УДК 551.581.1

DOI: 10.52531/1682-1696-2022-22-1-85-92

Научная статья

ЭМИССИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ФОРМУЛА ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

В.В. ТЕТЕЛЬМИНРОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ДРУЖБЫ НАРОДОВ

Выявлены особенности теплообмена в системе «парниковые газы – атмосфера – Мировой океан». Начиная со второй половины XX в. спровоцированные глобальным потеплением мощные метеорологические события (СМ-события) активно разносят тепловую энергию парниковых газов по земной поверхности.

Предложена к использованию «формула глобального потепления», позволяющая прогнозировать среднюю температуру атмосферы как функцию массы накопленных выбросов парниковых газов. Предлагается решение по расчету времени «отепляющего воздействия» парниковых газов после прекращения их выбросов в атмосферу. В частности, после достижения целей Парижского соглашения в 2060 г. глобальное потепление будет продолжаться еще 125 лет при повышении конечной температуры атмосферы до 6°С.

Ключевые слова: выбросы парниковых газов, парниковый эффект, глобальное потепление, климатическая система, спровоцированное метеорологическое событие, интенсивность передачи тепловой энергии.

В 60-х годах прошлого века профессор М.И. Будыко пришел к заключению о неизбежности изменения глобального климата в сторону потепления при росте производства энергии [3]. Это было предвидение, основанное на точных оценках энергопотоков и понимании атмосферных процессов. В XXI веке климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере.

Лауреатом Нобелевской премии по физике 2021 г. стал немецкий метеоролог Клаус Хассельман «за физическое моделирование климата Земли и надежный прогноз глобального потепления». В настоящей статье предлагается к использованию в прогнозных расчетах эмпирическая «формула глобального потепления», выведенная на основе анализа накоплен-

Original article

ANTHROPOGENIC GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND THE GLOBAL WARMING FORMULA

V.V. TETELMIN

PEOPLES' FRIENDSHIP UNIVERSITY OF RUSSIA

The peculiarities of heat exchange in the system «greenhouse gases – atmosphere – World Ocean» were revealed. Since the second half of the twentieth century, powerful meteorological events (CM-events) provoked by global warming actively spread the thermal energy of greenhouse gases over the Earth's surface.

A «global warming formula» is proposed, which makes it possible to predict the average temperature of the atmosphere as a function of the mass of accumulated greenhouse gas emissions in it. A solution for calculating the «warming effect» time of greenhouse gases after the cessation of their emissions into the atmosphere is proposed. In particular, global warming will continue for another 125 years with an increase in the final temperature of the atmosphere to 6 deg. C after reaching the goals of the Paris Agreement in 2060.

KEY WORDS: greenhouse gas emissions, greenhouse effect, global warming, climate system, triggered meteorological event, intensity of heat transfer.

ных мировой наукой натурных данных о процессах теплообмена в климатической системе Земли.

Производство энергии сопровождается накоплением в атмосфере основного парникового газа CO₂ (76% радиационного эффекта) и сопутствующих парниковых газов CH₄ (16%), N₂O (6%). В земной атмосфере накопилось антропогенных ПГ примерно 1,3 трлн т CO₂ – экв, из которых около 1 трлн т приходится на диоксид углерода. За время активной хозяйственной деятельности концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась с доиндустриального уровня 280 ppm до современного экстремального значения 416 ppm. При этом темп прироста концентрации диоксида углерода постоянно увеличивался: в период 1990–2000 г. он составлял 1,5 ppm/год; в 2000–2010 г. – 1,9 ppm/год; в 2010–2020 г. – 2,5 ppm/год [9].

До 1850 г. в атмосфере содержались следующие интересующие нас парниковые газы (ПГ): CO₂ с начальной концентрацией 280 ppm (2,24×10¹² т), ме-

тан с начальной концентрацией 0,7 ppm ($2,03 \times 10^9$ т), закись азота с начальной концентрацией 0,26 ppm ($2,08 \times 10^9$ т). В доиндустриальный период эти три основных ПГ обеспечивали $9,4^\circ$ С потепления [1, 4].

Если использовать общепринятые коэффициенты конверсии (GWP) для метана 28, а для закиси азота 261, то общее начальное содержание трех основных ПГ в доиндустриальной атмосфере составляло $2,84 \times 10^{12}$ т CO_2 -экв. До 1850 г. естественные источники этих трех ПГ находились в равновесии с их естественными поглотителями, а климатическая система (КС) находилась в состоянии теплового баланса. В таком случае можно принять, что потенциал одной тонны ПГ по обеспечению нагревания атмосферы представляет собой константу $\Pi = 3,3 \times 10^{-12}$ град/т CO_2 -экв. Значение Π характеризует потенциал максимального нагревания атмосферы одной тонной ПГ в условиях стационарного теплообмена между всеми составляющими климатической системы (КС) Земли. В таком случае при содержании в атмосфере массы M (т CO_2 -экв.) парниковых газов потенциал нагревания $T_{\max}$ атмосферы определяется произведением:

$$T_{\max} = 3,3 \times 10^{-12} \times M \text{ (град)}. \quad (1)$$

Привнесение в атмосферу антропогенных ПГ сместило веками установившееся равновесие процесса теплового взаимодействия океана и атмосферы. В дальнейшем будем рассматривать содержание в атмосфере только антропогенных ПГ и тепловую энергию антропогенного парникового эффекта (ПЭ), которая обуславливает современное глобальное изменение климата Земли.

Дальнейший анализ особенностей глобального потепления выполнен с использованием натурных данных, накопленных мировой наукой за последнее столетие. В качестве исходной информации в расчетах использовались следующие опубликованные результаты глобального мониторинга:

- рост средней глобальной температуры [5];
- рост концентрации ПГ в атмосфере [8, 9];
- рост количества катастрофических ураганов (циклонов) [11–14];
- рост аккумулированной тепловой энергии климатической системой Земли [5, 15].

В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата [5] приводится кривая роста тепловой энергии, накопленной климатической системой Земли с 1970 г. по 2010 г. На основе этой натурной кривой построен график роста аккумулированной тепловой энергии (рис. 1), из которой около 94% приходится на Мировой океан, 4,5% на сушу и около 1,5% на атмосферу. Эта кривая положена в основу вывода «формулы глобального потепления», потому что представляет собой инструментально измеренный результат действия всех энергетических по-

РИС. 1.

Рост накопленной климатической системой Земли тепловой энергии антропогенного парникового эффекта: 1 – график реального роста; 2 – график роста при гипотетическом достижении углеродной нейтральности в 1980 г.; ΔQ – приращение тепловой энергии в климатической системе Земли в период 2000–2010 гг.

токов на Земле, существовавших с 1970 г. по 2010 г., включая действие положительных и отрицательных обратных связей.

Необходимые для дальнейшего анализа исходные натурные данные систематизированы и представлены в табл. 1, в которой кроме CO_2 учтено присутствие в атмосфере двух других основных парниковых газов: метана и закиси азота [11]. В таблице также приводятся натурные данные о количестве спровоцированных антропогенным парниковым эффектом катастрофических метеорологических событий (СМС-событий), играющих важную роль в активизации горизонтального конвективного переноса тепловой энергии из тропического пояса Земли в высокие широты [7].

Страховые компании фиксируют рост количества природных катастроф и неблагоприятных событий метеорологического характера, которые растут вместе с ростом антропогенных выбросов ПГ [14]. В дальнейшем будем называть эти события (циклоны, штормы, ураганы) спровоцированными метеорологическими событиями (СМС). Важнейшим фактором теплового взаимодействия атмосферы и МО – двух основных компонентов климатической системы Земли является турбулентный теплообмен, интенсивность которого определяется скоростью ветра, а также разностью температур воды и воздуха [3].

Процесс накопления тепловой энергии в атмосфере особенно активно происходит в тропическом поясе, где ежегодно возникают десятки мощных вихревых возмущений, именуемых тропическими циклонами

ТАБЛИЦА 1

Накопленные с нарастающим итогом показатели мирового производства энергии, выбросов парниковых газов, тепловой энергии в климатической системе Земли и количества спровоцированных глобальным потеплением катастрофических СМ-событий [11]

Годы	Накопленное производство техногенной энергии, $\times 10^{12}$ кВт $\times$ ч	Накопленные в атмосфере выбросы парниковых газов М, $\times 10^9$ т, CO ₂ -экв/CO ₂	Накопленная тепловая энергия Q в климатической системе, $\times 10^{15}$ кВт $\times$ ч	Накопленный рост среднегодовой температуры атмосферы, °С	Количество катастрофических СМ-событий в год
1950	1525	340/260	22,5	—	8
1960	1875	410/295	29,7	0,20	17
1970	2425	500/370	38,5	0,34	36
1980	3215	615/464	49,0	0,50	67
1990	4190	763/584	63,5	0,66	103
2000	5310	914/712	82,4	0,83	120
2010	6650	1085/864	110,8	1,01	119
2020	8300	1304/1056	144,0	1,20	114

[7], размеры которых рассчитываются с помощью формулы Л. Прандтля [6]. Типичный размер тропического циклона в поперечнике превышает 2000 км, а внетропического циклона на широте 40° порядка 320 км. В среднем тропический циклон в активной фазе существует 5,6 сут, имеет среднюю скорость ветра 33,2 м/с и перемещается по поверхности планеты как единая система со средней скоростью 20 км/ч.

Циклоны, как крупномасштабная разновидность конвекции в атмосфере, способствует ускоренному переносу накопившегося избыточного тепла в одном месте КС в другие регионы Земли. На рис. 2 приводятся графики изменения количества катастрофических СМ-событий и гидрологических бедствий, вызванных хозяйственной деятельностью человека [11]. По

РИС. 2.

Изменение во времени частоты возникновения: 1 — катастрофических спровоцированных метеорологических событий; 2 — гидрологических стихийных бедствий

мере роста массы выбросов в атмосферу парниковых газов и аккумулированной тепловой энергии частота СМ-событий возрастала вплоть до 2000 г., когда количество СМ-событий стабилизировалось на уровне около 120 в год.

После 2000 г. на Земле ежегодно отмечалось 110–120 катастрофических СМ-событий и их дальнейшего количественного роста не наблюдалось. Можно предположить, что к настоящему времени пространственно-временной ресурс планеты Земля, необходимый для формирования большего числа, чем 120 мощных СМ-событий в год исчерпан. Эту ситуацию можно сравнить с вхождением мощных турбулентных потоков в автомоделный режим течения, когда коэффициент сопротивления течению перестает зависеть от числа Рейнольдса [6]. В сложившихся на планете Земля условиях климатической системе легче сбрасывать накопленную тепловую энергию не через ежегодное формирование дополнительных сверх 120 СМ-событий, а через уже действующие СМ-события.

На рис. 3 приводятся графики роста накопленной в климатической системе Земли тепловой энергии в зависимости от содержания в атмосфере массы ПГ. Кривая 1 фактического роста накопленной тепловой энергии имеет три характерных участка. На первом участке графика от начала индустриальной эпохи до 1950 г. происходил медленный рост накопленной в КС тепловой энергии. В 1950 г. кривая претерпела излом и далее до 2000 г. «производительность» каждой тонны ПГ по передаче тепловой энергии Мировому океану увеличивалась. В этот период происходило увеличение горизонтального турбулентного переноса тепла за счет появления мощных СМ-событий. В 2000 г. кривая роста претерпела второй излом, вслед за которым «активность» ПГ ещё более усилилась. Линия

2 отражает базовый рост накопленной КС тепловой энергии, происходящий без участия СМ-событий. Область, заключенная между кривыми 1 и 2, определяет вклад СМ-событий в потепление климатической системы.

Сведенные в табл. 1 натурные данные позволяют рассчитать фактическое значение тепловой энергии q , передаваемой климатической системе Земли одной тонной парниковых газов (ПГ) в единицу времени. Значение q определяется с помощью следующего отношения:

$$q = \Delta Q / M \text{ (кВт} \times \text{ч / т CO}_2\text{-экв} \times \text{год)}, \quad (2)$$

где ΔQ (кВт×ч) – количество тепловой энергии, накопленной КС Земли за рассматриваемый период времени; M (т CO₂-экв) – средняя масса накопленных антропогенных ПГ, содержащихся в атмосфере в рассматриваемый период времени.

Показатель q определяет реальную интенсивность передачи тепловой энергии парниковых газов климатической системе Земли с учетом всех сопровождающих процессов. Значение показателя q характеризует баланс «теплопроизводящих» свойств парниковых газов, «теплопередающих» свойств атмосферы и одновременно с этим «телопринимаяющих» свойств Мирового океана, суши и атмосферы. В табл. 2 приводятся результаты расчетов показателя q и доли $n\%$ тепловой энергии, остающейся в атмосфере в каждом акте теплообмена с Мировым океаном. Здесь отмечается важная особенность процесса теплообмена – в каждом акте теплообмена с океаном доля тепла, которая оставалась в атмосфере, уменьшалась с 2,5 до 0,86%. После 2010 г. атмосфера оставляет себе постоянную долю $n = 0,86\%$ от каждой порции передаваемого Мировому океану тепла.

В изменении показателя q от начала индустриальной эпохи, как и на рис. 3, выделяются три периода. В период с 1850 по 1940 гг. в атмосфере практически не

отмечалось наведенных человеческой деятельностью СМ-событий и дополнительного турбулентного переноса парникового тепла, поэтому в соответствии с (2) среднее значение показателя q оставалось постоянным $q = 1,32 \times 10^3$ кВт×ч/т×год.

В 1950 г., когда КС накопила около 23×10^{15} кВт×ч тепловой парниковой энергии, стали отмечаться редкие СМ-события с периодичностью около 30 суток, вследствие чего значение q резко увеличилось до $1,86 \times 10^3$ кВт×ч/т CO₂-экв×год. В период с 1950 г. по 2000 г. значение показателя q постепенно увеличивалось до $2,25 \times 10^3$ кВт×ч/т CO₂-экв×год. Наблюдаемое увеличение q в этом периоде в основном вызвано усилением горизонтального турбулентного переноса тепла за счет более частых СМ-событий, которые являются факторами положительной обратной связи.

РИС. 3.

Рост накопленной климатической системой тепловой энергии в зависимости от содержания в атмосфере парниковых газов: 1 – фактический рост накопленной тепловой энергии; 2 – базовый рост без участия СМ-событий

ТАБЛИЦА 2.

Натурные и расчетные показатели основных процессов и явлений, происходивших в климатической системе Земли в период 1950–2020 гг.

Годы	Увеличение содержания тепла в КС, $\Delta Q \times 10^{15}$ кВт×ч	ΔT , град	Увеличение содержания тепла в атмосфере $\Delta A \times 10^{15}$ кВт×ч	Доля тепла, остающегося в атмосфере $\Delta A / \Delta Q$, %	Масса парниковых газов M т, $\times 10^9$ т CO ₂ -экв	Интенсивность передачи тепла $q \times 10^3$ кВт×ч/т×год
1950–1960	7,1	0,120	0,178	2,52	378	1,86
1960–1970	8,6	0,145	0,215	2,48	460	1,87
1970–1980	10,5	0,160	0,237	2,26	554	1,91
1980–1990	14,5	0,165	0,244	1,69	690	2,07
1990–2000	18,9	0,170	0,252	1,33	838	2,25
2000–2010	28,4	0,185	0,274	0,98	1000	2,84
2010–2020	34,0	0,196	0,293	0,86	1184	2,84

В 2000 г., когда КС накопила энергию в количестве около 83×10^{15} кВт·ч, каждое очередное СМ-событие происходило уже с периодичностью 3 сут. Таким образом, во второй половине XX века участвовавшие СМ-события активно разносили тепловую энергию ПГ по земной поверхности.

После 2000 г. СМ-события формируются каждые 3 суток и непрерывно разносят тепловую энергию по земной поверхности. В период 2000–2010 гг. произошло резкое увеличение показателя q с 2,25 до $2,84 \times 10^3$ кВт·ч/т·год при практически постоянном количестве СМ-событий в год.

Феномен относительной стабилизации количества СМ-событий на уровне 120 в год объясняется переходом системы «атмосфера–Мировой океан» в новое качество. После 2000 г. климатическая система не расходует времени и энергии на формирование дополнительных сверх 120 СМ-событий в год, а отдает избыточную «парниковую энергию» уже действующим СМС, часть которых при периодичности появления 3 суток и средней продолжительности жизни около 6 суток постоянно присутствуют на Земле.

После 2000 г. атмосфера за счет активной циклонической деятельности увеличила свои возможности по переносу тепловой энергии парникового эффекта по земной поверхности и передаче её Мировому океану. Расчеты показывают, что в 2000 г. климатическая система принимала 18% ($0,46$ Вт/м²) из $2,87$ Вт/м² отраженной парниковыми газами (ПГ) радиации, а в 2010 г. принимала уже 24% ($0,70$ Вт/м²) мощности отраженной радиации ПГ. В 2010 г. интенсивность горизонтального турбулентного переноса парникового тепла СМ-событиями и соответствующее значение показателя $q = 2,84 \times 10^3$ кВт·ч/т CO₂-экв·год вышли на максимум.

Глобальное потепление увеличивает площадь Мирового океана с поверхностной температурой воды 27° С, количество термических депрессий и зон пониженного давления, которые необходимы для возникновения тропических циклонов [7]. После 2000 г. нагревшаяся климатическая система стала усиливать тепловой энергией действующие СМ-события, количество которых установилось на уровне около 120 в год. Можно предположить, что при дальнейшем увеличении парникового эффекта и глобального потепления энергия СМ-событий будет возрастать в основном за счет продолжительности их жизненного цикла. Можно также предположить, что по мере дальнейшего роста накопленной в КС тепловой энергии отдельные долгоживущие тропические и внетропические циклоны будут плавно переходить один в другой и в будущем формировать постоянно действующие циклоны, как это наблюдается, например, на горячей Венере.

Отмеченные энергетические особенности переноса и передачи тепловой энергии парниковых газов климатической системе Земли позволяют вывести

«формулу глобального потепления», с помощью которой можно рассчитывать рост средней глобальной температуры как функцию массы содержащихся в атмосфере парниковых газов.

Наблюдаемые постоянные после 2010 г. значения показателя q и доли остающегося в атмосфере парникового тепла $n\%$ позволяет рассчитывать нагревание атмосферы от действия парниковых газов за период времени Δt :

$$\Delta T = (nq/mc_p) \times M \times \Delta t, \quad (3)$$

где M (т CO₂-экв.) – среднее значение массы парниковых газов в атмосфере в расчетный период времени; m – масса атмосферы (т); $c_p = 0,286$ кВт·ч/т·град – теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Выражение в скобках в формуле (3) является константой, равной $16,5 \times 10^{-15}$ град/год·т CO₂-экв., полученной с использованием натуральных данных и учитывающей особенности глобального теплообмена в системе «атмосфера–Мировой океан». При прогнозном расчете глобального потепления на длительный срок удобно пользоваться периодом времени $\Delta t = 10$ лет. В таком случае повышение температуры атмосферы за любой 10-летний период времени определяется следующим выражением:

$$\Delta T = 16,5 \times 10^{-14} \times M \text{ (град/10 лет)}, \quad (4)$$

где M (т CO₂-экв.) – среднее значение массы парниковых газов в атмосфере в расчетном 10-летнем периоде времени.

Прогнозное повышение температуры атмосферы за несколько расчетных 10-летних периодов i определяется суммированием:

$$T_i = (16,5 \times 10^{-14} \times \sum M_i + T_0) \text{ град}. \quad (5)$$

Здесь слагаемое T_0 – средняя температура глобального потепления от действия парниковых газов в году, который является отправным в прогнозном расчете потепления климата. Например, $T_0 = 1,2^\circ \text{С}$, если в качестве отправного взять 2020 г.

В случае прекращения выбросов в атмосферу и достижения углеродной нейтральности время перехода климатической системы к равновесному термодинамическому состоянию t определяется с помощью зависимостей (1), (4) и (5). Результирующее расчетное выражение выглядит следующим образом:

$$t_{\max} = 10 (T_{\max} - T_i) / \Delta T \text{ (годы)}. \quad (6)$$

Здесь разность температур $(T_{\max} - T_i)$ определяет нереализованный «нагревательный потенциал» парниковых газов к моменту прекращения выбросов, а знаменатель ΔT определяет соответствующую этому

моменту скорость нагревания атмосферы (град/10 лет). По истечении времени t парниковые газы реализуют весь свой потенциал, после чего климатическая система приходит в условно равновесное термодинамическое состояние.

Если на момент прекращения выбросов ПГ известны исходные значения температуры потепления T_0 и массы M_0 парниковых газов в атмосфере, то время t , оставшееся до выхода на стационарный режим теплообмена в системе «атмосфера–океан», определяется следующей зависимостью:

$$t_{\max} = (200 - 61 \times 1012 \times T_0 / M_0) \text{ (годы)}. \quad (7)$$

Например, если бы человечество прекратило выбросы ПГ в атмосферу в 2020 г., когда температура потепления $T_0 = 1,2^\circ \text{C}$, а масса парниковых газов в атмосфере $M_0 = 1304 \times 10^9$ т CO_2 -экв., то глобальное потепление продолжалось бы еще 144 года вплоть до 2164 г., а температура атмосферы в соответствии с (1) поднялась бы до $4,3^\circ \text{C}$.

В качестве примеров выполнены расчеты глобального потепления для четырех случаев «нулевых выбросов». Первый вариант расчета состоит в предположении, что человечество прекратило выбросы ПГ в 1980 г., второй вариант – в 2020 г., третий вариант – в 2060 г., четвертый – в 2100 г. Исходные данные для расчетов приводятся в табл. 3, а промежуточные и окончательные результаты приводятся в табл. 4.

Если бы человечество прекратило выбросы ПГ в 1980 г., то глобальное потепление от этого адаптивного шага не остановилось бы, а продолжалось в соответствии с графиком 2 на рис. 1, потому что парнико-

вые газы к этому времени не успели реализовать свой «нагревательный потенциал». В этом гипотетическом случае декарбонизации термодинамическое равновесие в климатической системе наступило бы только в 2076 г. при общем нагревании земной атмосферы до $2,04^\circ \text{C}$ (кривая 3 рис. 4).

В настоящее время страны всего мира ставят перед собой амбициозные цели по достижению к 2050–2060 гг. «углеродной нейтральности». В 2020 г. на диоксид углерода приходилось около 38 млрд т выбросов, из которых почти половина поглощается океаном и земной растительностью, поэтому в исходных данных для расчета принималось следующее условие: для достижения углеродного баланса в системе «выбросы – сток» достаточно снизить глобальные выбросы CO_2 на 20 млрд т/год. В процессе выполнения подобной программы декарбонизации содержание CO_2 в атмосфере увеличится к 2060 г. до 1456 млрд т (табл. 3), общее содержание ПГ в атмосфере увеличится до 1810×10^9 т CO_2 -экв., а температура достигнет $2,26^\circ \text{C}$. После достижения углеродной нейтральности в 2060 г. глобальное потепление будет продолжаться еще 124 года, а средняя температура атмосферы достигнет $5,96^\circ \text{C}$.

Если человечество предпримет меры по стабилизации выбросов ПГ к 2100 г., то после этого потепление климата будет происходить до 2217 г. с повышением глобальной температуры до $9,23^\circ \text{C}$. Из графиков рис. 4 видно, что предусмотренные Парижским соглашением меры позволят к 2100 г. снизить глобальное потепление примерно на $0,5^\circ \text{C}$, зато в будущем эти меры снизят потепление климата на $3,27^\circ \text{C}$ (табл. 4).

ТАБЛИЦА 3

Реальное (2000–2020 гг.) и расчетное количество содержащихся в атмосфере антропогенных ПГ на протяжении XXI века при сохранении современных темпов выбросов, а также при снижении в два раза выбросов к 2060 г.

Годы	Накопленные в атмосфере ПГ при сохранении современных выбросов, $\times 10^9$ т CO_2 -экв/т CO_2	Накопленные в атмосфере ПГ при сокращении выбросов, $\times 10^9$ т CO_2 -экв/т CO_2	Накопленные в атмосфере ПГ без CO_2 , $\times 10^9$ т CO_2 -экв	Накопленный в атмосфере метан, $\times 10^9$ т	Накопленная в атмосфере закись азота, $\times 10^9$ т
2000	914/712	914/712	202	3,132	0,440
2010	1086/864	1086/864	222	3,219	0,504
2020	1304/1056	1304/1056	248	3,445	0,584
2030	1505/1230	1506/1231	275	3,700	0,656
2040	1700/1400	1650/1356	300	3,930	0,728
2050	1897/1570	1798/1431	327	4,200	0,800
2060	2094/1740	1810/1456	354	4,500	0,872
2070	2292/1910	1838/1456	382	4,850	0,944
2080	2490/2080	1866/1456	410	5,170	1,016
2090	2689/2250	1895/1456	439	5,550	1,088
2100	2888/2420	1924/1456	468	5,880	1,160

ТАБЛИЦА 4.

Расчетные параметры глобального потепления для четырех случаев прекращения антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу Земли

Год прекращения выбросов ПГ	Содержание антропогенных ПГ в атмосфере, $\times 10^9$ т CO_2 -экв.	Текущее антропогенное нагревание атмосферы, град.	Темп парникового нагревания атмосферы, $^\circ\text{C}/\text{год}$	Предельное парниковое нагревание атмосферы, град.	Год достижения стабилизации температуры
1980	615	0,50	0,0160	2,04	2076
2020	1304	1,20	0,0196	4,30	2164
2060	1802	2,26	0,0296	5,96	2184
2100	2888	3,92	0,0454	9,23	2217

РИС. 4.

Рост глобальной температуры от воздействия антропогенного парникового эффекта: 1 – при сохранении современного уровня глобальных выбросов парниковых газов; 2 – при достижении целей Парижского соглашения; 3 – при гипотетическом достижении углеродной нейтральности в 1980 г.

Таким образом, эффект от антропогенного увеличения содержания ПГ в атмосфере является отложенным во времени. Аналогично, любое снижение величины поглощенной парниковыми газами тепловой энергии не вызывает мгновенного падения температуры атмосферы и земной поверхности. Последствия сокращения выбросов ПГ можно будет увидеть только через много лет. Современное развитие климатических событий не соответствует долгосрочным целям Парижского соглашения и ожидаемое глобальное потепление заметно повлияет на образ жизни многих народов.

ВЫВОДЫ

Спровоцированные глобальным потеплением мощные СМ-события (циклоны, ураганы, шторма) являются фактором положительной обратной связи, так как активизируют горизонтальный турбулентный перенос тепловой энергии, усиливая тем самым действие антропогенного парникового эффекта.

Можно предположить, что к настоящему времени пространственно-временной ресурс планеты Земля по формированию большого количества, чем 120 мощных СМ-событий в год исчерпан. После 2000 г. климатическая система не расходует тепловой энергии на формирование дополнительных сверх 120 мощных СМ-событий в год, а передает избыточную «парниковую энергию» действующим СМ-событиям, часть которых при периодичности появления 3 суток и средней продолжительности около 6 суток постоянно присутствует на Земле.

При рассмотрении процесса глобального потепления удобно пользоваться интегральным показателем q (2), характеризующим фактическую интенсивность передачи тепловой энергии парниковых газов климатической системе Земли.

В 2000 г. климатическая система принимала 18% ($0,46 \text{ Вт}/\text{м}^2$) мощности отраженной парниковыми газами радиации, а в 2010 г. увеличила свои возможности по переносу парниковой тепловой энергии по земной поверхности до 24% ($0,70 \text{ Вт}/\text{м}^2$) мощности отраженной радиации парниковых газов.

Повышение температуры атмосферы после 2010 г. является функцией массы накопленных выбросов парниковых газов и может быть рассчитано с помощью «формулы глобального потепления» (5).

В современных условиях на Земле потенциал одной тонны антропогенных ПГ по нагреванию атмосферы представляет собой константу $\Pi = 3,3 \times 10^{-12}$ град/т CO_2 -экв. В случае прекращения выбросов в атмосферу парниковых газов и достижения «углеродной нейтральности» время выхода климатической системы к равновесному термодинамическому состоянию определяется с помощью выражений (6) и (7).

При достижении целей Парижского соглашения атмосфера к 2060 г. нагреется до $2,26^\circ\text{C}$, при этом в дальнейшем глобальное потепление продолжится вплоть до 2185 г., а атмосфера к тому времени нагреется до температуры 6°C . Можно заключить, что современное развитие климатических событий не соответствует долгосрочным целям Парижского соглашения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **БАЖИН Н.М.** Метан в окружающей среде. Новосибирск: СО РАН. 2010. 56 с.
2. **БЕЗРУКОВ Ю.Ф.** Океанология. Ч. 1. Физические явления и процессы в океане. Симферополь: ТНУ. 2006. 162 с.
3. **БУДЫКО М.И.** Климат в прошлом и будущем. М.: Гидрометеиздат. 1980.
4. **ИВАЩЕНКО О.В.** Потепление климата – каким оно будет. (Электронный ресурс) – режим доступа: <http://www.poteplenie.ru/problem/oi-1-2.htm>.
5. **ПАЧАУРИ Р.К., МЕЙЕР Л.А.** (основная группа авторов) МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК. Женева. Швейцария, стр. 44.
6. **ПРАНДЛЬ Л.** Гидроаэромеханика. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2002. 572 с.
7. **СИДОРОВА Л.П.** Метеорология и климатология. Часть 1. Екатеринбург: ФГАО УВПО УрФУ. 2015. <http://www.urfu.ru>.
8. **СИЛВЕР ДЖ.** Глобальное потепление без тайн (пер. с англ.). М.: Эксмо. 2009. 336 с.
9. **ТЕТЕЛЬМИН В.В., ПИМАШКОВ П.И.** Биосфера и человек. Глобальное потепление. М.: ЛИБРОКОМ, 2021. 336 с.
10. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Физика и проблемы антропогенного изменения климата // Вестник РАЕН. 2019. №4. С. 29–35.
11. **ТЕТЕЛЬМИН В.В.** Современная энерго-климатическая история цивилизации / Гидротехника. 2021. №3. С. 42–46.
12. Центр новостей ООН. www.un.org/russian/news.
13. EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The International Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain).
14. Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>.
15. IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation 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. United Kingdom and New York, NY USA. 1132 p.

REFERENCES

- BACHIN N.B.** Methane in the environment. Novosibirsk: SO RAN. 2010:56. (In Russian).
- BEZRUKOV U.F.** Oceanology. Part 1. Physical phenomena and processes in the ocean. Simferopol: TNU. 2006:162. (In Russian).
- BUDIKO M.I.** Climate past and future. Moscow. Gidrometeoizdat. 1980. (In Russian).
- IVASCHENKO O.V.** Climate warming – what will it be. Rechzim dostupa <http://www.poteplenie.ru/problem/oi-1-2.htm>. (In Russian).
- PACHAURI R.K., MEYER L.A.** (main group of authors). MGEIK. 2014: Changing of the climate, 2014. Obobschenni doklad. Vklad rabochih grupp I, II, III v 5 ozenochnii doklad MGEIK. Zeneva. Schweizaria. 44. (In Russian).
- PRANDTL L.** Hydroaeromechanics. Moskva-Izhevsk: NIZ. 2002:572. (In Russian).
- SIDOROVA L.P.** Meteorology and climatology. Ekaterinburg: FGAO UVPO UrFU. 2015. <http://www.urfu.ru>. (In Russian).
- SILVER D.** Global warming without secrets Moscow: Eksmo. 2009:336. (In Russian).
- TETELIN V.V., PIMASCHKOV P.I.** Biosphere and man. Global warming. Moscow: LIBROCOM. 2021. 336. (In Russian).
- TETELIN V.V.** Physics and problems of anthropogenic climate change. *Vestnik RAEN*. 2019. 4:29–35. (In Russian).
- TETELIN V.V.** Modern energy-climatic history of civilization. *Gidrotehnika*. 2021;3:42–46. (In Russian).
- Zentr novostei OON. www.un.org/russian/news.
- EM-DAT, CRED/UC Louvain, Brussels, Belgium, www.emdat.be (D. Guha-Sapir) Version: 2020-06-15, The International Disaster Database (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), University of Louvain).
- Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>.
- IPCC. 2014 b. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation 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. United Kingdom and New York, NY USA. 1132.

Тетельмин Владимир Владимирович,
д.т.н., профессор Российского университета дружбы на-
родов, член Общественного совета при Минэнерго РФ

✉ 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6,
117198, Moscow, st. Miklukho-Maklaya, 6
v-tetelmin@rambler.ru