

УДК 551.52

DOI: 10.52190/2073-2589_2023_1_51

EDN: NZZOAA

Энергетические особенности и пределы глобального потепления

В. В. ТЕТЕЛЬМИН, д-р техн. наук

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

Приведена сводная таблица энергетических показателей глобального потепления, рассчитанных с использованием накопленных мировой наукой с 1970 г. натуральных данных. Анализ показывает, что в каждом последующем десятилетии по сравнению с предыдущим увеличивается вклад положительных обратных связей в глобальное потепление. Каждый киловатт-час производимой человечеством энергии нагревает планету через антропогенный парниковый эффект на 16 кВт·ч. Предлагается рассмотреть функции зависимости мощности поглощения парниковой энергии, а также количества накопленной тепловой энергии в климатической системе от массы антропогенных парниковых газов в атмосфере. На основе предположения о квазистационарном состоянии климатической системы Земли в последней фазе ледникового периода предлагаются функции зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере трех основных парниковых газов, а также от содержания диоксида углерода. Получены значения предельной температуры и содержания антропогенных парниковых газов, при котором наступает "парниковое насыщение" атмосферы, когда климатическая система перестает откликаться на их дальнейшие выбросы.

Ключевые слова: глобальное потепление, климатическая система, парниковые газы, тепловая энергия, радиационно-равновесная температура.

В последние десятилетия обнаружилось, что человек, в погоне за производством возрастающего количества энергии, опасно нагревает все земное пространство. Тысячи дымовых труб и выхлопы миллиарда автомобилей расшатывают климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан (МО), атмосфера и суша. Годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов (ПГ) примерно следующие: CO₂ — около 38 млрд т.; CH₄ — 330 млн т.; N₂O — 8,2 млн т. Более 80 % диоксида углерода выбрасывается сжиганием ископаемого топлива, 15 % — в сфере землепользования и 4 % — при производстве цемента. Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела за индустриальный период к общему выбросу в атмосферу более 2,4 трлн т. основного парникового газа CO₂, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой.

Современная наука предсказывает поджидающие человечество опасности и призывает промышленность постепенно отходить от использования ископаемого топлива с переходом на использование возоб-

новляемой гидравлической, ветровой и солнечной энергии. Парижское соглашение к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата направлено на ограничение к 2050 г. роста глобальной температуры максимальным значением 2 °С сверх доиндустриального уровня. Для достижения этой цели предлагается в ближайшие 30 лет в два раза сократить выбросы ПГ. Однако при современных рассогласованных действиях мирового сообщества достичь "углеродной нейтральности" к 2050 г., по всей видимости, не удастся.

Для прогноза глобального потепления и определения радиационно-равновесной температуры T_{\max} строятся математические модели энергетического баланса (ЕВМ), учитывающие соотношение между физическими свойствами составляющих КС Земли: Мирового океана, суши и атмосферы. Главным начальным условием в этих моделях является назначаемое дополнительное тепловое излучение ПГ от 2,6 до 8,5 Вт/м², воспринимаемое земной поверхностью. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при содержании в атмосфере антропогенных выбросов $K = 550$ ppm-eq оценка значений соответствующей T_{\max} составляет от 2 до 4,5 °С, а при $K = 800$ ppm-eq еще больше — от 3 до 7 °С [1]. Не случайно многие авторы [2] замечают, что "сценарные прогнозы МГЭИК очень условны и неясно какой из них будет ближе к реальности".

Тетельмин Владимир Владимирович, профессор.
E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2022 г.

© Тетельмин В. В., 2023

Принимая во внимание сказанное, автор предпринял попытку получить аналитическое решение задачи глобального потепления, опираясь на многочисленные натурные данные, накопленные мировой наукой. В настоящей статье проведены энергетический анализ особенностей глобального потепления как первый этап на подходе к получению аналитического решения по определению темпа, продолжительности и пределов глобального потепления.

Методы и материалы

Автор использует эмпирический подход к расчету и определению закономерностей теплообмена между ПГ и климатической системой Земли, основанный на анализе накопленных мировой наукой натуральных данных и публикациях.

Основными показателями происходящих изменений в климатической системе являются: выбросы парниковых газов [3, 4], сопутствующие производству антропогенной энергии [5, 6]; повышение средней глобальной температуры атмосферы, заметный рост которой начался с 1910 г. [7]; увеличение накопленной в климатической системе Земли тепловой энергии [8]; данные изменений климата в ледниковые периоды [9, 10]; увеличение частоты природных стихийных бедствий [11, 12].

В докладе Межправительственной группы экспертов ООН по изменению климата приводится кривая роста накопленной парниковой тепловой энергии с 1970 по 2010 гг. [8], свидетельствующая о том, что за эти 40 лет КС накопила тепловую энергию в количестве $265 \cdot 10^{21}$ Дж ($73,6 \cdot 10^{15}$ кВт·ч). Это результаты регулярных исследований температуры различных слоев воды во всех частях Мирового океана, а также температуры атмосферы и суши. С использованием систематизированных автором и обработанных натуральных данных выполнены расчеты основных энергетических характеристик процесса глобального потепления, представленные в виде таблиц и рисунков. Выявлены основные особенности и закономерности энергообмена между парниковыми газами атмосферы и климатической системой Земли за период 1970—2020 гг. Выявленные закономерности представлены в виде графиков и аналитических функций, экстраполяция которых позволяет рассчитывать темпы и пределы будущего глобального потепления при различных сценариях антропогенных выбросов ПГ.

Результаты

Основные процессы, последовательно участвующие в изменении глобального климата Земли на протяжении последних полутора веков человеческой истории, представлены в табл. 1. Здесь и далее массовое и объемное содержание трех основных ПГ в атмосфере (CO_2 , CH_4 , N_2O) приведены в единицах, эквивалентных потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP (т-eq и ppm-eq). Приведенные процессы характеризуются тесными причинно-следственными связями, когда каждый последующий процесс обусловлен действием предыдущего.

Таблица 1

Основные результаты энергетического воздействия современной цивилизации на климатическую систему Земли, накопленные к 2020 г.

Параметры процессов	Значения
Накопленное за индустриальный период мировое производство антропогенной энергии	$8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч
Накопленные в атмосфере антропогенные выбросы трех основных парниковых газов	$1,36 \cdot 10^{12}$ т-eq / 182 ppm-eq
Накопленная в КС/и в атмосфере тепловая энергия ИК-излучения антропогенных парниковых газов	$140 \cdot 10^{15}$ кВт·ч / $1,8 \cdot 10^{15}$ кВт·ч
Количество отмеченных с 1970 г. случаев учащающихся спровоцированных глобальным потеплением гидрометеорологических стихийных бедствий (СГМ-событий)	10060

Замкнутый энерго-климатический цикл процессов производства энергии, выбросов ПГ и их разрушительных последствий можно схематично представить в виде "красного квадрата", в вершинах которого расположены четыре приведенных энергетических процесса (рис. 1) [13]. Неотложная задача человечества состоит в том, чтобы разорвать этот цикл следующих друг за другом опасных глобальных процессов, провоцирующих возникновение гидрометеорологических и других стихийных бедствий и катастроф.

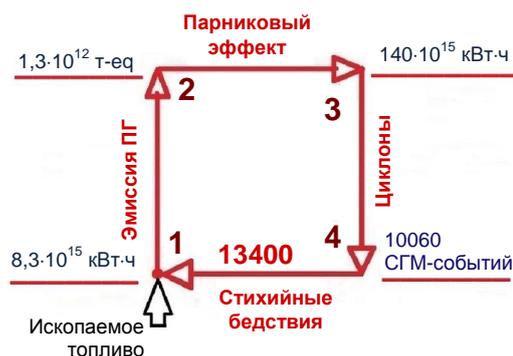


Рис. 1. Замкнутый энерго-климатический цикл процессов производства энергии с использованием ископаемого топлива и последствий глобального потепления:

1 — производство энергии с использованием ископаемого топлива; 2 — накопление в атмосфере парниковых газов; 3 — накопление в климатической системе Земли тепловой энергии; 4 — отмеченные с 1970 г. спровоцированные глобальным потеплением гидрометеорологические (СГМ-события) и другие стихийные бедствия и катастрофы

Мировое производство глобальной энергии приближается к $180 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год, а суммарное количество антропогенной энергии произведенное за последние полтора века достигло $8,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (вершина 1 квадрата, рис. 1). Около 83 % глобальной энергии производится с использованием ископаемого топлива в количестве 11 млрд т нефтяного эквивалента в год, в результате к 2020 г. в атмосфере накоплено около $1360 \cdot 10^9$ т-eq (182 ppm-eq) антропогенных парниковых газов (вершина 2 квадрата, рис. 2). По мнению автора наиболее вероятным сценарием планируемого сокращения глобальных выбросов представляется следующий: содержание антропогенных ПГ в атмосфере удастся стабилизировать к 2060 г. на уровне около $1750 \cdot 10^9$ т-eq (233 ppm-eq).

Результатом выбросов антропогенных ПГ в атмосферу явилась накопившаяся в КС Земли парниковая тепловая энергия в количестве около $140 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (вершина 3 квадрата, рис. 1). Можно сказать, что "энерго-климатическая цена" использования человеком ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый киловатт-час произведенной энергии ускоренно нагревает нашу планету, обеспечивая накопление в климатической системе Земли более 16 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан — около 94 %, на сушу приходится около 5 %, на атмосферу — около 1,0 % энергии.

По мере роста глобальной температуры активизируются спровоцированные потеплением опасные гидрометеорологические (СГМ-события) и другие природные стихийные бедствия (вершина 4 квадрата, рис. 1). По силе воздействия на экономику СГМ-события выходят на первое место: на тропические циклоны и приносимые ими осадки и наводнения приходится 32 %, на землетрясения — 12 %, на засухи — 10 % природных катастроф. Только в период 2000—2010 гг. отмечено 1260 метеорологических, 1944 гидрологических, 349 геофизических и 283 климатических стихийных бедствий [14]. Средняя энергия типичного тропического циклона составляет около $0,3 \cdot 10^{12}$ кВт·ч, что соответствует энергии взрыва 250 мегатонных бомб в тротиловом эквиваленте. Кинетическая энергия ураганов, штормов, тайфунов ежегодно увеличивается как за счет увеличения скорости ветра, так и за счет увеличения продолжительности их жизни. Можно предположить, что в будущем, по мере роста накопленной в КС Земли тепловой энергии, отдельные долгоживущие тропические циклоны будут плавно переходить один в другой и формировать постоянно действующие циклоны, как это наблюдается, например, на горячей Венере.

На рис. 2 приведена кривая роста накопленной КС Земли тепловой энергии парниковых газов, построенная с использованием соответствующего графика из доклада МГЭИК, полученного на основе инструментального и спутникового мониторинга температуры в разных средах в период 1970—2010 гг. [8]. С использованием графика рис. 2 выполнены

расчеты и сведены в табл. 2 основные энергетические характеристики процесса глобального потепления, накопленные мировой наукой в течение последних 50 лет наблюдений за КС Земли. Приведенные энергетические параметры глобального потепления и график роста аккумулярованной КС тепловой энергии являются результатом радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, включая все виды положительных и отрицательных обратных связей.

Из рис. 2 и табл. 2 следует, что в каждом последующем десятилетии КС Земли накапливала все возрастающее количество тепловой энергии, при этом эффективность поглощения тепла единицей содержания ПГ в атмосфере увеличивалась. В относительных показателях рост накопленного КС тепла опережал рост накопленных выбросов ПГ. Например, в период 2010—2020 гг. накопленная масса ПГ в атмосфере по сравнению с 1970—1980 гг. увеличилась почти в два раза (117 %), а накопленная КС тепловая энергия при этом увеличилась более чем в три раза (216 %).

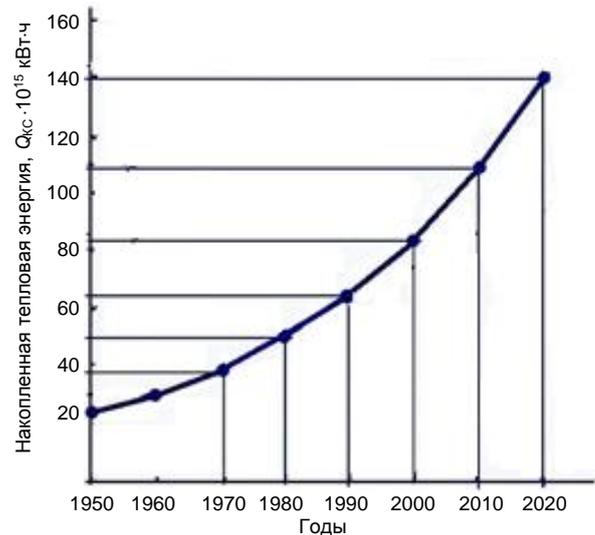


Рис. 2. Увеличение количества парниковой тепловой энергии, аккумулярованной климатической системой Земли за период времени 1950—2020 гг.

Таблица 2

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

Годы	Рост содержания выбросов антропогенных ПГ в атмосфере, $M \cdot 10^9$ т-эк/К ppm-эк	Рост содержания тепла в КС, $\Delta Q_{КС} \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет	Рост температуры атмосферы, ΔT град/10 лет	Эффективность поглощения тепла КС, $q \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год ppm-эк	Поглощаемая КС мощность тепловой парниковой энергии, i Вт/м ²	Вклад положительных обратных связей в накопление тепла в КС относительно 1970—1980 гг., $\times 10^{15}$ кВт·ч/10 лет
1970—1980	581/77,5	10,6	0,165	13,7	0,23	0
1980—1990	760/101,4 (31 %)	14,6 (38 %)	0,170	14,4	0,31	0,71 (4,9 %)
1990—2000	907/121,0 (56 %)	19,6 (85 %)	0,175	16,2	0,42	3,03 (15,5 %)
2000—2010	1057/141,4 (87 %)	26,0 (143 %)	0,180	18,4	0,58	6,69 (25,7 %)
2010—2020	1267/168,6 (117 %)	33,5 (216%)	0,185	19,9	0,75	10,8 (32 %)

Наблюдаемый рост "парниковой эффективности" каждой единицы содержания ПГ объясняется улучшением условий передачи тепловой энергии Мировому океану (МО) и КС в целом за счет увеличения вклада в глобальное потепление всех видов усиливающихся положительных обратных связей. Например, в период 2000—2010 гг. вклад положительных обратных связей в общее потепление составил $6,69 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (25,7 %), а в следующий период 2010—2020 гг. этот вклад увеличился до $10,8 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (32 %). Видимо, не случайно десятилетие 2011—2020 гг. было самым теплым за всю историю наблюдений [15].

Наиболее значимыми факторами проявления положительных обратных связей помимо снижения альбедо являются: усиление циклонической деятельности и конвективного переноса тепла из тропиков в высокие широты [11]; деградация криолитозоны арктического шельфа и тундры с выбросом метана из газогидратных кластеров [16]; увеличение абсолютной влажности сухого арктического воздуха, сопровождающееся увеличением регионального парникового эффекта [17].

В отличие от большинства ПГ водяной пар неравномерно распределен по земной поверхности, его средняя концентрация в атмосфере составляет 0,4 %. Чем ниже температура воздуха, тем меньше он способен удерживать влагу. Например, в вертикальном столбе атмосферы тропического пояса может содержаться до 60 кг/м^2 влаги, а в столбе холодной арктической атмосферы обычно содержится влаги в 5—6 раз меньше [18]. При 20°C максимальная абсолютная влажность воздуха достигает $17,2 \text{ г/м}^3$, а при 0°C — всего $4,8 \text{ г/м}^3$, поэтому в Арктическом поясе водяной пар из-за его низкого содержания в атмосфере не в полной мере реализует свой парниковый потенциал. Привнесение сюда из тропиков внешнего тепла и осадков повышает влагонасыщенность атмосферы, усиливает парниковый эффект в этом регионе, ограничивает отpravку ИК-излучения в Космос и тем самым обеспечивает "арктическое усиление". По этой причине с 1991 г. средняя температура в Арктической зоне повысилась на $2,64^\circ\text{C}$ [15]. Арктическое усиление является одним из наиболее сильных факторов опережающего потепления, наблюдаемого на территории России ($0,45^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$) и в Арктической зоне ($0,75^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$).

По данным табл. 2 построены графики зависимости энергии $\Delta Q_{\text{КС}}$, полученной КС за каждый 10-летний период наблюдений, и мощности поглощения КС парниковой энергии от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере (рис. 3). Все полученные точки ложатся на прямые линии. Аналитическое выражение графика 1 представляется следующей функцией:

$$\Delta Q_{\text{КС}} = q(K - 55)\Delta t, \text{ кВт}\cdot\text{ч} \quad (1)$$

где $q = 29,8 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/(ppm·eq)·год — удельная интенсивность поглощения КС парниковой тепловой энергии; K (ppm·eq) — среднее значение концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в расчетном периоде времени Δt .

Функция (1), определяющая количество полученной КС Земли тепловой энергии за время Δt , спра-

ведлива при изменении аргументов в следующих пределах: $80 \text{ ppm}\cdot\text{eq} \leq K$; $1 \text{ год} \leq \Delta t \leq 10 \text{ лет}$.

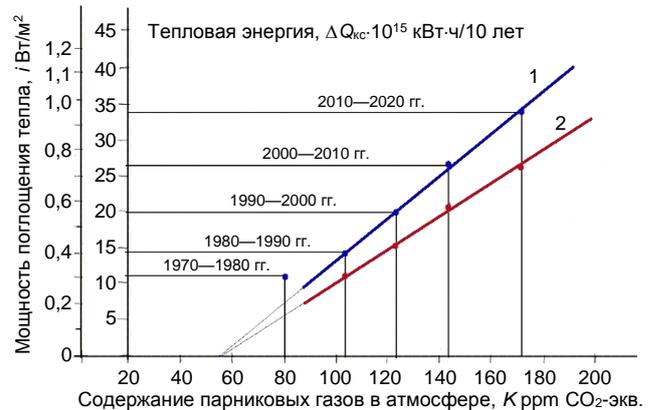


Рис. 3. Изменение количества накопленной тепловой энергии в КС Земли в каждом последующем 10-летии (1) и мощности поглощения тепла (2) в зависимости от содержания в атмосфере антропогенных ПГ

Физический смысл коэффициента q заключается в том, что он является тепловой энергией, получаемой КС Земли от единицы концентрации ПГ в атмосфере в течение одного года. Ценность этого показателя в том, что он определяет реальную интенсивность передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану и КС в целом с учетом всех происходивших на Земле в период 1970—2020 гг. обменных энергетических процессов, включая положительные и отрицательные обратные связи.

Из табл. 2 следует, что в наблюдаемый период 1970—2020 гг. реальная мощность поглощения тепловой энергии ПГ климатической системой Земли увеличилась от $i = 0,23$ до $0,75 \text{ Вт/м}^2$ при увеличении среднего значения концентрации ПГ в атмосфере от 77,5 до 168,6 ppm·eq. Содержание выбросов в этот период времени увеличилось примерно в 2 раза, а мощность нагревания КС увеличилась более чем в три раза, что также свидетельствует об усилении с течением времени эффективности действия парникового эффекта в климатической системе Земли. Как уже отмечено выше, за счет опережающего роста положительных обратных связей нагревание КС в каждое последующее десятилетие происходило быстрее, чем происходило накопление выбросов ПГ. Зависимость мощности i реального поглощения КС парниковой тепловой энергии от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере (рис. 3) описывается следующей линейной функцией:

$$i = k(K - 55), \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

где коэффициент $k = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{ppm}\cdot\text{eq)}$ — мощность поглощения Мировым океаном и КС в целом тепловой энергии, формируемая единицей содержания антропогенных ПГ в атмосфере.

С помощью выражений (1) и (2) можно найти прямую связь между мощностью i реального поглощения тепловой энергии ПГ и количеством аккумулированного КС тепла:

$$\Delta Q_{\text{КС}} = 4,5 \cdot 10^{15} i, \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}. \quad (3)$$

Если к 2060 г. масса антропогенных ПГ в атмосфере достигнет вероятного уровня $1,75 \cdot 10^{12}$ т-eq (233 ppm-eq), то в соответствии с (2) мощность поглощения КС парниковой тепловой энергии в 2060 г. составит $i = 1,17 \text{ Вт/м}^2$, а в соответствии с (1) количество тепловой энергии, которую получит КС в 2060 г., составит $5,3 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год. Всего за период с 1970 по 2060 гг. к моменту предполагаемого достижения "углеродной нейтральности" КС получит около 278×10^{15} кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая приведет к дополнительному изменению глобального климата.

После достижения "углеродной нейтральности" к 2060 г. и при дальнейшем постоянном содержании ПГ в атмосфере климатическая система Земли будет в течение продолжительного времени приближаться к некоторому предельному значению температуры T_{max} , соответствующей радиационно-равновесному состоянию системы "Земля—Космос". Сила воздействия единицы массы ПГ на глобальное потепление зависит от их содержания в атмосфере. Спектры поглощения отдельных ПГ частично пересекаются, поэтому поглощение отраженного земной поверхностью ИК-излучения смесью ПГ не обладает свойством аддитивности. Поступающая в атмосферу дополнительная масса ПГ поглощает только ту часть ИК-излучения, которая не была поглощена уже присутствующим в атмосфере этим газом. Например, добавление новых порций CO_2 оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу этим газом за излучение в диапазонах длин волн $4,0\text{—}4,5 \text{ мкм}$ и $14\text{—}19 \text{ мкм}$, а также конкурировать с N_2O в области спектра от $4,0\text{—}4,5 \text{ мкм}$ и с N_2O и CH_4 в районе длин волн 3 мкм .

Приемлемые для прикладных расчетов значения радиационно-равновесной температуры T_{max} можно получить, используя свойство тесной корреляции между средней глобальной температурой и объемным содержанием парниковых газов в квазистационарном состоянии КС Земли в последней фазе ледникового периода. На рис. 4 приведены графики изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в последний ледниковый период [19]. При этом независимо от того, что было в тот период первичным — изменение глобальной температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения температуры и концентрации ПГ изменялись согласованно.

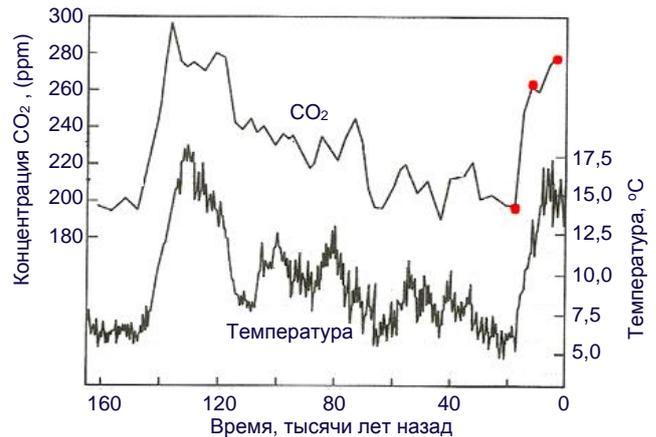


Рис. 4. Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода в атмосфере за последние 160 тыс. лет и три расчетные точки, соответствующие трем квазистационарным состояниям климатической системы Земли

В последний ледниковый период глобальная температура земной атмосферы изменялась в диапазоне $5,8\text{—}16,4 \text{ }^\circ\text{C}$; концентрация диоксида углерода CO_2 в диапазоне $190\text{—}290 \text{ ppm}$; метана CH_4 в диапазоне $0,35\text{—}0,70 \text{ ppm}$; закиси азота N_2O — в диапазоне $0,20\text{—}0,27$ [9].

В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из этих ПГ в атмосфере составляла: CO_2 — 280 ppm , CH_4 — $0,7 \text{ ppm}$, N_2O — $0,27 \text{ ppm}$. В 2020 г. содержание этих газов в атмосфере повысилось до значений: CO_2 — 415 ppm , CH_4 — $1,88 \text{ ppm}$, N_2O — $0,335 \text{ ppm}$. Во всех трех приведенных случаях соотношение содержания CO_2 и общего содержания трех основных ПГ в атмосфере в CO_2 -зкв. (eq) оставалось практически постоянным и составляло в среднем 75 %. В дальнейших рассуждениях и расчетах будем принимать во внимание следующие соотношения [3]:

- в доиндустриальном периоде объемное содержание трех ПГ в атмосфере составляло $K_{\Sigma} = 370 \text{ ppm-eq}$; соответствующее массовое содержание $M_{\Sigma} = 2,86 \cdot 10^{12}$ т-eq; соответствующая доля в формировании радиационно-равновесной температуры 9,4 из 33,4 °C;

- в доиндустриальном периоде объемное содержание диоксида углерода составляло $K = 280 \text{ ppm}$; соответствующее массовое содержание $M = 2,24 \cdot 10^{12}$ т; соответствующая доля в формировании радиационно-равновесной температуры 7,2 из 33,4 °C.

Таблица 3

Натурные данные средней глобальной температуры палеоатмосферы для трех моментов времени в предположении квазистационарного состояния климатической системы Земли при разном содержании в атмосфере основных парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O)

Период, тыс. лет назад	Содержание CO_2 в атмосфере, $K \text{ ppm}$	Содержание трех ПГ в атмосфере, $K \text{ ppm-eq}$	Содержание трех ПГ в атмосфере M , 10^{12} т-eq	Нагрев атмосферы всеми ПГ, град	Доля нагрева тремя ПГ, T_{max} град	Доля нагрева одним CO_2 , T_{max} град
20—18	193	261	2,04	24,8	7,0	5,35
12—10	262	346	2,71	32,0	8,80	6,90
8—0	280	369	2,89	33,4	9,40	7,20

Планета Земля в период своей истории 20—8 тыс. лет назад медленно выходила из ледникового периода после возвращения орбиты от эксцентриситета 0,042 и значения солнечной постоянной 1300 Вт/м² к современным значениям эксцентриситета орбиты 0,017 и солнечной постоянной 1368 Вт/м² [20]. Скорость естественного потепления планеты на стадии её продолжительного выхода из ледникового периода была в 22 раза меньше современного глобального потепления. По причине малой скорости этого процесса, длившегося 12 тыс. лет, можно считать, что в этот период КС Земли последовательно проходила через ряд квазистационарных термодинамических состояний [10]. В таком случае можно принять, что на каждый момент времени соотношение средней глобальной температуры и концентрации ПГ в атмосфере примерно отвечало состоянию радиационного баланса КС. Подобное допущение позволяет получить соотношения радиационно-равновесной температуры T_{\max} и соответствующей концентрации K для трех отмеченных на рис. 4 квазистационарных состояний КС. Рассчитанные значения радиационно-равновесной температуры атмосферы при трёх разных концентрациях ПГ приведены в табл. 3.

Полученные результаты подтверждают известную закономерность, что по мере насыщения атмосферы ПГ радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере (T_{\max}/K) снижается. Данные табл. 3 позволяют получить квадратичные аналитические зависимости параболического типа между радиационно-равновесной температурой атмосферы T_{\max} и содержанием в ней парниковых газов.

Функция зависимости радиационно-равновесной температуры от общего объемного содержания ПГ в атмосфере имеет следующий вид:

$$T_{\max} = (30 \cdot 10^{-3} - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K_{\Sigma}) K_{\Sigma}, \text{ град.} \quad (4)$$

Здесь $K_{\Sigma} = (K + 370)$ ppm-eq — общее содержание ПГ в атмосфере, как сумма объемного содержания антропогенных выбросов K ppm-eq и доиндустриального содержания трех основных ПГ.

В начале индустриального периода, когда антропогенные выбросы отсутствовали, ($K = 0$), из (4) получаем известный вклад трех основных ПГ — 9,4 °C в общую радиационно-равновесную температуру $T_{\max} = 33,4$ °C, которая наблюдалась в доиндустриальную эпоху в естественном состоянии КС Земли [3]. Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем значение общего содержания ПГ, при котором возможно наступление "парникового насыщения" атмосферы: $K_{\text{НАС}} = 1220$ ppm-eq. Этому значению соответствует максимальная температура глобального потепления (температура насыщения) от действия трех основных ПГ $T_{\text{НАС}} = 18,3$ °C.

Вклад выбросов антропогенных ПГ в приведенные насыщающие значения концентрации и температуры атмосферы соответственно следующий: $K_{\text{АН НАС}} = 850$ ppm-eq; $T_{\text{АН НАС}} = 8,9$ °C. При более высоких значениях содержания ПГ атмосфера теряет "парниковую чувствительность" и перестанет откликаться

повышением температуры на дальнейшие выбросы.

При современных параметрах орбиты Земли, когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, из функции (4) для общего содержания ПГ получаем функции зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержания антропогенных выбросов ПГ.

Для антропогенных выбросов трех основных ПГ из (4) получаем:

$$T_{\max} = (20,9 \cdot 10^{-3} - K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2), \text{ град} \quad (5)$$

где K (ppm-eq) — объемное содержание в атмосфере антропогенных выбросов ПГ.

Выражение (5) можно представить как функцию зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержащейся в атмосфере массы выбросов ПГ:

$$T_{\max} = (2,79 \cdot 10^{-12} - M - 0,22 \cdot 10^{-24} \cdot M^2), \text{ град} \quad (6)$$

где M т-eq — массовое содержание в CO₂-экв. в атмосфере выбросов ПГ.

Функции (5) и (6) позволяют определять:

- предельную температуру глобального потепления, которая установится на Земле в будущем при сохранении сегодняшней концентрации ($K = \text{Const}$) или сегодняшней массы ($M = \text{Const}$) ПГ в атмосфере;
- содержание концентрации или массы ПГ в атмосфере в прошлом, которые способны обеспечить нагревание КС до сегодняшней текущей температуры, соответствующей радиационно-равновесной температуре для некоторых значений M или K в прошлом. Любая сегодняшняя текущая неравновесная температура одновременно является радиационно-равновесной для некоторого содержания ПГ в прошлом.

Каждая выброшенная в атмосферу масса ПГ обеспечивает радиационное усиление — определенную порцию перехвата отраженной земной поверхностью тепловой энергии ИК-излучения. В рассматриваемом периоде 1970—2020 гг. каждому более высокому содержанию антропогенных ПГ соответствовала более высокая радиационно-равновесная температура T_{\max} (5) и (6), а также более высокая мощность энергии радиационного усиления J_{\max} . С помощью выражения (5) и уравнения Стефана-Больцмана [21] получаем функцию зависимости мощности радиационного усиления J_{\max} от содержания антропогенных ПГ в атмосфере:

$$J_{\max} = (9,87 \cdot 10^{-2} K + 1,5), \text{ Вт/м}^2. \quad (7)$$

Часть мощности тепловой энергии радиационного усиления J_{\max} , циркулирующей между барьером из ПГ в атмосфере и земной поверхностью, поглощается КС Земли, обеспечивая реальное глобальное потепление. Из уравнений (2) и (7) находим долю i мощности радиационного усиления, которую поглощала КС в рассматриваемый период времени:

$$i = 67 \cdot 10^{-3} (J_{\max} - 7), \text{ Вт/м}^2. \quad (8)$$

На рис. 5 приводятся графики функций (7) и (8), из которых, например, следует, что по мере роста содержания антропогенных ПГ радиационное усиление J_{\max} в период 1980—2020 гг. увеличилось с 10,6 до 19,5 Вт/м², а соответствующая интенсивность реального поглощения КС тепла — с 0,24 до 0,83 Вт/м², что составляет 2,7—4,1 % от потока энергии радиационного усиления.

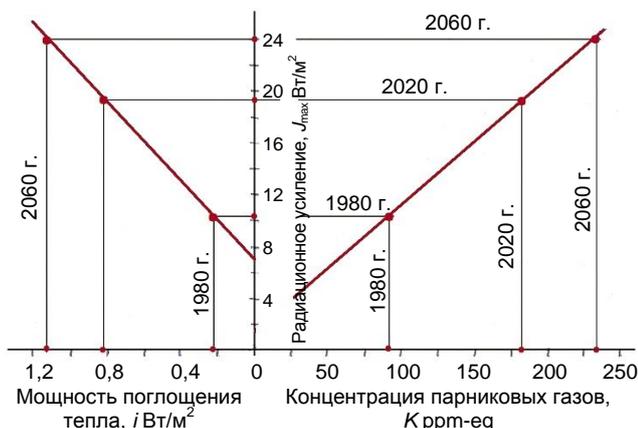


Рис. 5. Зависимость энергии радиационного усиления (1) от концентрации антропогенных ПГ в атмосфере, а также мощности поглощения тепловой энергии парниковой тепловой энергии от радиационного усиления (2)

По данным табл. 3 получаем следующую квадратичную функцию влияния **общего** содержания CO₂ в атмосфере на радиационно-равновесную температуру:

$$T_{\max} = (32 \cdot 10^{-3} - 23 \cdot 10^{-6} \cdot K_{\Sigma}) K_{\Sigma}, \text{ град.} \quad (9)$$

Здесь $K_{\Sigma} = (K + 280 \text{ ppm})$ — общее содержание CO₂ в атмосфере как сумма его антропогенных выбросов K и его доиндустриального содержания.

Для антропогенных выбросов диоксида углерода из функции (9) получаем:

$$T_{\max} = (19,2 \cdot 10^{-3} - K - 23 \cdot 10^{-6} \cdot K^2), \text{ град} \quad (10)$$

где K ppm — объемное содержание в атмосфере антропогенных выбросов диоксида углерода.

В начале индустриального периода, когда антропогенных выбросов ещё не было ($K_{\Sigma} = 280 \text{ ppm}$), из (9) получаем известный температурный вклад CO₂ — 7,2 °C в общую радиационно-равновесную температуру $T_{\max} = 33,4 \text{ °C}$, которая наблюдалась в доиндустриальную эпоху. Исследуя функцию (9) на экстремум, получаем значение общего содержания CO₂ в смеси ПГ, при котором может наступить "парниковое насыщение" атмосферы: $K_{\text{НАС}} = 698 \text{ ppm}$. Этому абсолютному значению концентрации соответствует общий вклад CO₂ в максимальную температуру глобального потепления $T_{\text{НАС}} = 11,2 \text{ °C}$.

Вклад выбросов антропогенного CO₂ в насыщающее значение концентрации ПГ и соответствующую температуру атмосферы соответственно следующий: $K_{\text{АН НАС}} = 418 \text{ ppm}$; $T_{\text{АН НАС}} = 4 \text{ °C}$ (рис. 6). При более высоком содержании CO₂ атмосфера потеряет "парниковую чувствительность" к этому газу и перестанет

откликаться повышением температуры на его дальнейшие выбросы.

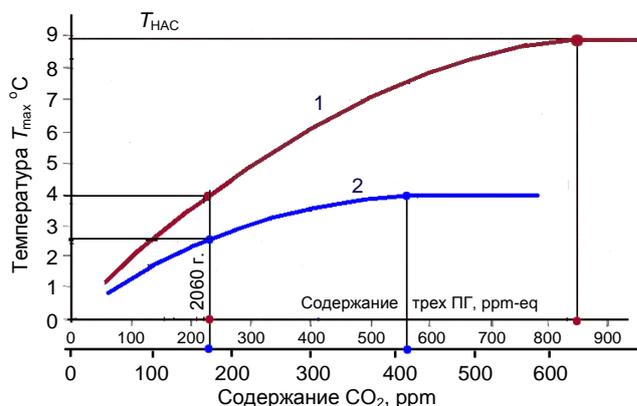


Рис. 6. График зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержания в ней антропогенных выбросов ПГ:

- 1 — для выбросов трех основных парниковых газов;
- 2 — для выбросов диоксида углерода

На рис. 6 приведены графики функций (5) и (10), ход которых качественно отвечает ходу соответствующих графиков, приведенных в работе [4], в которой отмечается, что "увеличение концентрации CO₂ будет иметь все меньшее значение в аспекте усиления парникового эффекта". Если к 2060 г. человечеству удастся зафиксировать массу трех основных антропогенных ПГ в атмосфере на постоянном уровне $1750 \cdot 10^9 \text{ т-eq}$ (233 ppm-eq), то с течением времени средняя глобальная температура выйдет на уровень T_{\max} , отвечающий состоянию радиационного баланса. Эффект глобального потепления от антропогенных выбросов ПГ является отложенным во времени. Аналогично любое снижение содержания ПГ в атмосфере не вызовет мгновенного падения глобальной температуры. В соответствии с выражением (5) глобальное потепление будет прогрессировать до достижения предельной температуры $T_{\max} = 4,2 \text{ °C}$, из которой на долю CO₂ будет приходиться около 2,6 °C (рис. 6). На тот момент общий нагревательный потенциал смеси основных ПГ (CO₂, CH₄, N₂O) будет использован на 74 %, а нагревательный потенциал диоксида углерода на 87 %. Таким образом, следование обозначенной Парижским соглашением "климатической повестке" и фиксация к 2060 г. содержания антропогенных ПГ в атмосфере на уровне $1750 \cdot 10^9 \text{ т-eq}$ предотвратят в будущем возможное дополнительное нагревание атмосферы примерно на 4,7 °C, из которых на долю диоксида углерода будет приходиться нереализованных около 1,4 °C.

Выводы

Энерго-климатическая цена использования человечеством ископаемого топлива и выбросов ПГ очень высокая: каждый киловатт-час произведенной за последние 150 лет глобальной энергии нагревает планету Земля на 16 кВт·ч.

Рост накопленной климатической системой тепловой энергии парниковых газов примерно в 1,5 раза опережает рост накопленных в атмосфере их выбро-

сов, что объясняется увеличением вклада в глобальное потепление положительных обратных связей: усиление циклонической деятельности; деградация криолизонны с выбросом метана; "арктическое усиление" и др.

В период с 1970 по 2060 гг. к моменту предполагаемого достижения "углеродной нейтральности" планета Земля получит около $278 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, которая приведет к существенному изменению глобального климата.

По мере роста глобальной температуры активизируются спровоцированные глобальным потеплением опасные гидрометеорологические (СГМ-события) и другие стихийные бедствия, которые по силе воздействия на мировую экономику выходят на первое место.

Количественный анализ параметров квазистационарного состояния климатической системы Земли в последней фазе последнего ледникового периода позволил получить приемлемые для прикладных расчетов функциональные зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере антропогенных парниковых газов.

Предлагаются следующие расчетные эмпирические функции:

- зависимость мощности поглощения и количества аккумулированной климатической системой тепловой энергии парниковых газов от их содержания в атмосфере;
- зависимость мощности радиационного усиления от содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Если человечество достигнет к 2060 г. "углеродной нейтральности" и зафиксирует содержание антропогенных парниковых газов на уровне $1750 \cdot 10^9$ т-eq (233 ppm-eq), то в соответствии с этим сценарием глобальное потепление будет прогрессировать до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2 °С. Достижение к 2060 г. целей Парижского соглашения предотвратит в будущем возможность дополнительного нагревания атмосферы примерно на 4,7 °С.

Предлагаемые аналитические зависимости позволяют при любом сценарии выбросов парниковых газов выстроить алгоритм расчета темпа и продолжительности глобального потепления до достижения климатической системой состояния радиационного равновесия с космическим пространством.

Человечество отдает себе отчет в том, что намечаемое и проводимое ограничение глобальных выбросов парниковых газов является экономически затратным процессом и его осуществление возможно только за счет снижения мирового экономического роста. В данном случае необходимо сопоставить экономическую цену предпринимаемых человечеством усилий по достижению "углеродной нейтраль-

ности" и сдерживанию опасного глобального потепления с последствиями неограниченных выбросов парниковых газов и неконтролируемого роста частоты и силы спровоцированных стихийных бедствий и катастроф.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Силвер Дж.** Глобальное потепление без тайн / Пер. с англ. — М.: ЛЕНАНД, 2009. — 480 с.
2. **Федоров В. М., Алтуни И. В., Фролов Д. М.** Влияние диоксида углерода антропогенного генезиса на термический режим атмосферы и его изменения // Жизнь Земли. 2022. Т. 44(4). С. 402—414.
3. **Бажин Н. Б.** Метан в окружающей среде. — Новосибирск: СО РАН, 2010. — 56 с.
4. **Семенов С. М., Попов И. О.** Сравнительная оценка влияния изменения концентрации диоксида углерода, метана, закиси азота и водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 34—43.
5. **Фортос В. Е., Поппель О. С.** Энергетика в современном мире. — М.: Интеллект, 2011. — 168 с.
6. **Тетельмин В. В., Васильченко А. Б.** Современная энергетика и энергетика будущего. — М.: Ленанд, 2018. — 240 с.
7. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК [основная группа авторов Р.Пачаури и Л. Мейер]. МГЭИК. Женева. Швейцария, С. 44.
8. IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptacion and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken. Cambridge University Press, Cambridge.
9. **Бялко А. В.** Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // Природа. 2009. № 12. С. 18—28.
10. **Мельников В. П., Смутьский В. И.** Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. — Новосибирск: Изд. ГЕО, 2009. — 98 с.
11. EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The Intenational Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain.
12. **Миркин Я. С.** Будущее общество и место России // Россия в глобальной политике. 2020. № 6. С. 26—34.
13. **Тетельмин В. В.** Планета Земля и Человек. Единая экосистема. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 480 с.
14. **Бондур В. Г.** Что болит у Земли // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5—12.
15. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории России. Общее резюме. — СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. — 144 с.
16. **Осипов В. И.** Природные катастрофы: анализ развития и пути минимизации последствий / Проблемы анализа риска. — М.: Деловой экспресс, 2015. Т. 12. С. 84—93.
17. **Латонин М. М., Башмачников И. Л., Бобылев Л. П.** Явление арктического усиления и его механизмы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 3—19.
18. **Френсис Д.** Паровые бури // В мире науки. 2022. № 1/2. С. 5—12.
19. **Джирард Дж. Е.** Основы химии окружающей среды. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 640 с.
20. **Тетельмин В. В.** Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Сер. "Экология и безопасность жизнедеятельности". 2022. Т. 30. № 1. С. 45—57.
21. **Тетельмин В. В., Пимашков П. И.** Биосфера и человек. Глобальное потепление. — М.: Либликом, 2021. — 336 с.

Energy patterns and limits of global warming

V. V. TETELMIN

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

The summary table of global warming energy patterns calculated using accumulated natural data accumulated by the world science is presented. The analysis shows that in each successive decade the contribution of positive feedbacks to global warming increases by about 9 % relative to the preceding decade. Each kilowatt hour of energy produced and used by humanity warms our planet through the anthropogenic greenhouse effect by 16 kWh. We propose the functions of dependence of greenhouse energy absorption capacity as well as the amount of accumulated heat energy in the climatic system on the mass of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere. Based on the assumption of a quasi-stationary state of the Earth's climatic system during the last phase of the ice age, we propose the functions of dependence of the radiation equilibrium temperature on the concentration in the atmosphere of the mixture of the three main greenhouse gases, as well as on the concentration of carbon dioxide. The values of the volume concentration of anthropogenic greenhouse gas emissions of 850 ppm and the global warming limit temperature of 8.9 °C, at which the atmosphere reaches "greenhouse saturation" and the climate system no longer responds to further warming, are obtained.

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

Bibliography — 21 references.

Received December 25, 2022