

Экологический контроль, прогнозирование

УДК 621.22

DOI: 10.52190/2073-2589_2022_3_34

EDN: SENMCE

Аналитический расчет глобального потепления

В. В. ТЕТЕЛЬМИН, д-р техн. наук

Общественный совет при Минэнерго РФ, Москва, Россия

Проведен количественный анализ особенностей накопления атмосферой и климатической системой Земли тепловой энергии антропогенных парниковых газов (ПГ). Получены и рекомендуются к использованию зависимости для определения максимальной температуры глобального потепления и времени достижения климатической системой Земли состояния радиационного баланса как функции содержания в атмосфере антропогенных парниковых газов. Получено значение содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере 880 ppm-eq, при котором может произойти "парниковое насыщение" климатической системы Земли. Предложен алгоритм аналитического расчета динамики и пределов глобального потепления при различных сценариях изменения мировых выбросов парниковых газов. Выполнены прогнозные расчеты динамики глобального потепления для двух вероятных сценариев изменения содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере после 2020 г.

Ключевые слова: глобальное потепление, парниковые газы, радиационный баланс, тепловая энергия.

Климатическая система Земли в течение последних 150 лет выводится из состояния термодинамического равновесия за счет нарастающих антропогенных выбросов парниковых газов. Современные годовые выбросы мировой экономикой трех основных парниковых газов следующие: диоксида углерода CO_2 — около 40 млрд т; метана CH_4 — около 330 млн т; закиси азота N_2O — 8,2 млн т. Зависимость современной цивилизации привела к выбросу в атмосферу более 2-х трлн т CO_2 , из которых около половины усваивает растительность планеты и Мировой океан (МО), а вторая половина аккумулируется атмосферой. Каждый кВт·ч произведенной человечеством антропогенной энергии инициирует накопление в климатической системе (КС) Земли около 16 кВт·ч парниковой тепловой энергии [1]. Несмотря на предпринимаемые человечеством защитные действия, к 2020 г. скорость роста концентрации CO_2 в атмосфере превысила 2 ppm/год, а наблюдаемая аномалия глобального потепления составила примерно 1,2 °C.

Происходящие климатические изменения беспрецедентны как по скорости событий, так и по их глобальному охвату. Каждые 10 лет в мире происходит потепление на 0,18 °C, в России — на 0,45 °C, а в Арктической зоне — на 0,75 °C. Парижское соглашение является международным документом, нацеленным на борьбу с глобальным потеплением, допускающим повышение средней глобальной температуры к 2050 г., не более чем на 2 °C по сравнению с доиндустриальным уровнем.

Автором была поставлена задача получить аналитическое решение, позволяющее рассчитывать темп и пределы глобального потепления при любом сценарии антропогенных выбросов парниковых газов в атмосферу. Искомое решение получено на основе анализа следующих натуральных данных:

- кривая роста средней глобальной температуры атмосферы, заметный рост которой начался с 1910 г. и с некоторыми остановками продолжается до настоящего времени [2];
- кривая роста парниковой тепловой энергии [3–5], накопленной климатической системой Земли в период с 1970 по 2010 г.;
- ход изменения глобальной температуры и концентрации CO_2 в палеоатмосфере Земли в последний ледниковый период [6–8].

Тетельмин Владимир Владимирович, профессор.

E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2022 г.

© Тетельмин В. В., 2022

При разработке алгоритма аналитического расчета динамики глобального потепления предварительно получены решения ряда следующих частных задач: получены функции максимальной (радиационно-равновесной) температуры нагревания атмосферы в зависимости от содержания в ней антропогенных парниковых газов [9]; получены эмпирические значения показателя, определяющего количество тепловой энергии, которую ежегодно передает МО одна тонна парниковых газов [10].

В дальнейшем содержание ПГ в атмосфере приводится в единицах, приведенных к эквиваленту CO₂: к эквиваленту массы (т-ек) и к эквиваленту объемного содержания (ppm-ек). При этом использовались следующие значения потенциала глобального потепления (GWP): 28 для метана CH₄ и 260 для закиси азота N₂O.

На рис. 1 приведен рассчитанный и построенный с использованием различных источников [2, 11—14] график изменения содержания антропогенных ПГ в атмосфере с 1900 по 2020 гг. После 2020 г. расчет глобальных выбросов выполнен с учетом их сокращения в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения, а также с учетом "старения" и ухода из атмосферы половины содержания диоксида углерода CO₂ и всей массы закиси азота N₂O при достижении ими возраста 120 лет [15]. При этом принято, что к 2100 г. совокупная масса антропогенного метана и закиси азота в атмосфере увеличится до 468·10⁹ т-ек. В будущем эта цифра может увеличиться по причине происходящего потепления климата и усиления эффектов положительной обратной связи, например, за счет увеличения выбросов метана из-за активизации биохимических процессов в умеренных широтах и деградации вечномёрзлых грунтов и газогидратов Арктической криолитозоны.

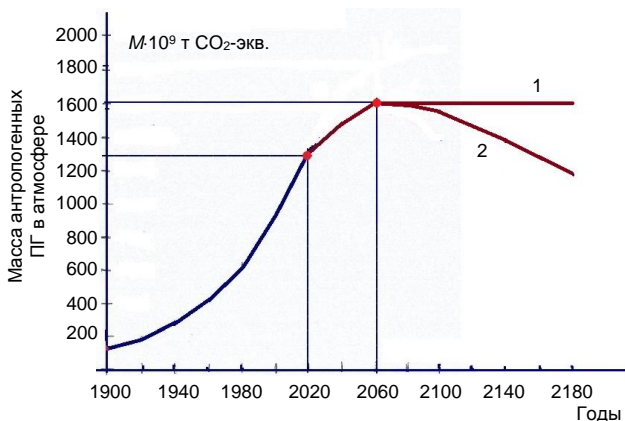


Рис. 1. Изменение содержания антропогенных ПГ в атмосфере с учетом сокращения глобальных выбросов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения, а также с учетом "старения" и ухода из атмосферы половины содержания CO₂ и всей массы N₂O при достижении возраста 120 лет:
 1 — содержание ПГ после 2060 г. остается постоянным;
 2 — содержание ПГ после 2060 г. уменьшается за счет ухода "старяющихся" ПГ

Сила воздействия единицы массы ПГ на глобальное потепление зависит от их концентрации в атмосфере. При этом спектры поглощения отдельных ПГ частично пересекаются, поэтому поглощение отра-

женного земной поверхностью ИК-излучения смесью ПГ не обладает свойством аддитивности. По мере насыщения атмосферы парниковыми газами радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается [16, 17]. 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 CO₂ оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу этим газом за излучение в диапазоне длин волн 4,0—4,4 мкм и 14—19 мкм.

Каждому содержанию ПГ в атмосфере соответствует своя предельная температура глобального потепления, соответствующая радиационно-равновесному состоянию климатической системы (КС) Земли. В работе [9] приводится вывод аналитической зависимости максимальной радиационно-равновесной температуры T_{max} как функции содержания в атмосфере антропогенных ПГ. Эта зависимость получена с использованием свойства тесной корреляции между глобальной квазистационарной температурой и концентрацией ПГ в доиндустриальной атмосфере и палеоатмосфере Земли [6—8].

При современных параметрах орбиты Земли и значении солнечной постоянной $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$ температура максимального глобального потепления, вызванная действием трех основных антропогенных парниковых газов (ПГ), определяется следующим выражением [9]:

$$T_{max} = (29,8 \cdot 10^{-3} \cdot K - 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 - 9,4), \text{ град.} \quad (1)$$

где K (ppm-ек) = $(370 + K_A)$ — общая объемная концентрация присутствующих в атмосфере трех основных парниковых газов;

K_A — объемная концентрация (ppm-ек) антропогенных ПГ в атмосфере;

9,4 °C — радиационно-равновесная температура атмосферы в доиндустриальную эпоху при объемной концентрации трех основных ПГ 370 ppm-ек.

Эта же температура может быть определена как функция общей массы трех основных ПГ в атмосфере [9]:

$$T_{max} = (3,8 \cdot 10^{-12} \cdot M - 0,2 \cdot 10^{-24} \cdot M^2 - 9,4) \text{ град.} \quad (2)$$

где M (т-ек) = $(2,9 \cdot 10^{12} + M_A)$ — общая масса присутствующих в атмосфере трех основных парниковых газов;

M_A — масса (т-ек) антропогенных ПГ в атмосфере;

9,4 °C — радиационно-равновесная температура атмосферы в доиндустриальную эпоху при содержании в атмосфере массы ПГ $2,9 \cdot 10^{12}$ т-ек.

Максимальная радиационно-равновесная температура, к которой через продолжительное время приходит земная атмосфера, определяется нелинейным уравнением параболического типа (рис. 2). Исследуя функции (1) и (2) на экстремум, получаем значения

содержания антропогенных ПГ, при которых наступает "парниковое насыщение" атмосферы: $K_{\text{НАС}} = 880$ ppm-eq и $M_{\text{НАС}} = 6,8 \cdot 10^{12}$ т-eq. Этим значениям содержания ПГ в атмосфере соответствует максимальная радиационно-равновесная температура (максимальная температура глобального потепления) от действия трех антропогенных парниковых газов $T_{\text{НАС}} = 9,2$ °С. Это максимально возможный вклад трех основных антропогенных ПГ в глобальное потепление. На рис. 2 приводится график зависимости максимального глобального потепления от содержания в атмосфере антропогенных ПГ. При увеличении концентрации $K_A > 880$ ppm-eq или массы накопленных в атмосфере антропогенных выбросов $M_A > 6,8 \cdot 10^{12}$ т-eq атмосфера потеряет "парниковую чувствительность" и перестанет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы ПГ.

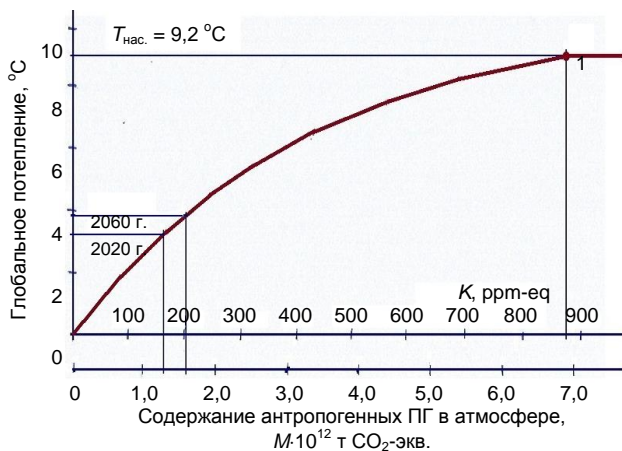


Рис. 2. График зависимости радиационно-равновесной температуры атмосферы (максимального глобального потепления) от содержания антропогенных ПГ

Значительная часть парниковой тепловой энергии передается КС нерадиационным путем за счет переноса тепла горизонтальными турбулентными потоками и контактного теплообмена атмосферы с поверхностью МО. Примерно 78 Вт/м^2 мощности лучистой энергии поступающей от Солнца, поглощается атмосферой, а 161 Вт/м^2 — земной поверхностью. Около 84 % переизлучаемой Землей тепловой энергии ПГ возвращают земной поверхности [18]. Тепловая энергия ПГ накапливается в КС примерно в таком соотношении: 94 % приходится на Мировой океан, 4,5 % на сушу и 1,0—1,5 % на атмосферу.

С использованием накопленных мировой наукой натуральных данных о термодинамических особенностях

глобального потепления [2—5] построена кривая роста парниковой тепловой энергии, накопленной климатической системой (КС) Земли в период с 1950 по 2020 гг. (рис. 3), а также выполнены расчеты и получены основные закономерности изменения параметров процесса глобального потепления [18]. К 2020 г. климатическая система Земли аккумулировала около $140 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, из которой порядка 94 % приходится на Мировой океан. В табл. 1 приведены натурные и расчетные показатели основных термодинамических процессов в КС Земли в период 1950—2020 гг.

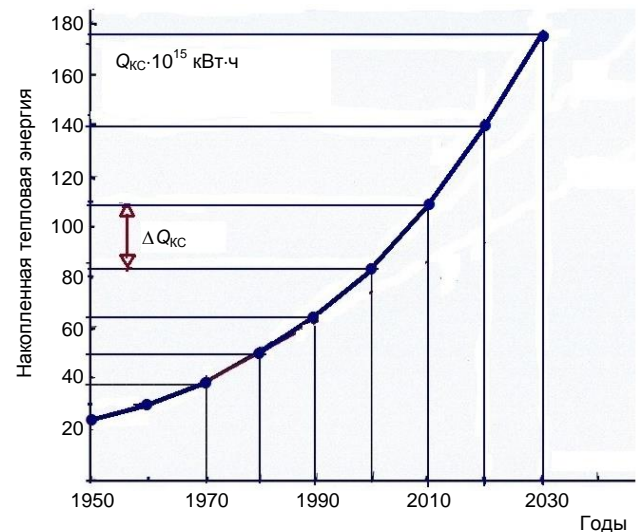


Рис. 3. Кривая роста парниковой тепловой энергии, накопленной КС Земли в период с 1950 по 2020 г. [10]

Из рис. 3 и данных табл. 1 следует, что течением времени и с увеличением содержания ПГ в атмосфере КС в каждом 10-летнем периоде получает всё большее количество парниковой тепловой энергии. Расчеты, в частности, показывают, что в период 1990—2000 гг. КС Земли принимала отраженную радиацию парниковых газов (ПГ) с интенсивностью $0,46 \text{ Вт/м}^2$, а после 2010 г. принимаемая КС мощность отраженной радиации возросла до $0,7 \text{ Вт/м}^2$ [10]. При этом доля N остающейся в атмосфере тепловой энергии в каждом последующем расчетном периоде уменьшается (табл. 1).

По данным табл. 1 построен график роста темпа накопления тепловой энергии климатической системой Земли как функция содержания в атмосфере антропогенных ПГ (рис. 4).

Таблица 1

Натурные и расчетные показатели основных термодинамических процессов в КС Земли в период 1950—2020 гг.

Годы	Увеличение содержания тепла в КС, $\Delta Q_{\text{КС}} \cdot 10^{15}$ кВт·ч	ΔT , град.	Увеличение содержания тепла в атмосфере, $\Delta Q_{\text{АТ}} \cdot 10^{15}$ кВт·ч	Доля тепла, остающегося в атмосфере, $N = \Delta Q_{\text{АТ}} / \Delta Q_{\text{КС}}$, %	Средняя масса антропогенных парниковых газов в атмосфере, $M_A \cdot 10^9$ т-eq
1950—1960	6,7	0,110	0,178	2,44	385
1960—1970	8,5	0,140	0,207	2,43	465
1970—1980	10,8	0,160	0,237	2,20	558
1980—1990	14,9	0,165	0,244	1,69	690
1990—2000	18,9	0,170	0,252	1,33	838
2000—2010	28,4	0,180	0,267	0,94	990
2010—2020	34,0	0,190	0,282	0,84	1164

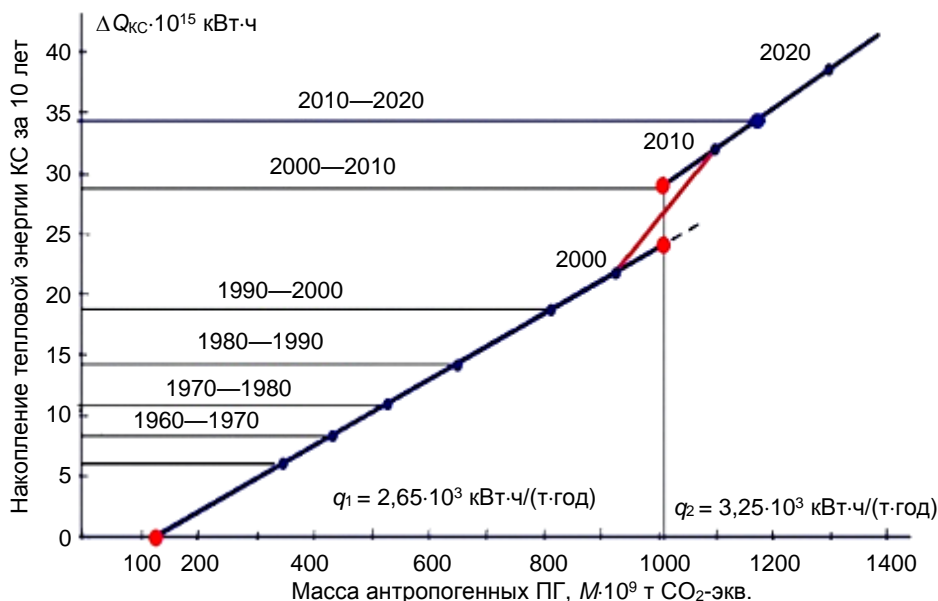


Рис. 4. Зависимость темпа накопления тепловой энергии климатической системой Земли от массы содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов

Этот график представляет собой результат инструментально измеренного воздействия на КС всех энергетических потоков на Земле, существовавших в период 1950—2020 гг., включая действие положительных и отрицательных обратных связей.

Все полученные до 2000 г. (до содержания $M_A = 10^{12}$ т-eq) экспериментальные точки ложатся на одну прямую с тангенсом угла наклона $q = 2,68 \cdot 10^3$ кВт·ч/т-eq·год. Эта величина представляет собой реальное количество полученной КС в течение года тепловой энергии от одной тонны ПГ. Из графика следует, что величина q определяется следующим отношением:

$$q = \frac{\Delta Q_{КС}}{(M_A - 125 \cdot 10^9) \Delta t} \text{ кВт·ч/(год·т-eq)}, \quad (3)$$

где $\Delta Q_{КС}$ (кВт·ч) — количество тепловой энергии, накопленной КС Земли за рассматриваемый период времени $\Delta t = 10$ лет;

M_A (т-eq) — среднее значение массы накопленных антропогенных ПГ, содержащихся в атмосфере в рассматриваемом периоде времени Δt .

Физический смысл показателя q заключается в том, что он является тепловой энергией, передаваемой КС одной тонной ПГ в течение одного года. Этот показатель аналогичен коэффициенту теплопередачи в теории теплопроводности и определяет реальную интенсивность передачи захваченной парниковыми газами тепловой энергии климатической системе с учетом всех сопровождающих энергетических процессов на Земле. Этот показатель характеризует баланс "теплопроизводящих" свойств ПГ, "теплопередающих" свойств атмосферы и одновременно с этим "теплопринимающих" свойств Мирового океана и суши. По данным натурных наблюдений (рис. 3) в период 1950—2000 гг. каждая тонна ПГ пе-

редавала МО в единицу времени постоянную величину тепловой энергии $q = 2,68 \cdot 10^3$ кВт·ч/(год·т-eq).

В 2000—2010 г. линейный график рис. 4 претерпел излом, свидетельствующий об усилении интенсивности нагревания МО парниковыми газами. В этот период произошло резкое увеличение накопленной климатической системой тепловой энергии на величину $28,4 \cdot 10^{15}$ кВт·ч и соответствующее увеличение показателя передачи парникового тепла до значения $q = 3,28 \cdot 10^3$ кВт·ч/(год·т-eq).

Резкое увеличение показателя q может быть объяснено переходом процесса теплового взаимодействия в системе "Атмосфера—Мировой океан" в новое качество. Это предположение подтверждается ростом синоптической частоты экстремальной морской жары в океанских бассейнах, которая также как и глобальная температура начала расти с 1910 г. [19]. С началом роста глобального потепления постоянно увеличивалась доля площади МО с наблюдаемыми волнами экстремальной морской жары. С 1998 г. волны жары стали нормой для Южной Атлантики, с 2007 г. — для Индийского океана, а в 2019 г. волны жары наблюдались на 57 % поверхности МО [20]. Глобальное потепление увеличивает площадь МО с поверхностной температурой 27 °С, что увеличивает количество термических депрессий и зон пониженного давления, которые необходимы для возникновения мощных тропических циклонов. Теплая вода действует как мощный аккумулятор, из которого ураганы могут черпать энергию.

К 2000 г. частота спровоцированных глобальным потеплением тропических циклонов, как крупномасштабной разновидности горизонтальной конвекции в атмосфере, возросла до 110—120 в год и стабилизировалась на этом уровне [1, 17, 21—23]. Можно предположить, что к 2000 г. пространственно-временной ресурс планеты по ежегодному формированию более чем 120 мощных спровоцированных глобальным потеплением метеорологических событий (СМ-событий) исчерпан (рис. 5).

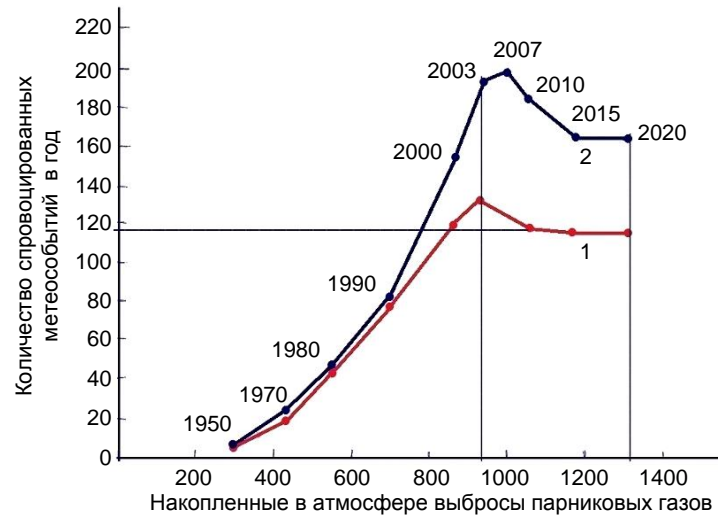


Рис. 5. Изменение во времени частоты возникновения:

1 — частоты возникновения спровоцированных метеорологических событий; 2 — гидрологических стихийных бедствий [15]

После 2000 г. климатическая система Земли не расходует времени и энергии на формирование дополнительных сверх 120 СМ-событий в год, а отдает накопленную в тропиках избыточную парниковую энергию уже действующим циклонам, которые при периодичности появления 3 суток и средней продолжительности жизни более 6 суток постоянно присутствуют на Земле.

Можно также предположить, что в процессе дальнейшего глобального потепления энергия спровоцированных глобальным потеплением циклонов будет возрастать за счет скорости ветра и продолжительности жизненного цикла этих СМ-событий. По мере дальнейшего роста накопленной в КС тепловой энергии отдельные долгоживущие тропические и внетропические циклоны могут плавно переходить один в другой и формировать постоянно действующие циклоны, как это наблюдается, например, на горячей Венере.

Постоянное значение удельной интенсивности теплопередачи $q = 3,28 \cdot 10^3$ кВт·ч/(год·т·eq) после 2010 г. позволяет рассчитывать количество парниковой тепловой энергии, накопленной климатической системой Земли в будущем за расчетный шаг по времени Δt .

$$\Delta Q_{КС} = q(M_A - 125 \cdot 110^9) \Delta t \text{ (кВт·ч)}, \quad (4)$$

где M_A (т·eq) — среднее значение содержания массы антропогенных ПГ в атмосфере на протяжении расчетного шага по времени Δt .

Натурные данные табл. 1 свидетельствуют о важной особенности процесса теплообмена атмосферы с Мировым океаном — об уменьшении доли N тепловой энергии, которая остается в атмосфере в каждом последующем 10-летнем акте теплообмена. Это происходит за счет того, что с повышением глобальной температуры усиливается горизонтальный конвективный теплоперенос, улучшаются транзитные свойства атмосферы по переносу полученной в тропическом поясе парниковой тепловой энергии в высокие широты. Кроме того, с повышением средней глобальной температуры увеличивается температурный

градиент между атмосферой и водной поверхностью МО, что увеличивает кондуктивную составляющую передачи тепла в месте их контакта.

С 1960 по 2010 гг. наблюдаемая доля N в 10-летних актах теплообмена между атмосферой и МО уменьшилась от 2,43 до 0,94 %. Из наблюдаемой закономерности следует, что в последующих после 2010 г. отдельных актах теплообмена между атмосферой и МО значение доли N будет уменьшаться. По мере дальнейшего роста глобального потепления и приближения температуры атмосферы к радиационно-равновесному значению T_{\max} доля N будет пошагово уменьшаться от известного начального значения $N_0 = 0,94$ % вплоть до нулевого значения.

Атмосфера (АТ) ввиду большой подвижности и малой теплоемкости основную часть парниковой тепловой энергии $\Delta Q_{КС}$ передает МО, оставляя себе незначительную часть N . В таком случае из (4) следует выражение для определения количества тепловой энергии, которое получает атмосфера на каждом расчетном шаге по времени Δt .

$$\Delta Q_{АТ} = N \Delta Q_{КС} = N q (M_A - 125 \cdot 10^9 m) \Delta t \text{ кВт·ч}. \quad (5)$$

Расчет глобального потепления выполняется с использованием метода последовательной смены стационарных состояний с шагом по времени $\Delta t = 10$ лет.

Атмосфера, получив за время Δt тепловую энергию (5), увеличит свою температуру на величину:

$$\Delta T_i = N_i q (M_A - 125 \cdot 10^9 m) \Delta t / m \cdot c_p, \text{ град}, \quad (6)$$

где M_A (т·eq) — среднее значение содержания массы антропогенных ПГ в атмосфере в пределах расчетного шага по времени Δt ;

$m = 5,18 \cdot 10^{15}$ т — масса атмосферы;
 $c_p = 0,286$ кВт·ч/(т·град). — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

В результате исходная температура атмосферы T_i увеличится на величину полученного приращения ΔT_i :

$$T_{i+1} = T_i + \Delta T_i. \quad (7)$$

При прогнозных расчетах глобального потепления задаются известными начальными (стартовыми) параметрами состояния атмосферы: объемная концентрация K_0 ppm-eq или масса M_0 т-eq содержащихся в атмосфере антропогенных парниковых газов, температура глобального потепления от действия антропогенных парниковых газов T_0 , доля (%) остающейся в атмосфере на первом шаге расчета парниковой тепловой энергии N_0 .

Было уже отмечено, что по мере приближения температуры атмосферы в течение времени t_{\max} к радиационно-равновесному значению T_{\max} доля N будет пошагово и линейно уменьшаться от известного начального значения N_0 до нулевого значения. В таком случае за время t_{\max} в течение всего процесса выхода КС к равновесному состоянию среднее значение доли остающегося в атмосфере тепла равно $N = 0,5N_0$.

Если масса ПГ в атмосфере остается постоянной в течение всего расчетного периода t_{\max} вплоть до достижения радиационно-равновесного состояния, то выражение (5) запишется следующим образом:

$$Q_{AT} = 0,5N_0 q (M_A - 125 \cdot 10^9 m) t_{\max}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (8)$$

При известном значении начальной температуры глобального потепления атмосферы T_0 количество парниковой тепловой энергии, которую получит атмосфера по достижении радиационно-равновесной температуры T_{\max} определяется следующим выражением:

$$Q_{AT} = (T_{\max} - T_0) m c_p (\text{кВт} \cdot \text{ч}). \quad (9)$$

Приравнявая (8) и (9), получим зависимость, определяющую продолжительность перехода КС к состоянию радиационного баланса как функцию содержащейся в атмосфере массы антропогенных ПГ:

$$t_{\max} = \frac{10^2 (T_{\max} - T_0) m c_p}{0,5N_0 q (M_A - 125 \cdot 10^9)} \text{ (годы)}, \quad (10)$$

где $q = 3,26 \cdot 10^3$ кВт·ч/т-eq·год;

N_0 — доля (%) тепловой энергии, получаемой атмосферой в первом расчетном 10-летнем шаге;

M_A — масса (т-eq) антропогенных ПГ в атмосфере.

Выражение (10) определяет продолжительность выхода земной атмосферы на радиационно-равновесную температуру как функцию приведенной массы антропогенных ПГ в атмосфере. Это же значение продолжительности может быть определено как функция объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере:

$$t_{\max} = \frac{10^2 (T_{\max} - T_0) m c_p}{0,5N_0 q (K_A - 16)} \text{ (годы)}, \quad (11)$$

где $q = 26 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/ppm-eq·год;

K_A — объемная концентрация (ppm-eq) антропогенных ПГ в атмосфере.

В каждом последующем акте передачи парниковой тепловой энергии Мировому океану и климатической системе в целом в атмосфере от количества тепла $\Delta Q_{КС}$ остаётся всё меньшая доля тепловой энергии. Зная продолжительность t_{\max} процесса выхода КС на радиационно-равновесный режим теплообмена, легко определить значение доли ΔN_i , на которую уменьшается N_i при переходе к каждому следующему расчетному шагу теплообмена с шагом по времени $\Delta t = 10$ лет: $\Delta N_i = 10N_i / t_{\max(i)}$. На каждом последующем шаге расчета доля N_i остающейся в атмосфере тепловой энергии ΔQ_{AT} будет уменьшаться в соответствии со следующим выражением:

$$N_{i+1} = N_i - 10N_i / t_{\max(i)}. \quad (12)$$

Расчет темпа глобального потепления выполняется с использованием метода последовательной смены стационарных состояний с шагом по времени 10 лет. Последовательность действий на первом шаге расчета такова.

1. Определяется T_{\max} (2);
2. Определяется t_{\max} (10);
3. Определяется ΔT_1 (6);
4. Определяется T_2 (7);
5. Определяется N_2 (12).

Далее в такой же последовательности выполняются все последующие шаги расчета. Расчет ведется до тех пор, пока кривая роста средней глобальной температуры T атмосферы не пересечется с кривой изменения во времени предельной радиационно-равновесной температуры T_{\max} (рис. 6).

Рассчитаем два конкретных случая темпа глобального потепления для двух случаев изменения содержания ПГ в атмосфере, приведенных на рис. 1. Начальные условия следующие: в период 2010—2020 г. среднее содержание антропогенных ПГ в атмосфере составляло $M_0 = 1,036 \cdot 10^{12}$ т-экв. ($K_0 = 131$ ppm-eq). Глобальное потепление составляло $T_0 = 1,16$ °С. Доля остающегося в атмосфере тепла (табл. 1) на первом шаге расчета $N_0 = 0,92$.

В первом случае расчет выполнен (табл. 2) для сценария сокращения глобальных выбросов ПГ в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения, когда содержание антропогенных ПГ к 2050 г. увеличится до $M_A = 1,6 \cdot 10^{12}$ т-eq ($K_A = 202$ ppm-eq), после чего содержание ПГ в атмосфере остается постоянным (график 1 рис. 1).

На рис. 6 этому случаю соответствует кривая 1 роста температуры. Точка пересечения кривой 1 с графиком хода радиационно-равновесной температуры 3 характеризует выход КС к состоянию радиационного баланса и стабилизации температуры атмосферы на уровне $T_{\max} = 3,7$ °С. Это событие произойдет примерно в районе 2190 г. Во втором случае расчет выполнен при сценарии сокращения содержания ПГ после 2060 г. за счет "старения" и ухода из атмосферы половины CO_2 и всего N_2O при достижении ими возраста 120 лет.

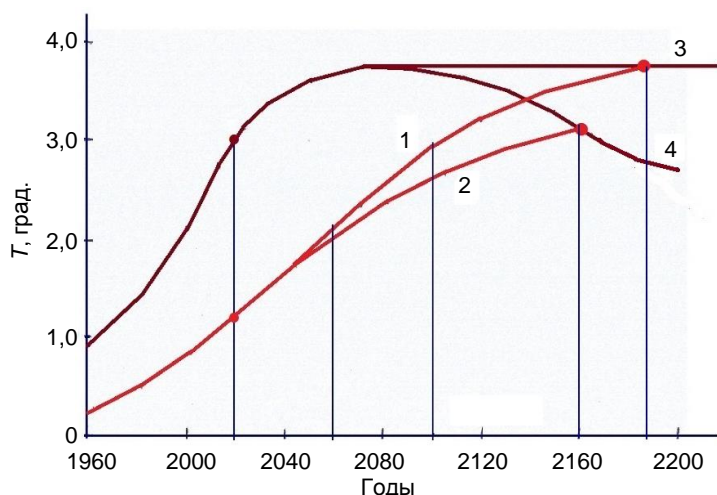


Рис. 6. Расчетные кривые глобального потепления после 2020 г.:

1 — рост температуры атмосферы при постоянном содержании ($M = 1,6 \cdot 10^{12}$ т-экв.) ПГ после 2060 г.;
2 — рост температуры при снижении содержания ПГ после 2060 г. за счет их "старения"; 3 — график изменения радиационно-равновесной температуры при постоянном содержании ПГ в атмосфере после 2060 г.; 4 — график изменения радиационно-равновесной температуры, соответствующий снижению содержания ПГ за счет их "старения" и ухода из атмосферы

Таблица 2

Результаты расчета глобального потепления при сценарии сокращения выбросов парниковых газов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения и постоянном содержании ПГ в атмосфере после 2060 г.

Годы	Масса ПГ, $M_A \cdot 10^{12}$ т-экв	T_{\max} , °C	ΔT_i , °C	T_{i+1} , °C	N_{i+1} , %
2010—2020	1,036	2,46	0,184	1,16	0,92
2020—2030	1,242	2,90	0,205	1,37	0,86
2030—2040	1,421	3,30	0,242	1,61	0,79
2040—2050	1,552	3,57	0,248	1,86	0,74
2050—2060	1,600	3,67	0,238	2,10	0,68
2060—2070	1,600	3,67	0,220	2,33	0,63
2070—2080	1,600	3,67	0,203	2,53	0,58
2080—2090	1,600	3,67	0,187	2,72	0,53
2090—2100	1,600	3,67	0,171	2,89	0,48
2100—2110	1,600	3,67	0,155	3,04	0,43
2110—2120	1,600	3,67	0,139	3,19	0,38
2120—2130	1,600	3,67	0,123	3,31	0,33
2130—2140	1,600	3,67	0,107	3,42	0,28
2140—2150	1,600	3,67	0,090	3,51	0,23
2150—2160	1,600	3,67	0,074	3,58	0,18
2160—2170	1,600	3,67	0,060	3,64	0,13

На рис. 6 этому случаю соответствует кривая 2 роста температуры атмосферы. Точка пересечения кривой 2 с графиком радиационно-равновесной температуры 4 характеризует выход КС к состоянию радиационного баланса и стабилизации температуры атмосферы на уровне $T_{\max} = 3,1$ °C. Это событие произойдет в районе 2160 г.

После этого средняя глобальная температура атмосферы будет уменьшаться в соответствии с графиком 4 изменения радиационно-равновесной температуры.

Выводы

После 2010 г. климатическая система Земли принимает тепловую энергию антропогенных парниковых газов с интенсивностью $q = 3,25 \cdot 10^3$ кВт·ч/(т-экв·год) ($26 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/ррт-экв·год), что обеспечивает мощность поглощения климатической системой $0,70$ Вт/м² отраженной радиации ПГ.

Зависимость радиационно-равновесной температуры атмосферы от содержания в ней антропогенных парниковых газов определяется нелинейными функциями (1) и (2).

Продолжительность достижения КС Земли состоянием радиационного баланса и соответствующей радиационно-равновесной температуры атмосферы определяется функциями (10) и (11).

Поочередное использование выражений (2), (10), (6), (7), (12) позволяет методом последовательной смены стационарных состояний рассчитывать динамику роста глобального потепления в будущем при любом сценарии изменения выбросов ПГ.

Состояние "парникового насыщения" КС антропогенными парниковыми газами наступит при их массовом содержании в атмосфере $M_A = 6,86 \cdot 10^{12}$ т-экв ($K_A = 880$ ррт-экв). Соответствующая этому состоянию максимально возможная температура глобального потепления равна $9,2$ °C.

При условии выполнения рекомендаций Парижского соглашения содержание антропогенных ПГ в атмосфере к 2050 г. может составить $M_A = 1,6 \cdot 10^{12}$ т-экв ($K_A = 204$ ррт-экв). Если принять, что в дальнейшем содержание ПГ в атмосфере:

– не изменится, то к 2100 г. глобальное потепление составит около 3 °C, а состояние радиационного баланса климатической системы наступит в районе 2190 г. при достижении атмосферой радиационно-равновесной температуры $3,7$ °C;

– будет уменьшаться за счет "старения" и постепенного ухода антропогенных парниковых газов из атмосферы, то к 2100 г. глобальное потепление составит 2,6 °С, а состояние радиационного баланса наступит к 2160 г. при достижении атмосферой радиационно-равновесной температуры 3,1 °С. После этого события средняя глобальная температура атмосферы будет уменьшаться в соответствии с уменьшением радиационно-равновесной температуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тетельмин В. В.** Современная энерго-климатическая история цивилизации // Гидротехника. 2021. № 3. С. 42—46.
2. **Стокер Т. Ф. и др.** МГЭИК. Резюме для политиков. Изменение климата. 2013 г.: Физические и научные основы. Вклад рабочей группы I в пятый доклад об оценке МГЭИК. — Кембридж Университи Пресс. Кембридж, Соединенное Королевство и Нью-Йорк, США.
3. **Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. Пердеро А., Мельникова М., Залюбовский Е.** Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. — М., 2020. Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/dokuments/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Climate_Primer_RU.pdf.
4. **Пачаури Р., Мейер Л.** МГЭИК. Изменение климата. 2014 г.: Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК. — МГЭИК: Женева. Швейцария. С. 44.
5. **Field C. B., Barros V. R., Dokken D. J.** 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. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY USA. — 1132 p.
6. **Бялко А. В.** Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // Природа. 2009. № 12. С. 18—28.
7. **Джирард Дж. Е.** Основы химии окружающей среды (пер. с англ.). — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 640 с.
8. **Мельников В. П., Смульский В. И.** Астрономическая теория ледниковых периодов: Новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. — Новосибирск: Изд. ГЕО, 2009. — 98 с.
9. **Тетельмин В. В.** Потенциал глобального потепления // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2022. № 1. С. 93—102.
10. **Тетельмин В. В.** Антропогенные выбросы парниковых газов и формула глобального потепления // Экология промышленного производства. 2021. № 4. С. 46—52.
11. **Barros V. R., Field C. B., Dokken D. J.** IPCC. 2014 c. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. — Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. — 688 p.
12. **Бринкман Э.** Физические проблемы экологии. — Долгopудный: Интеллект, 2012. — 288 с.
13. **Тетельмин В. В.** Физика и проблемы изменения климата // Вестник РАЕН. 2019. № 4. С. 29—35.
14. **Силвер Дж.** Глобальное потепление без тайн (пер. с англ.). — М.: Экспо, 2009. — 336 с.
15. **Тетельмин В. В.** Формула расчета темпа глобального потепления // Охрана окружающей среды и заповедное дело. 2021. № 3—4. С. 148—159.
16. **Тетельмин В. В., Пимашков П. И.** Биосфера и человек. Глобальное потепление. — М.: ЛЕНАНД, 2021. — 336 с.
17. **Миркин Я.** Будущее общество и место России // Россия в глобальной политике. 2020. № 6. С. 16—20.
18. **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.
19. **Tanaka K. R.** The recent normalization of historical marine heat extremes. PLOS Clim 1(2). February 1. 2022. Maite de Castro. University of Vigo, Spain. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007>.
20. **Cheng L. Coauthors.** Record-setting ocean warmth continued in 2019. // Adv. Atmos. Sci. 2020. V. 37(2). P. 137—142.
21. **Тетельмин В. В.** Планета Земля и человек. Единая экосистема. — М.: ЛЕНАНД, 2022. — 480 с.
22. 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).
23. Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>.

Analytical calculation of global warming

V. V. TETELMIN

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

The authors have carried out a quantitative analysis of anthropogenic greenhouse gases accumulated by the atmosphere and climate system of Earth. They obtained dependences recommended for use to determine the maximum temperature of global warming and the time when the Earth's climate system reaches the state of radiation balance, i.e., the content of anthropogenic greenhouse gases in the atmosphere. The content of anthropogenic greenhouse gases is 880 ppm in the atmosphere, which can result in the "greenhouse saturation" of the Earth's climate system. The authors propose an analytical calculation algorithm of the dynamics and limits of global warming under various scenarios of global greenhouse gas emissions. They performed some forecast calculations of the dynamics of global warming for two probable scenarios of changes in the content of anthropogenic greenhouse gases after 2020.

Keywords: Global warming, greenhouse gases, radiation balance, thermal energy.

Bibliography — 23 references.

Received May 14, 2022