{C}$ ;  $I_0 \geq 0,4 \text{ Вт/м}^2$ , средняя текущая глобальная температура приземного слоя атмосферы (земной поверхности) будет прирастать с темпом не выше  $\Delta T_{\text{ЗП}} = 0,18 \text{ град/10 лет}$ . Этой температуре соответствует постоянный темп накопления тепла атмосферой  $\Delta Q_{\text{АТ}} = 0,26 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч/10 лет}$ . Это предельное значение темпа нагревания атмосферы регулируется повышением испарения вод Мирового океана и соответствующим повышением глобального альбедо за счет формирования облачности, а также усиливающимся таянием материковых и морских льдов. Из уравнения Стефана-Больцмана (2) следует, что каждому приращению глобальной температуры  $\Delta T_{\text{ЗП}} = 0,175 \text{ град/10 лет}$  соответствует постоянное приращение собственного теплового излучения Земли  $\Delta J_{\text{ЗП}} = 0,96 \text{ Вт/м}^2$  за 10 лет.

Из графиков рис. 2б и 2а следует, что в интервале увеличивающихся концентраций антропогенных ПГ от  $190 \text{ ppm-eq}$  до  $400 \text{ ppm-eq}$  глобальная радиационно-равновесная температура  $T_{\text{MAX}}$  и мощность  $J_R$  потенциала радиационного усиления парникового эффекта (ПРУ ПЭ) увеличиваются по линейному закону:

$$T_{\text{MAX}} = 13 \cdot 10^{-3} \cdot K + 1,1 \text{ (}^\circ\text{C)}, \quad (5)$$

$$J_R = 8,3 \cdot 10^{-2} \cdot K + 3,8 \text{ (Вт/м}^2). \quad (6)$$

Эти функции через потенциал радиационного усиления примерно определяют энергетику парникового эффекта, который будет работать на потепление при наиболее вероятных сценариях антропогенных выбросов ПГ на протяжении всего XXI века.

В табл. 3 приводятся натурные данные значений энергетических параметров антропогенного парникового эффекта при растущих концентрациях антропогенных парниковых газов в атмосфере в период с 1970 по 2030 гг.

В работе [7] предложена следующая функция зависимости среднего значения интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии единицей площади земной поверхности (нетто-поглощение)  $I_0$  от солнечной составляющей  $J_{\text{ОТ}} = (J_R - J_{\text{ЗП}})$  потенциала радиационного усиления:

$$I_0 = 0,11(J_R - J_{\text{ЗП}} - 3,5) \text{ Вт/м}^2, \quad (7)$$

где: разность  $(J_R - J_{\text{ЗП}})$  представляет собой солнечную активную часть мощности потенциала радиационного усиления (1), сформированную отраженным тепловым излучением Земли. Функция (7) справедлива при условии  $J_{\text{ОТ}} \geq 7 \text{ Вт/м}^2$ .

В условиях глобального потепления состояние КС Земли характеризуется двумя значениями температуры: текущим значением температуры  $T_{\text{ЗП}}$  и значением радиационно-равновесной температуры  $T_{\text{MAX}}$  (3). Например, в 2020 г. при  $K = 182 \text{ ppm-eq}$  состояние КС Земли характеризовалось следующими двумя значениями температуры: текущим значением температуры приземного слоя

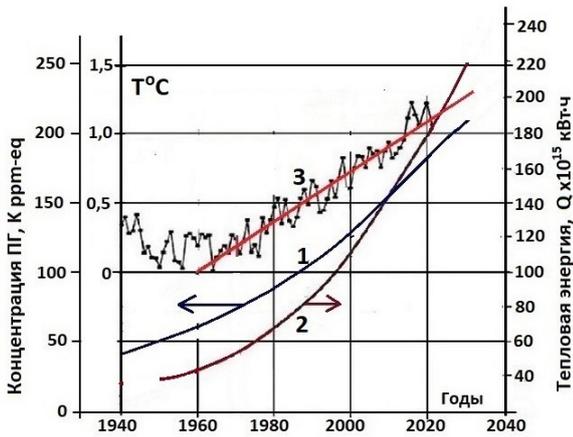


Рис. 1. Графики изменения трех основных параметров глобального потепления в период с 1970 по 2020 гг.: 1 – концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере; 2 – накопленной земной системой тепловой энергии; 3 – средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы (земной поверхности)

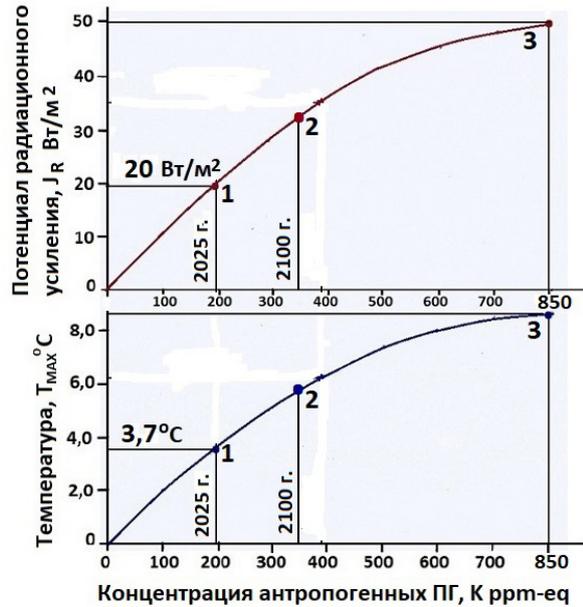


Рис. 2. Графики зависимости потенциала радиационного усиления  $J_R$  (а) и максимальной температуры глобального потепления  $T_{MAX}$  (б) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере

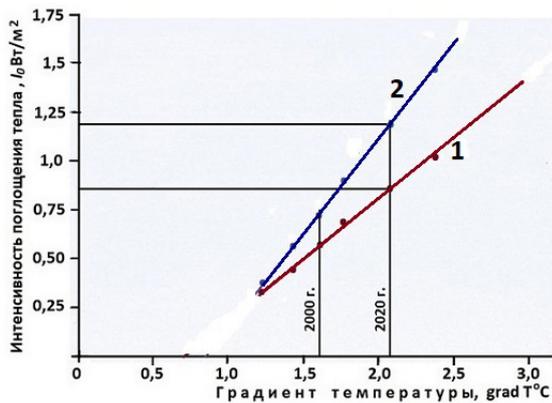
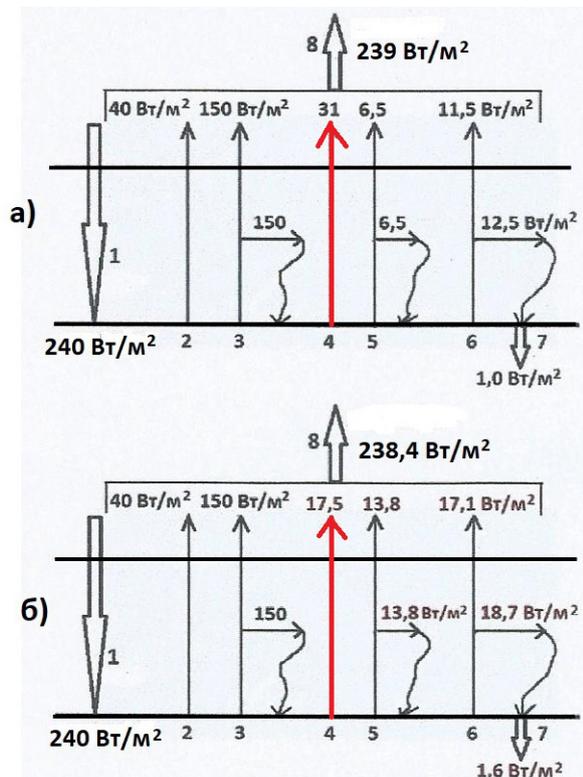


Рис. 3. Графики зависимости интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии от градиента температуры  $grad T = (T_{MAX} - T_{ЗП})$  в приземном слое атмосферы: 1 – поглощение всей площадью земной поверхности; 2 – поглощение только поверхностью Мирового океана

Рис. 4. Две схемы радиационного баланса Земли в условиях работы парникового эффекта: а) – в 2025 г. при содержании в атмосфере 190 ppm-eq антропогенных ПГ; б) – в 2100 г. при содержании в атмосфере 350 ppm-eq антропогенных ПГ: 1 – получаемая солнечная энергия; 2 – уходящее тепловое излучение через «окно прозрачности» атмосферы; 3 – мощность теплового излучения, перехваченная ПГ в доиндустриальный период; 4 – тепловое излучение не перехваченное антропогенными ПГ; 5 – собственное тепловое излучение Земли; 6 – преобразованное земной поверхностью и перехваченное антропогенными ПГ солнечное излучение; 7 – среднее значение нетто-поглощения тепловой энергии земной поверхностью; 8 – уходящее в космическое пространство тепловое излучение Земли



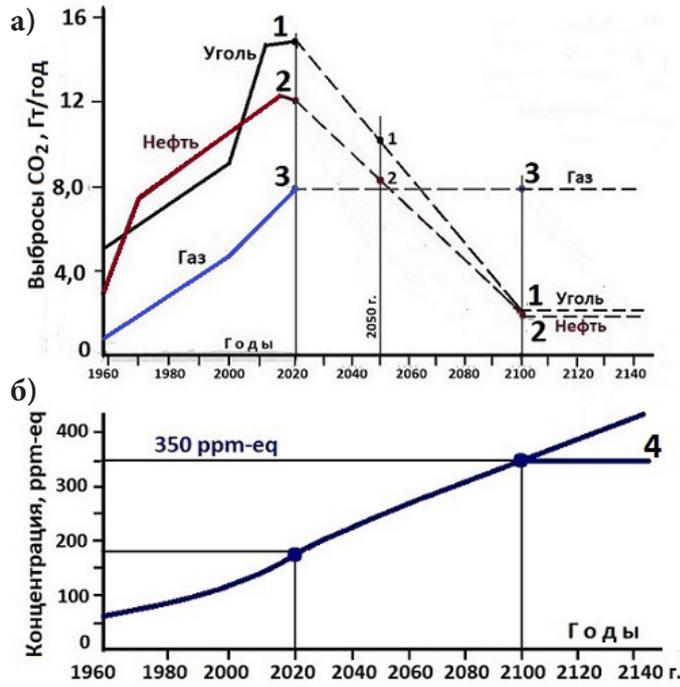


Рис. 5. Графики: а) – реальный рост выбросов CO<sub>2</sub> от сжигания угля 1, нефти 2 и газа 3 до 2020 г. и снижение выбросов за счет частичного отказа от ископаемого топлива при умеренном сценарии декарбонизации энергетики; б) – соответствующее изменение концентрации антропогенных парниковых газов до 2100 г.; 4 – предполагаемая стабилизация концентрации на уровне 350 ppm-eq

Рис. 6. Графики роста основных параметров глобального потепления в XXI веке при двух возможных сценариях декарбонизации: 1 – умеренный сценарий снижения выбросов при накоплении к 2100 г. концентрации антропогенных ПГ в атмосфере 350 ppm-eq; 2 – консервативный сценарий при не снижающихся выбросах ПГ 29 ppm-eq/10 лет и накоплении к 2100 г. концентрации ПГ в атмосфере 420 ppm-e

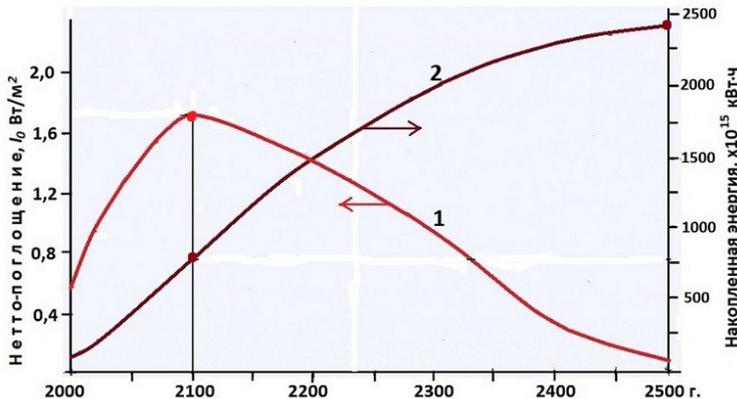
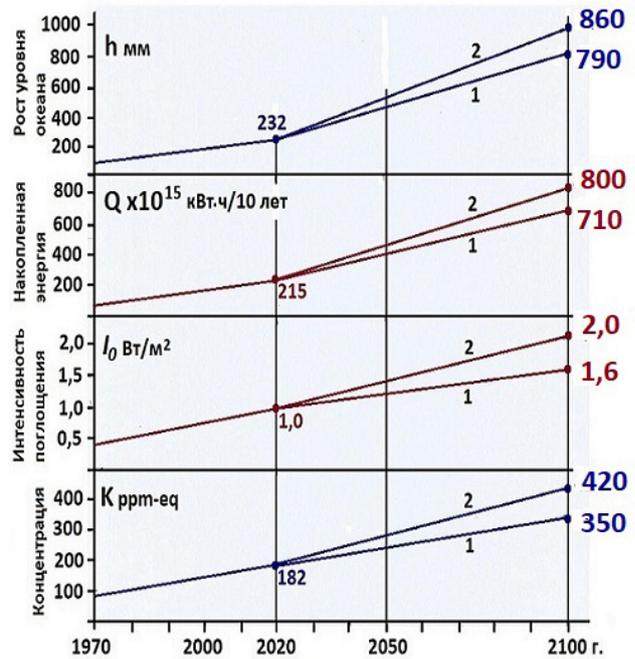


Рис. 7. Графики изменения: 1 – нетто-поглощения парниковой тепловой энергии земной поверхностью; 2 – накопления тепловой энергии планетой Земля при умеренном сценарии декарбонизации энергетики до 2100 г. с последующими выбросами антропогенных ПГ с постоянным темпом 13 ppm-eq/10 лет

**Средние значения энергетических параметров антропогенного парникового эффекта при реальном росте концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере до 2030 г.**

Годы	$K$ , ppm-eq	$I_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\Delta Qx10^{15}$ кВт·ч/10лет	$T_{MAX}$ , °C	$T_{зп}$ , °C	$J_R$ , Вт/м <sup>2</sup>	$J_{от}$ , Вт/м <sup>2</sup>
1970–1980	80	0,31	14,0	1,6	0,425	8,82	6,75
1980–1990	101	0,44	19,8	1,99	0,588	10,97	7,68
1990–2000	121	0,56	25,2	2,35	0,762	13,0	8,79
2000–2010	141	0,68	30,6	2,71	0,938	14,97	9,77
2010–2020	168	0,85	38,3	3,17	1,102	17,54	11,47
2020–2030	197	1,02	45,9	3,64	1,265	20,18	13,23

Обозначения в табл. 3 имеют следующие значения:

$K$  ppm-eq — среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в CO<sub>2</sub>-эквиваленте в расчетном 10-лети;

$I_0$  Вт/м<sup>2</sup> — интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии (нетто-поглощение) единицей площади земной поверхности;

$T_{зп}$  °C — текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы;

$T_{MAX}$  °C — температура максимального глобального потепления;

$J_R$  Вт/м<sup>2</sup> — потенциал радиационного усиления, сформированный антропогенными ПГ;

$J_{от}$  Вт/м<sup>2</sup> — нереализованная часть потенциала радиационного усиления;

$\Delta Qx10^{15}$  кВт·ч/10лет — интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии всей площадью земной поверхности.

атмосферы  $T_{зп} = 1,2^\circ\text{C}$  и значением радиационно-равновесной температуры  $T_{MAX} = 3,4^\circ\text{C}$ . В процессе глобального потепления температура  $T_{зп}$  медленно растет и стремится приблизиться к изменяющейся температуре  $T_{MAX}$ . Разность этих температур формирует в приземном слое атмосферы градиент температуры:  $\text{grad}T = (T_{MAX} - T_{зп})$ , который определяет интенсивность теплообмена между энергией парникового эффекта и земной поверхностью.

Нетто-поглощение тепловой энергии земной поверхностью как важнейший термодинамический параметр глобального потепления кроме функции (7) можно определять также через градиент температуры в приземном слое атмосферы. На рис. 3 (см. Вклейку) приводятся построенные по натурным данным графики зависимости интенсивности удельного поглощения  $I_0$  парникового тепла от градиента температуры  $\text{grad}T = (T_{MAX} - T_{зп})$ , сформированного в приземном слое атмосферы парниковым эффектом. График 1 отражает рост среднего значения нетто-поглощения тепловой энергии всей площадью 510 млн км<sup>2</sup> земной поверхности. Этот график имеет вид прямой линии и при условии  $\text{grad}T = (T_{MAX} - T_{зп}) \geq 1,2^\circ\text{C}$  описывается следующей функцией:

$$I_0 = 0,63(T_{MAX} - T_{зп} - 0,68) \text{ Вт/м}^2. \quad (8)$$

Подстановка в (7) и (8) известных в 2020 г. соответствующих значений параметров  $J_R$  и  $J_{зп}$ , а также  $T_{MAX}$  и  $T_{зп}$  дает примерно совпадающие значения нетто-поглощения парниковой тепловой энергии земной поверхностью  $I_0 = 0,95 \text{ Вт/м}^2$ . Порядок этой цифры совпадает с соответствующим показателем, приведенным в [13].

Функции (7) и (8) нетто-поглощения парниковой тепловой энергии получены на основании накопленных мировой наукой в период 1970–2020 гг. натурных данных, поэтому косвенно учи-

тывают все виды радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану, суше и атмосфере [12, 14]. Эти функции позволяют выполнять прогнозные расчеты глобального потепления в пределах их обозначенной применимости.

Интенсивность поглощения парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью площадью 510 млн км<sup>2</sup> определяется при известном нетто-поглощении (8) следующей функцией:

$$\Delta Q = 45 \cdot 10^{15} \cdot I_0 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10 \text{ лет}. \quad (9)$$

График 2 рис. 3 отражает рост среднего значения нетто-поглощения тепловой энергии поверхностью Мирового океана площадью 361 млн км<sup>2</sup>. Этот график имеет вид прямой линии и описывается следующей функцией:

$$I_{OMO} = 0,88(T_{MAX} - T_{зп} - 0,76) \text{ Вт/м}^2. \quad (10)$$

Из функций (7) и (10) следует, что в 2020 г. нетто-поглощение парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью составляло  $I_0 = 0,95 \text{ Вт/м}^2$ , а поверхностью Мирового океана  $I_{OMO} = 1,27 \text{ Вт/м}^2$ . Нетто-поглощение парниковой тепловой энергии поверхностью Мирового океана  $I_{OMO}$  примерно на 30% превышает среднее значение нетто-поглощения  $I_0$  всей земной поверхностью.

На рис. 4 (см. Вклейку) с использованием данных табл. 4 приводятся две расчетные схемы составляющих радиационного баланса Земли в 2025 г. и в 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации глобальной энергетики (рис. 5, см. вклейку). В 2025 г. содержащиеся в атмосфере 190 ppm-eq антропогенных ПГ сформировали потенциал радиационного усиления парникового эффекта (ПРУ ПЭ) мощностью  $J_R = 19 \text{ Вт/м}^2$ . Видим, что в современный период в условиях активной работы парникового эффекта нагревающаяся

**Энергетические параметры глобального потепления для двух моментов времени при умеренном сценарии декарбонизации (рис. 5) мировой энергетики**

Годы	$K$ , ppm-eq	$T_{MAX}$ , °C	$J_{R^*}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$T_{3П}$ , °C	$J_{3П}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$I_{\sigma}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\Delta Q \times 10^{15}$ кВт·ч / 10 лет
2025	190	3,5	19	1,2	6,5	1,0	45
2100	350	5,8	32,2	2,6	14,4	1,6	72

Земля возвращает в Космос примерно на  $I_0 = 1$  Вт/м<sup>2</sup> меньше тепловой энергии, чем получает, а в 2100 г. Земля будет возвращать на 1,6 Вт/м<sup>2</sup> меньше тепловой энергии, чем будет получать.

Процесс глобального потепления определяется изменяющимся во времени содержанием парниковых газов в атмосфере  $K(t)$ , рост которого зависит от реализуемой человечеством стратегии декарбонизации энергетики. Из условия (4) составляется уравнение минимального значения градиента температуры, при котором перестает работать условие роста приземной температуры с постоянным темпом  $\Delta T = 0,175^\circ\text{C}/10$  лет:

$$\text{grad}T = [T_{MAX}(t) - T_{3П}(t)] = 1,2^\circ\text{C}. \quad (11)$$

При известных значениях концентрации  $K(t)$  с помощью функции чувствительности (3) можно построить график изменения во времени радиационно-равновесной температуры  $T_{MAX}(t)$ , а с использованием условия (4) можно построить график изменения во времени приземной температуры  $T_{3П}(t)$ . Уравнение (11) с одним неизвестным позволяет определять продолжительность роста средней глобальной температуры земной поверхности  $T_{3П}$  с максимальным темпом  $\Delta T = 0,175^\circ\text{C}/10$  лет. Например, если в 2100 г. будет обеспечена гипотетическая углеродная нейтральность при  $K = 350$  ppm-eq ( $T_{MAX} = 5,8^\circ\text{C}$ ;  $T_{3П} = 2,6^\circ\text{C}$ ), то в соответствии с (11) текущая температура земной поверхности поднимется до значения  $T_{3П}(t) = 4,6^\circ\text{C}$ . После 2100 г. температура  $T_{3П}$  поднимется на величину  $(4,6 - 2,6) = 2^\circ\text{C}$  с темпом  $\Delta T = 0,175^\circ\text{C}/10$  лет. Откуда находим, что на это потребуется примерно  $t_1 = 110$  лет. Таким образом, в 2210 г. температура глобального потепления составит примерно  $4,6^\circ\text{C}$ . После 2210 г. процесс потепления до достижения радиационно-равновесного состояния КС Земли на оставшиеся  $1,2^\circ\text{C}$  пойдет в более медленном темпе.

Снижение выбросов ПГ необходимо не только ради смягчения далеких последствий изменения климата, но и для подготовки человечества к грядущему, достаточно скорому исчерпанию месторождений ископаемого топлива. Намеченный глобальный энергопереход — это масштабное социально-технологическое явление, которое затронет каждого жителя Земли. При этом все виды возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в совокупности не смогут в полном объеме заместить выпадающее производство современной топливной энергетики. Человечество начинает понимать, что политика быстрой декарбонизации по-

рождает дефицит энергии и несовместима с устойчивым развитием. Многие страны снимают ранее введенные запреты на разведку месторождений углеводородов. Сроки достижения целей ПС по достижению углеродной нейтральности уже отодвигаются до 2060 г. Можно с уверенностью сказать, что в дальнейшем количественные цели Парижского соглашения ввиду их нереальности будут неоднократно пересматриваться, потому что сконцентрированная в ископаемом топливе солнечная энергия будет долгие годы составлять основу мировой энергетики.

С этой точки зрения оптимальным и приемлемым для человечества является умеренный сценарий декарбонизации энергетики: снижение до 2100 г. выбросов  $\text{CO}_2$  с 15 до 2 Гт/год за счет сокращения использования угля; снижение выбросов  $\text{CO}_2$  с 12 до 2 Гт/год за счет сокращения использования нефти (см. рис. 5). При этом природный газ как наиболее экологичное топливо будет в дальнейшем использоваться не ниже современного уровня около 4 млрд м<sup>3</sup>/год с выбросом массы диоксида углерода около 8 Гт/год. В таком случае выбросы  $\text{CO}_2$  в энергетике уменьшатся к 2100 г. почти на 66%, а производство энергии за счет ископаемого топлива (ИТ) соответственно снизится с современного уровня 140 ПВт·ч до 55 ПВт·ч/год. При этом выпадающее производство тепловой энергии в объеме 85 ПВт·ч/год полностью заместить ВИЭ-генерацией (СЭС, ВЭС и ГЭС) не удастся по многим видам экологических ограничений. После проведения декарбонизации по умеренному сценарию общее производство энергии к 2100 г. может снизиться примерно на 20% до 135 ПВт·ч/год. Из этого количества будет примерно приходится: на АЭС около 20 ПВт·ч/год; на СЭС 20 ПВт·ч/год; на ВЭС 20 ПВт·ч/год; на ГЭС 8 ПВт·ч/год; на биоэнергетику 10 ПВт·ч/год.

В результате декарбонизации топливной энергетики с равномерным темпом снижения выбросов на  $\Delta K = 2$  ppm-eq/10 лет выбросы в атмосферу ПГ снизятся к концу текущего столетия с современного уровня 29 ppm-eq/10 лет до 13 ppm-eq/10 лет. В атмосфере к 2100 г. накопится около 350 ppm-eq антропогенных ПГ, а средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы поднимется до  $2,6^\circ\text{C}$ . В 2100 г. структура антропогенных выбросов ПГ будет примерно следующей: ископаемое топливо — 7 ppm-eq/10 лет; ВИЭ — 2,6 ppm-eq/10 лет; жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) и землепользование около 3,4 ppm-eq/10 лет. Из (7) и (8) следует, что в 2100 г. среднее значение нетто-погло-

щения парниковой тепловой энергии всей земной поверхностью составит около  $I_0 = 1,6 \text{ Вт/м}^2$ . Из (10) следует, что значение нетто-поглощения тепловой энергии Мировым океаном составит около  $I_0 = 2,1 \text{ Вт/м}^2$ . Климатическая судьба цивилизации после 2100 г. будет зависеть от реализуемой мировым сообществом интенсивности дальнейших выбросов антропогенных ПГ. Можно предположить, то после 2100 г. человечество разработает необходимые технологии, сумеет нейтрализовать текущие антропогенные выбросы и тем самым стабилизировать концентрацию парниковых газов в атмосфере на постоянном уровне 350 ppm-eq (рис. 5 точка 4).

Приведенный ряд эмпирических функций позволяет выполнять прогнозные расчеты процесса глобального потепления в XXI веке для всех возможных сценариев декарбонизации мировой хозяйственной деятельности человечества. Рассмотрим некоторые энергетические параметры, которые получит КС Земли в 2100 г. в условиях работы парникового эффекта при двух возможных сценариях декарбонизации энергетики: для умеренного сценария и для консервативного сценария, при котором антропогенные выбросы не снижаются, оставаясь на современном уровне 29 ppm-eq/10 лет (см. табл. 1).

В табл. 5 и на рис. 6 (см. Вклейку) приводятся расчетные данные об энергетических параметрах, которые получит КС Земли в 2100 г. при умеренном и консервативном сценариях декарбонизации, а также чувствительность КС Земли к антропогенным выбросам ПГ в XXI веке. Например, в XXI веке среднее значение «температурной чувствительности» равно  $\Delta T_{\text{MAX}} = 0,014 \text{ град/ppm-eq}$ , а значение чувствительности потенциала радиационного усиления  $J_R$  равно  $= 0,08 \text{ (Вт/м}^2\text{)/ppm-eq}$ . Увеличение мощности парникового эффекта от роста выбросов ПГ можно представить в виде эквивалента уменьшения расстояния от Земли до Солнца (табл. 5). Увеличение концентрации ПГ в атмосфере на  $\Delta K = 1 \text{ ppm-eq}$  формирует парниковый эффект, который по обогревающему воздействию на планету эквивалентен приближению Земли к Солнцу на  $\Delta R = 10,7 \cdot 10^3 \text{ км/ppm-eq}$ .

При умеренном сценарии декарбонизации к 2100 г. в атмосфере накопится  $K = 350 \text{ ppm-eq}$  антропогенных ПГ, которые сформируют потенциал радиационного усиления парникового эффекта  $J_R = 32,2 \text{ Вт/м}^2$ , при этом нетто-поглощение парниковой тепловой энергии будет увеличиваться до значения  $I_0 = 1,6 \text{ Вт/м}^2$ . В обоих сценариях в 2100 г. нагревательный потенциал накопленных ПГ не будет до конца израсходован. Если предположить, что человечеству удастся после 2100 г. обеспечить углеродную нейтральность своей деятельности, то при  $K = 350 \text{ ppm-eq} = \text{const}$  глобальная температура будет повышаться ещё на  $3,2^\circ\text{C}$  до  $5,8^\circ\text{C}$  в течение примерно 200 лет. При  $K = 420 \text{ ppm-eq} = \text{const}$  процесс глобального потепления будет продолжаться после 2100 г. ещё 250 лет до повышения глобальной температуры до радиационно-равновесного значения  $T_{\text{MAX}} = 6,6^\circ\text{C}$  (см. табл. 4).

При умеренном сценарии парниковый эффект обеспечит к 2100 г. накопление в Мировом океане, суше и атмосфере тепловой энергии в количестве около  $710 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . За счет теплового расширения воды и таяния материковых льдов уровень Мирового океана к 2100 г. поднимется примерно на 790 мм. По мере роста глобальной температуры будет расти собственное тепловое излучение Земли: в 2100 г. нагревающаяся Земля будет излучать собственный тепловой поток мощностью  $J_{\text{ЗП}} = 13,8 \text{ Вт/м}^2$ .

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  $1,60 \text{ Вт/м}^2$ , а планета Земля в этом году будет возвращать в космическое пространство всего  $238,4 \text{ Вт/м}^2$  тепловой энергии из получаемой от Солнца  $240 \text{ Вт/м}^2$  лучистой энергии.

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 Зем-

Таблица 5

**Некоторые энергетические параметры ПЭ в конце XXI в. при умеренном и консервативном сценариях декарбонизации, а также чувствительность КС Земли к антропогенным выбросам ПГ в XXI в.**

Параметр ПЭ	2020 г.	2100 г.		Чувствительность параметра (ppm-eq) <sup>-1</sup>
		умерен.	консерв.	
Концентрация К, ppm-eq	182	350	420	-
Мощность ПЭ $J_R$ , Вт/м <sup>2</sup>	18,7	32,2	36,0	0,08 Вт/м <sup>2</sup> ·ppm-eq
Температура $T_{\text{MAX}}$ , °C	3,4	5,8	6,6	0,014 °C/ppm-eq
Температура $T_{\text{ЗП}}$ , °C	1,2	2,6	2,6	-
Градиент gradT, °C	2,2	3,2	4,0	0,006 °C/ppm-eq
Интенсивность $I_0$ , Вт/м <sup>2</sup>	0,95	1,6	2,1	0,0038 Вт/м <sup>2</sup> ·ppm-eq
Интенсивность $I_{\text{МО}}$ , Вт/м <sup>2</sup>	1,27	2,15	2,85	0,0052 Вт/м <sup>2</sup> ·ppm-eq
Рост уровня МО, мм	232	860	940	3,8 мм/ppm-eq
Эквивалент снижения расстояния от Земли до Солнца R, тыс. км	0	1800	2500	10,7 тыс. км/ppm-eq

лей в 2320 г. радиационно-равновесного состояния при температуре максимального глобального потепления около  $T_{\max} = 5,8^{\circ}\text{C}$  [8].

Выше отмечено, что в результате умеренной декарбонизации топливной энергетики выбросы в атмосферу ПГ снизятся к 2100 г. с современного уровня 29 ppm-eq/10 лет до 13 ppm-eq/10 лет (см. рис. 5). При этом сценарии в атмосфере к концу века накопится около 350 ppm-eq антропогенных ПГ, а средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы поднимется до  $2,6^{\circ}\text{C}$ . Вполне вероятно, что после 2100 г. человечество не сумеет обеспечить углеродную нейтральность мировой экономики и в дальнейшем будет выбрасывать в атмосферу парниковые газы с минимально достижимым уровнем интенсивности 13 ppm-eq/10 лет. В таком случае концентрация антропогенных ПГ в атмосфере будет расти в соответствии с линейной функцией:

$$K(t) = (350 + 13t) \text{ ppm-eq}, \quad (12)$$

где:  $t$  — время, исчисляемое количеством 10-летних расчетных периодов, начиная с 2100 г.

В таком случае из (3) и (4) получаем функцию изменения во времени градиента температуры:

$$\text{grad}T = (3,21 - 15 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,08 \cdot 10^{-3} \cdot t^2). \quad (13)$$

Из (8) получаем функцию изменения во времени после 2100 г. интенсивности поглощения (нетто-поглощения) парниковой тепловой энергии земной поверхностью:

$$I_0 = (1,6 - 9,45 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot t^2) \text{ Вт/м}^2. \quad (14)$$

На рис. 7 (см. вклейку) приводятся рассчитанные с помощью функции (14) графики изменения нетто-поглощения тепловой энергии земной поверхностью 1 и накопления парниковой тепловой энергии 2 планетой Земля при умеренном сценарии декарбонизации энергетики с выбросами антропогенных ПГ после 2100 г. с постоянным темпом 13 ppm-eq/10 лет.

Подставляя в (13) критическое значение градиента температуры  $\text{grad}T = 1,2^{\circ}\text{C}$  (4), находим уравнение продолжительности роста средней глобальной температуры с постоянным темпом  $\Delta T = 0,175^{\circ}\text{C}/10$  лет:

$$(2,01 - 15 \cdot 10^{-3} \cdot t - 2,08 \cdot 10^{-3} \cdot t^2) = 0. \quad (15)$$

Из (15) получаем время  $t = 28$  десятилетних периодов, в течение которого глобальная температура земной поверхности  $T_{\text{зп}}$  будет расти с темпом  $0,175^{\circ}\text{C}/10$  лет. В результате к 2380 г. средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы (земной поверхности) увеличится до значения  $T_{\text{зп}} = 7,5^{\circ}\text{C}$ , концентрация антропогенных ПГ в атмосфере увеличится до значения  $K = 714$  ppm-eq.

После 2380 г. процесс потепления до достижения радиационно-равновесного состояния КС Зем-

ли на оставшиеся до предела потепления  $1,2^{\circ}\text{C}$  пойдет в более медленном темпе  $\Delta T = 0,06^{\circ}\text{C}/10$  лет. Состояние «парникового насыщения» атмосферы при  $K = 850$  ppm-eq будет достигнуто в 2500 г., а состояние радиационного равновесия в системе «Земля—Космос» и соответствующая предельная температура глобального потепления  $T_{\max} = 8,7^{\circ}\text{C}$  будут достигнуты примерно в 2630 г. К этому моменту КС Земли аккумулирует около  $2,4 \cdot 10^{18}$  кВт·ч парниковой тепловой энергии, а уровень Мирового океана поднимется примерно до 4,0 м относительно уровня 1900 г.

### Выводы

Приведенная функция (3) чувствительности глобальной радиационно-равновесной температуры приземного слоя атмосферы (земной поверхности) к антропогенным выбросам парниковых газов исключает неопределенность оценок, что делает более достоверными и полезными при дальнейшем использовании прогнозные расчеты параметров климатического будущего цивилизации.

В современных условиях межледникового периода предельная мощность антропогенного потенциала радиационного усиления определяется свободной не перехваченной мощностью 50 Вт/м<sup>2</sup> инфракрасного излучения Земли, которая в будущем может быть полностью перехвачена совокупным спектром поглощения антропогенных парниковых газов с соответствующим повышением температуры глобального потепления до значения около  $8,7^{\circ}\text{C}$ . Эта температура совпадает с экстремальным значением функции чувствительности (3), что является подтверждением справедливости этой функции.

Обозначенную в действующей «ФНТП в области экологического развития РФ и климатических изменений на 2021—2030 гг.» задачу по снижению неопределенности оценок чувствительности земной системы к выбросам парниковых газов можно считать решенной.

Вся свободная мощность 50 Вт/м<sup>2</sup> отражаемого земной поверхностью солнечного излучения может быть перехвачена концентрацией парниковых газов в атмосфере около 850 ppm-eq, в результате чего глобальная радиационно-равновесная температура увеличится примерно на  $8,7^{\circ}\text{C}$ .

Дается развернутое научное определение парникового эффекта, как присутствующего в атмосфере в виде явного тепла потока теплового излучения Земли определенной мощности, перехваченного содержащимися в атмосфере парниковыми газами.

Энергетическим эквивалентом парникового эффекта является «потенциал радиационного усиления» с размерностью единичной мощности (интенсивности) теплового излучения  $J_R$  (Вт/м<sup>2</sup>). Величина потенциала радиационного усиления

определяется из уравнения Стефана-Больцмана с использованием функции чувствительности (3).

В процессе работы потенциал радиационного усиления  $J_R$  парникового эффекта является суммой двух радиационных потоков: собственного теплового излучения Земли  $J_{ЗП}$  и части отраженного земной поверхностью  $J_{ОТ}$  солнечного излучения. На нагревание планеты Земля расходует активную мощность солнечной составляющей  $J_{ОТ}$  парникового эффекта. В процессе глобального потепления мощность солнечной составляющей в составе парникового эффекта постепенно замещается мощностью собственного теплового излучения  $J_{ЗП}$  земной поверхности.

Уточненная концепция парникового эффекта и полученные на её основе эмпирические функции интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии земной поверхностью и Мировым океаном позволяют выполнять прогнозные расчеты глобального потепления при любых возможных сценариях декарбонизации мировой экономики.

Оптимальным для цивилизации сценарием декарбонизации энергетики в XXI веке 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/м<sup>2</sup>, радиационно-равновесную температуру глобального потепления примерно на  $0,015^\circ\text{C}$ , что по кумулятивному тепловому воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу примерно 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/м<sup>2</sup>, в результате основные энергетические характеристики процесса глобального потепления к 2100 г. увеличатся примерно до следующих значений: нетто-поглощение парниковой тепловой энергии до  $1,6$  Вт/м<sup>2</sup>; количество накопленной климатической системой Земли тепловой энергии до  $710 \cdot 10^{15}$  кВт·ч; средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы до  $2,6^\circ\text{C}$ ; рост уровня Мирового океана до 790 мм.

После реализации к 2100 г. умеренного сценария декарбонизации и при условии последующего

обеспечения 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  $T_{\text{MAX}} = 5,8^\circ\text{C}$ .

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 даже после 2100 г. После реализации умеренного сценария декарбонизации и сохранения после 2100 г. выбросов ПГ на постоянном уровне 13 ppm-eq/10 лет средняя глобальная температура земной поверхности к 2380 г. увеличится до значения  $T_{ЗП} = 7,5^\circ\text{C}$ . Состояние «парникового насыщения» атмосферы при  $K = 850$  ppm-eq будет достигнуто в 2500 г., а состояние радиационного равновесия в системе «Земля–Космос» и соответствующая предельная температура глобального потепления  $T_{\text{MAX}} = 8,7^\circ\text{C}$  будут достигнуты примерно в 2630 г. К этому моменту КС Земли аккумулирует около  $2,4 \cdot 10^{18}$  кВт·ч тепловой энергии, а уровень Мирового океана поднимется примерно до 4,0 м.

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

- при разработке климатической повестки не следует руководствоваться нереальными рекомендациями Парижского соглашения по «быстрому и глубокому» отказу от использования ископаемого топлива, а предусмотреть постепенное снижение топливной генерации по мере её 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. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обновленный доклад. Вклад рабочих групп I, II, III в пятый оценочный доклад МГЭИК [основная группа авторов Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер]. — Женева: МГЭИК. — С. 44.
2. 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, 2021. — Pp. 33–144.

3. *Тетельмин В.В.* Основные потоки энергии, формируемые антропогенными парниковыми газами в нагревающейся климатической системе Земли // Экология промышленного производства, №4. 2024. — С. 51–57.
4. State of the Global Climate 2022. — Geneva: WMO, 2023. WMO-№ 1316.
5. Джирард Дж. Основы химии окружающей среды. — М.: Физматлит, 2008. — 640 с.
6. *Семенов С.М.* Парниковый эффект: открытие, развитие концепции, роль в формировании глобального климата и его антропогенных изменений // Фундаментальная и прикладная климатология, №2. 2015. — С. 103–126.
7. *Тетельмин В.В.* Уточненная концепция парникового эффекта и горячее климатическое будущее человечества // Гидротехника, 2025. №2. — С. 61–68.
8. *Тетельмин В.В.* Парниковый эффект: как устроен и как работает на потепление климата в XXI веке // Энергия: экономика, техника, экология, 2025. №8. — С. 40–56.
9. *Бринкман Э.* Физические проблемы экологии. — М.: Интеллект, 2012. — С. 288.
10. *Тетельмин В.В.* Функции чувствительности климатической системы Земли к выбросам антропогенных парниковых газов (аналитическое решение вековой задачи С. Аррениуса) // Использование и охрана природных ресурсов в России, 2025. №2. — С. 29–38.
11. *Тетельмин В.В.* Энергетические особенности и пределы глобального потепления // Энергия: экономика, техника, экология, 2023. №3. — С. 27–34.
12. *Тетельмин В.В.* Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий // Вестник РАН, 2023. №3. Т. 23. — С. 91–99.
13. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J.* Earth's global energy budget // Bull. of American Meteorological Society, march 2009. — Pp. 311–323.
14. *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.

#### Reference

1. MGEIK, 2014: Izmenenie klimata. 2014. Obobchenni doklad. Vklad rabochich grupp I, II, III v doklad MGEIK. Zheneva. S. 44.
2. 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, pp. 33–144
3. *Tetelmin V.V.* Osnovnie potoki energii, formiruemie parnikovimi gazami // EPP. №4. 2024. S. 51–57.
4. WMO, 2022. State of the Global Climate 2022. World Meteorological Organization. WMO-No 1316. 2023. Geneva/ Switzerland.
5. *Dzhirard D.* Osnovi chimii okruzhauchei sredi. M.: FIZMATLIT. 2008. 640 s.
6. *Semenov S. M.* Parnikovi effect: otkritie, razvitie koncepczii, rol v formirovanie globalnogo climate i ego izmenenii // FiPC. №2. 2015. S. 103–126.
7. *Tetelmin V. V.* Utochnennaja koncepczia parnikovogo efekta i gorachee climaticheskoe buduachee // Gidrotehnika, №2. 2025. S. 61–68.
8. *Tetelmin V. V.* Parnikovii effect: kak ustroen i kak rabotaet na poteplenie climata v 21 veke // Energiya: ekonomika, tehnika, ecologia. №8. 2025. S. 40–56.
9. *Brinkman E.* Fizicheskie problemi ecologii. M.: Intellect. 2012. 288 S.
10. *Tetelmin V. V.* Funkzii chuvstvitelnosti klimaticheskoi sistemi Zemli k vibrosam parnikovich gazov (reschenie zadachi S. Arreniusa) // Ispolovanie i ochrana prirodnich resursov v Rossii. 2025. №2. S. 29–38.
11. *Tetelmin V. V.* Energeticheskie osobennosti i predeli globalnogo poteplenia // Energiya: ekonomika, tehnika, ecologia. №3. 2023. S. 27–34.
12. *Tetelmin V. V.* Energeticheskii analiz osobennostei globalnogo potepleniya i ego posledstvii // Vestnik RAEN. 2023. №3. T. 23. P. 91–99.
13. *Trenberth K.E., Fasullo J.T., Kiehl J.* Earth's global energy budget. Bulletin of American Meteorological Society, march 2009. P. 311–323.
14. *Tetelmin V. V.* Algoritm analiticheskogo rascheta globalnogo potepleniya i primeri rascheta ego posledstvii // Ispolovanie i ochrana prirodnich resursov. . 2024. S. 21–32.

#### Сведения об авторе:

Тетельмин Владимир Владимирович, д.т.н., проф., академик РЭА, главный специалист Института экологии Российского университета дружбы народов (РУДН) им. Патриса Лумумбы, член Общественного совета при Минэнерго РФ; e-mail: v-tetelmin@rambler.ru.