

DOI 10.22363/2313-2310-2022-30-1-45-57

УДК 621.22

Научная статья / Research article

Формула максимального глобального потепления

В.В. Тетельмин*Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*✉ v-tetelmin@rambler.ru

Аннотация. Выполнены расчеты динамики глобального потепления с учетом сокращения выбросов парниковых газов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения. На основании анализа термодинамических параметров климатической системы в последний ледниковый и доиндустриальный периоды истории Земли получены функции зависимости максимальной температуры глобального потепления от массы и объемной концентрации парниковых газов в атмосфере. Определена масса парникового насыщения атмосферы антропогенными парниковыми газами и соответствующая максимальная температура глобального потепления. При неограниченной эмиссии трех основных парниковых газов максимальная температура, которую они могут обеспечить, равна 9,2 °С. При снижении к 2060 г. ежегодных глобальных выбросов в два раза глобальное потепление будет продолжаться примерно до 2110 г. с увеличением глобальной температуры до 3,1 °С.

Ключевые слова: парниковые газы, ледниковый период, солнечная постоянная, масса насыщения атмосферы, максимальная температура, глобальное потепление

История статьи: поступила в редакцию 01.02.2022; принята к публикации 01.03.2022.

Для цитирования: Тетельмин В.В. Формула максимального глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 1. С. 45–57. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-1-45-57>

Maximum global warming potential formula

Vladimir V. Tetelmin*Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia*✉ v-tetelmin@rambler.ru

Abstract. The calculations of the global warming dynamics were made taking into account the reduction of greenhouse gas emissions according to the recommendations of the Paris Agreement. Based on the analysis of thermodynamic parameters of the climatic system during the last glacial and pre-industrial periods of the Earth's history, the functions of the maximum global warming temperature dependence on the mass and volume concentration of greenhouse gases in the atmosphere were obtained. The mass of greenhouse saturation of the atmosphere

by anthropogenic greenhouse gases and the corresponding maximum global warming temperature have been determined. With unrestricted emission of the three major greenhouse gases, the maximum temperature they can provide is 9.2 °C. With annual global emission reduction by 2060, global warming will continue until about 2108 with a global temperature increase up to 3.1 °C.

Keywords: greenhouse gases, glacial era, solar constant, atmospheric saturation mass, maximum temperature, global warming

Article history: received 01.02.2022; accepted 01.03.2022.

For citation: Tetelmin VV. Maximum global warming potential formula. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(1):45–57. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-1-45-57>

Введение

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 Земли. Современные годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов следующие: CO₂ около 40 млрд т; CH₄ 330 млн т, N₂O 8,2 млн т. Гипертрофированная зависимость мировой энергетики от ископаемого топлива привела к выбросу в атмосферу более 2 трлн т основного парникового газа CO₂, из которых около половины усваивается мировой растительностью и Мировым океаном, а вторая половина антропогенных выбросов аккумулируется атмосферой.

За последние полтора века глобальная температура увеличилась почти на 1,2 °C. Такого темпа роста земной температуры не наблюдалось никогда. Климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое необратимое «широкомасштабное, быстрое и усиливающееся изменение климата» – это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере [2].

На рис. 1 приводится рассчитанный график изменения содержания парниковых газов (ПГ) в атмосфере с начала XX в. с учетом сокращения глобальных выбросов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения и принимая во внимание период существования CO₂ в атмосфере продолжительностью до 120 лет. Здесь и далее массовое и объемное содержание ПГ в атмосфере приводится к эквиваленту диоксида углерода (t-eq и ppm-eq).

В [1] приводится аналитико-эмпирическое решение задачи по определению темпа глобального потепления как функции содержания в атмосфере массы антропогенных парниковых газов (ПГ). В основу вывода «формулы глобального потепления» положен график реального роста аккумулированной климатической системой (КС) тепловой энергии за период 1970–2010 гг., который косвенно учитывает все особенности переноса и передачи тепловой энергии парниковых газов климатической системе Земли [3; 4]. За период с 1970 по 2010 г. климатическая система (КС) Земли аккумулировала $2,7 \times 10^{23}$ Дж (75×10^{15} кВт·ч) тепловой энергии антропогенных парниковых газов, из которой примерно 94 % приходится на Мировой океан, 4,5 % – на сушу и 1,5 % – на атмосферу.

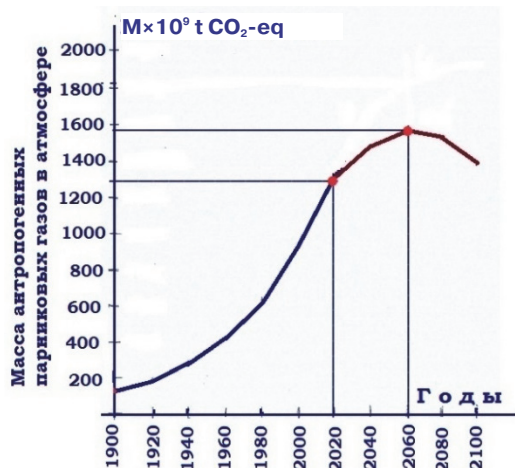


Рис. 1. Содержание антропогенных парниковых газов в атмосфере с учетом сокращения глобальных выбросов в соответствии с рекомендациями Парижского соглашения и с учетом продолжительности существования CO_2 в атмосфере до 120 лет

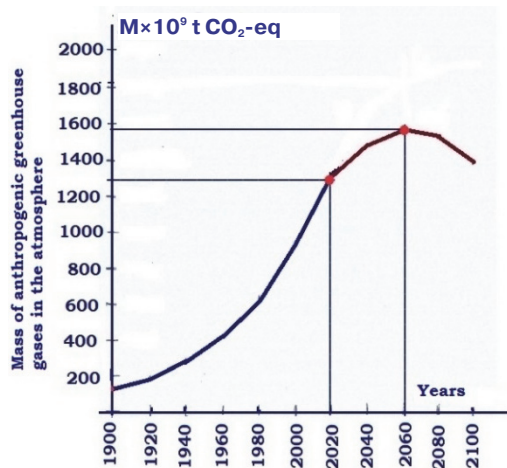


Figure 1. Anthropogenic greenhouse gas content in the atmosphere, taking into account the global emission reduction according to the recommendations of the Paris Agreement and taking into account the period of CO_2 presence in the atmosphere for 120 years

В основу предложенного решения положено следующее выражение, позволяющее определять повышение температуры атмосферы за любой 10-летний период времени [2; 5]:

$$\Delta T_i = 16,5 \times 10^{-14} \times M_i, \quad (1)$$

где ΔT_i – повышение температуры атмосферы, град./10 лет; M_i – среднее значение массы ПГ в атмосфере в расчетном периоде в эквиваленте диоксида углерода, t-eq.

Расчеты выполняются с использованием метода последовательной смены стационарных состояний с шагом по времени в 10 лет. Повышение глобальной температуры за несколько расчетных периодов i определяется суммированием:

$$T_i = \sum \Delta T_i. \quad (2)$$

В табл. 1 приводятся результаты расчета глобального потепления с 1950 по 2120 г. при изменении содержания ПГ в атмосфере в соответствии с графиком рис. 1. Результаты расчетов практически совпадают с известными натурными и расчетными данными глобального потепления, что позволяет сделать вывод о пригодности предлагаемой формулы. При сокращении к 2060 г. ежегодных глобальных выбросов CO_2 наполовину планета Земля продолжит нагреваться, и к 2100 г. средняя глобальная температура на планете повысится до $2,92^\circ\text{C}$.

При климатическом прогнозировании важно знать предельное значение температуры T_{\max} , к которой стремится глобальное потепление и которое могут обеспечить антропогенные выбросы ПГ. Сила воздействия единицы массы ПГ на глобальное потепление зависит от их концентрации в атмо-

сфере. По мере насыщения атмосферы ПГ радиационная эффективность единицы их содержания в атмосфере снижается.

Таблица 1

Накопленные с нарастающим итогом показатели содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере, парниковой тепловой энергии в климатической системе Земли и доля N парникового тепла в атмосфере от общего количества накопленного в КС парникового тепла

Годы	Накопленные в атмосфере выбросы ПГ K , ppm-eq	Накопленные в атмосфере выбросы ПГ $M \times 10^9$, t-eq	Накопленная тепловая энергия в климатической системе $Q \times 10^{15}$, кВт·ч	Накопленный рост среднегодовой температуры атмосферы, °C	Доля парниковой тепловой энергии в атмосфере N , %
1950	43	340	12,4	0,20	2,40
1960	52	410	19,0	0,25	1,94
1970	63	500	27,5	0,32	1,72
1980	78	615	38,2	0,44	1,67
1990	97	763	53,1	0,62	1,66
2000	117	914	72,0	0,80	1,61
2010	139	1085	100,4	0,98	1,42
2020	167	1304	135,2	1,16	1,25
2050	196	1525	268,7	1,78	1,00
2060	200	1563	312,5	2,01	0,98
2100	177	1381	482,5	2,92	0,90
2120	143	1116	557	3,28	0,89

Table 1

Accumulated indicators of greenhouse gases in the atmosphere, heat energy in the Earth's climate system, and the share N of greenhouse heat in the atmosphere of the total amount of accumulated greenhouse heat

Years	Accumulated greenhouse gas emissions in the atmosphere K , ppm-eq	Accumulated greenhouse gas emissions in the atmosphere $M \times 10^9$, t-eq	Accumulated heat energy in the climate system $Q \times 10^{15}$, kW·h	Accumulated increase in average annual atmospheric temperature, °C	Share of greenhouse heat energy in the atmosphere N , %
1950	43	340	12.4	0.20	2.40
1960	52	410	19.0	0.25	1.94
1970	63	500	27.5	0.32	1.72
1980	78	615	38.2	0.44	1.67
1990	97	763	53.1	0.62	1.66
2000	117	914	72.0	0.80	1.61
2010	139	1085	100.4	0.98	1.42
2020	167	1304	135.2	1.16	1.25
2050	196	1525	268.7	1.78	1.00
2060	200	1563	312.5	2.01	0.98
2100	177	1381	482.5	2.92	0.90
2120	143	1116	557	3.28	0.89

Например, поступление дополнительной массы диоксида углерода в атмосферу будет поглощать только ту часть длинного ИК-излучения, которая не была поглощена уже присутствующим в атмосфере газом. Добавление новых порций CO_2 оказывает меньшее воздействие на потепление, потому что им приходится конкурировать с ранее поступившим в атмосферу газом за излучение в диапазонах длин волн 4–4,4 и 14–19 мкм. По этой при-

чине удвоение содержания CO_2 в атмосфере не увеличит вдвое поглощение ИК-излучения.

Для нахождения предельной температуры потепления T_{\max} нужно знать функцию зависимости потенциала нагревания атмосферы от содержания парниковых газов, например от их объемной концентрации в атмосфере $P_K = f(K)$ град./ppm-eq. Для определения потенциала глобального потепления антропогенных парниковых газов строятся математические модели, которые учитывают соотношение между физическими, химическими и биологическими свойствами климатической системы Земли, а также динамические процессы атмосферной и океанической циркуляции. Полученные решения дают большой разброс результатов. Например, из приведенных в [6] результатов расчетов семи климатических сценариев следует, что при концентрации антропогенных ПГ на уровне 550 ppm-eq оценка соответствующей глобальной температуры T_{\max} составляет от 2 до 4,5 °С, а при $K = 800$ ppm-eq разброс еще больше: от 3 до 7 °С. Подобную точность нельзя признать удовлетворительной.

Более точные прогнозы максимальной равновесной температуры для каждого значения концентрации ПГ в атмосфере можно получить, используя известные данные о палеоклимате. Функции зависимости предельного значения «нагревательного потенциала» единицы массы P_M или единицы объемной концентрации P_K от содержащихся в атмосфере ПГ можно получить, используя свойство тесной корреляции между глобальной квазистационарной температурой и концентрацией ПГ в палеоатмосфере Земли [7; 8].

Если представить, что искомая функция $P_K = f(K)$ град./ppm-eq является линейной, то достаточно получить две экспериментальные точки этой прямой. Примерное постоянство содержания ПГ в атмосфере на протяжении последних 8 тыс. лет современного межледникового периода обеспечивало квазистационарное состояние климатической системы Земли. Эта особенность позволяет получить первую искомую точку графика линейной функции $P_K = f(K)$ град./ppm-eq.

В доиндустриальный период средняя концентрация каждого из трех основных ПГ в атмосфере составляла: $\text{CO}_2 - 280$ ppm, $\text{CH}_4 - 0,7$ ppm, $\text{N}_2\text{O} - 0,27$ ppm. В переводе на единицы, эквивалентные потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP, общая доиндустриальная объемная концентрация этих ПГ составляла 370 ppm-eq, а их массовое содержание в атмосфере $2,86 \times 10^{12}$ t-eq. Известно, что в доиндустриальном периоде доля основных ПГ (CO_2 , CH_4 и N_2O) в общем парниковом эффекте на Земле равнялась 9,4 из 33,4 °С [9]. Отсюда находим свойственный для этого периода потенциал нагревания содержащихся в атмосфере ПГ в единицах объемной концентрации: $P_K = 9,4 \text{ °С} / 370 \text{ ppm-eq} = 25,4 \times 10^{-3}$ град./ppm-eq, а также в единицах массы: $P_M = 3,29 \times 10^{-12}$ t-eq.

Вторую искомую точку графика линейной функции $P_K = f(K)$ можно найти, анализируя ход изменения глобальной температуры и концентрации ПГ в последний ледниковый период (рис. 2). В эту пору температура изменялась в диапазоне 5,8–16,4 °С, концентрация CO_2 в диапазоне 190–290 ppm, CH_4 в диапазоне 0,35–0,70 ppm, N_2O в диапазоне 0,20–0,27 ppm. При этом

независимо от того, что было первичным – изменение температуры, вслед за которым изменялась концентрация ПГ в атмосфере, или наоборот, осредненные значения этих величин в последний ледниковый период изменялись согласованно. Примерно 18 тыс. лет назад началось глобальное потепление на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжавшееся около 11 тыс. лет. При этом темп естественного нагревания атмосферы происходил примерно в 20 раз медленнее современного наблюдаемого глобального потепления.

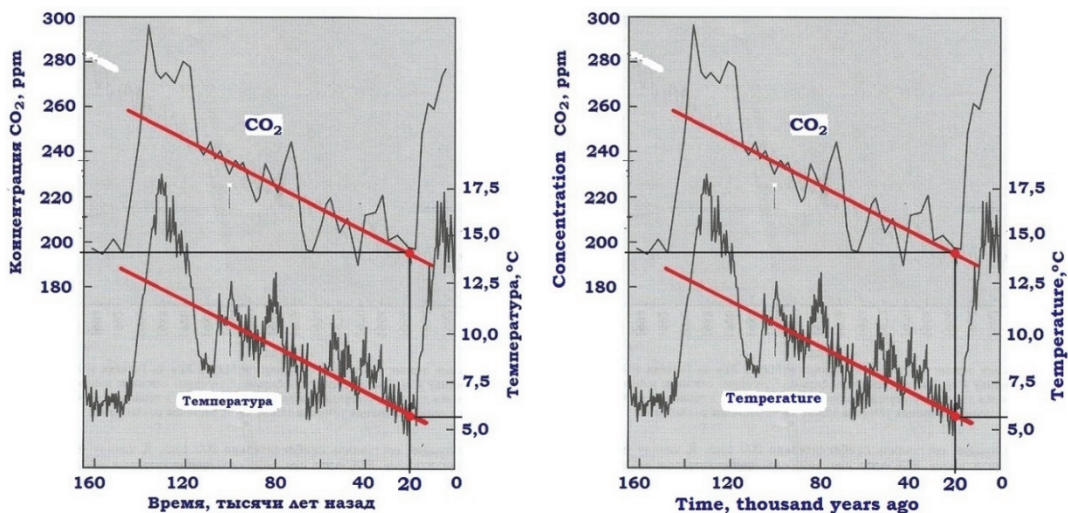


Рис. 2. Ход изменения глобальной температуры и концентрации диоксида углерода за последние 160 тыс. лет [10]

Figure 2. The course of changes in global temperature and carbon dioxide concentration over the last 160,000 years [10]

Изменение глобальной температуры на Земле в первую очередь происходит за счет изменения солнечной постоянной S , которая в настоящее время равна 1368 Вт/м^2 . Из трех известных циклов Миланковича [7; 8] ледниковые периоды обеспечиваются только одним – изменением эксцентриситета $\epsilon = c/a$ эллиптической орбиты Земли. В приведенном отношении c – половина фокусного расстояния, a – большая полуось эллиптической орбиты. В последний ледниковый период произошла существенная корректировка орбиты Земли гравитационным воздействием планет Солнечной системы, которая изменила эксцентриситет орбиты от значения $0,042$ в период 100 тыс. лет назад до $0,017$ в период 20 тыс. лет назад.

В табл. 2 приводятся данные о современных параметрах орбиты и климатической системы Земли при $\epsilon = 0,017$, а также рассчитанные параметры орбиты и соответствующие термодинамические показатели состояния в начальной стадии ледникового периода (100–70 тыс. лет назад), когда орбита была наиболее вытянутой при $\epsilon = 0,042$. Расчеты выполнены с использованием закона Стефана – Больцмана для излучающего абсолютно черного тела [11–13].

Изменение эксцентриситета орбиты Земли на $0,025$ изменило интенсивность лучистой энергии на внешней границе земной атмосферы – солнечной постоянной – на $4,6\%$, что и ввергло нашу планету в ледниковый период. В начале ледникового периода температура атмосферы снизилась на $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, из них $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ вызвано снижением солнечной постоянной, а $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – сниже-

нием содержания в атмосфере ПГ. В последующие годы (100–20 тыс. лет) назад глобальная температура на Земле дополнительно снизилась на 4,8 °С, концентрация CO₂ в палеоатмосфере – на 37 ppm, а концентрация ПГ – на 47 ppm-eq.

Таблица 2

**Некоторые параметры эллиптической орбиты Земли
и соответствующие термодинамические параметры климатической системы**

Период, тыс. лет назад	Эксцентриситет ε	Длина большой полуоси a , млн км	Вариация солнечной постоянной S_{\max}/S_{\min} , %	Солнечная постоянная S , Вт/м ²	Температура Земли без ПГ T_0 , К/°С	Глобальная темпера- тура T , °С	Концен- трация CO ₂ /∑ПГ K , ppm-eq
100	0,042	153,5	19,9	1300	252/-21	10,6	235/314
20	0,017	149,6	6,8	1368	254/-19	5,8	198/267

Table 2

**Some parameters of the Earth's elliptical orbit
and the corresponding thermodynamic parameters of the climate system**

Period, thousand years ago	Eccen- tricity ε	Major semiaxis length a , mln km	Solar constant variation S_{\max}/S_{\min} , %	Solar constant S , W/m ²	Earth tempe- rature without greenhouse gases T_0 , K/°C	Global temperature T , °C	Concen- tration of CO ₂ /∑GHG K , ppm-eq
100	0.042	153.5	19.9	1300	252/-21	10.6	235/314
20	0.017	149.6	6.8	1368	254/-19	5.8	198/267

К концу ледникового периода (20–18 тыс. лет назад) эксцентриситет орбиты вернулся к уровню 0,017, после чего Земля вновь стала получать лучистую энергию в количестве $S = 1368$ Вт/м². В это время климатическая система Земли находилась в состоянии радиационного баланса, сопоставимом с доиндустриальным квазистационарным состоянием, которое можно использовать в качестве второй реперной точки для определения потенциала нагревания ПГ.

В табл. 3 приводятся фактические значения «нагревательного потенциала» трех основных ПГ. Годы 20 и 2 тыс. лет назад определяют две искомые точки линейной функции $P_k = f(K)$. Именно эти точки отвечают современному значению солнечной постоянной $S = 1368$ Вт/м², в то время как годы 100 и 70 тыс. лет назад определяют две точки функции $P_k = f(K)$, которая отвечает более холодному состоянию Земли при солнечной постоянной $S = 1300$ Вт/м² (рис. 3).

На рис. 3 приводятся графики изменения P_k от содержания ПГ в атмосфере для двух состояний КС Земли: при значении солнечной постоянной $S = 1300$ Вт/м² и $S = 1368$ Вт/м². В обоих случаях удельный потенциал нагревания атмосферы (КС) уменьшается с увеличением содержания ПГ в атмосфере. При относительно малых концентрациях «нагревательный потенциал» ПГ выше, чем потенциал при их более высоком содержании в атмосфере. Эта особенность объясняется тем, что дополнительные выбросы парниковых газов поглощают оставшуюся часть ИК-излучения, которая не была адсорбирована уже находящимися в атмосфере парниковыми газами. Увеличение содержания ПГ в атмосфере снижает парниковое действие каждой единицы массы.

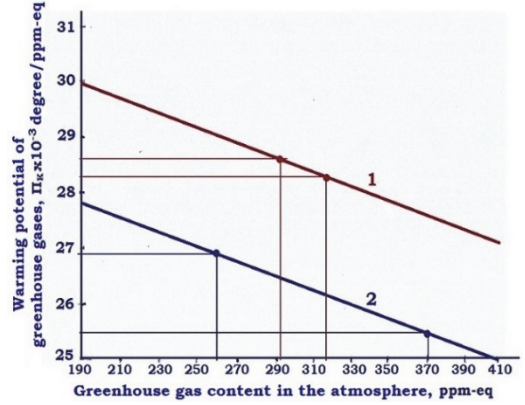
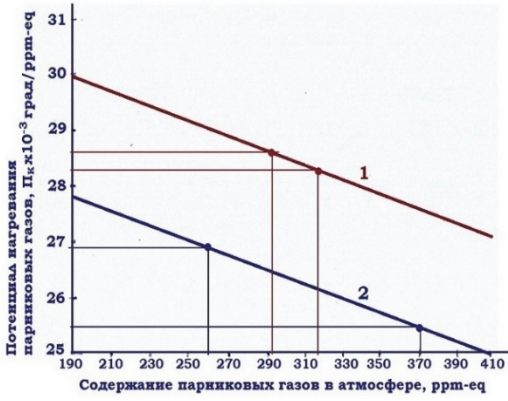


Рис. 3. Зависимость потенциала нагревания атмосферы парниковыми газами от их содержания в атмосфере при разных значениях солнечной постоянной:
 1 – $S = 1300 \text{ Вт/м}^2$, $\epsilon = 0,042$; 2 – $S = 1368 \text{ Вт/м}^2$, $\epsilon = 0,017$

Figure 3. Dependence of the potential of atmospheric warming by greenhouse gases on their content in the atmosphere at different values of the solar constant:
 1 – $S = 1300 \text{ W/m}^2$, $\epsilon = 0.042$; 2 – $S = 1368 \text{ W/m}^2$, $\epsilon = 0.017$

Таблица 3

Изменение общего потенциала нагревания атмосферы тремя основными парниковыми газами (CO_2 , CH_4 , N_2O) в зависимости от их общего содержания в атмосфере Земли в последний ледниковый период

Годы	Концентрация парниковых газов в атмосфере K , ppm-eq	Концентрация парниковых газов в атмосфере $M \times 10^{12}$, t-eq	Максимальное нагревание атмосферы T_{max} , °C	Потенциал нагревания $P_k \times 10^{-3}$, град./ppm-eq	Потенциал нагревания $P_m \times 10^{-12}$, град./t-eq
100 тыс. лет назад	314	2,48	8,9	28,3	3,59
70 тыс. лет назад	293	2,31	8,4	28,6	3,64
20–18 тыс. лет назад	261	2,03	7,0	26,8	3,45
8–2 тыс. лет назад	370	2,86	9,4	25,4	3,29

Table 3

Change in the total atmospheric warming potential of the three major greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O), depending on their total content in the Earth’s atmosphere during the last glacial era

Years	Concentration of greenhouse gases in the atmosphere K , ppm-eq	Concentration of greenhouse gases in the atmosphere $M \times 10^{12}$, t-eq	Maximum atmospheric warming T_{max} , °C	Warming potential $P_k \times 10^{-3}$, degree/ppm-eq	Warming potential $P_m \times 10^{-12}$, degree/t-eq
100,000 years ago	314	2.48	8.9	28.3	3.59
70,000 years ago	293	2.31	8.4	28.6	3.64
20,000–18,000 years ago	261	2.03	7.0	26.8	3.45
2,000 years ago	370	2.86	9.4	25.4	3.29

Современному термодинамическому состоянию климатической системы Земли, отстоящей от Солнца в среднем на 149,6 млн км, отвечает график 2 (рис. 3). Зависимость современного «нагревательного потенциала» ПГ от их объемной концентрации K в атмосфере может быть представлена следующей функцией (град/ррт-eq):

$$P_K = 29,8 \times 10^{-3} - 11,9 \times 10^{-6} \times K. \quad (3)$$

Значение температуры (град.) максимального (равновесного) глобального потепления, вызванного общей концентрацией K (ррт-eq) парниковых газов, определяется следующим уравнением:

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

Видно, что максимальная температура T_{\max} , к которой через продолжительное время приходит земная атмосфера, определяется нелинейным уравнением параболического типа. Исследуя функцию (4) на экстремум, получаем максимальное значение концентрации ПГ, при котором наступает «парниковое насыщение» атмосферы: $K_{\text{нас}} = 1250$ ррт-eq. Этому значению концентрации соответствует температура максимального глобального потепления, которое могут обеспечить три основных антропогенных парниковых газа: $T_{\max(\text{нас})} = 18,6$ °С.

На рис. 4 приводится график 1 нелинейной функции (4) в двух системах отсчета: в системе общей концентрации ПГ в атмосфере и в системе антропогенной концентрации ПГ. Точка начала антропогенной системы отсчета имеет координаты 370 ррт-eq и 9,4 °С, соответствующие состоянию КС в начале индустриального периода. Отметим, что график функции (4) укладывается в широкий диапазон оценок T_{\max} , полученный математическим моделированием семи климатических сценариев [6].

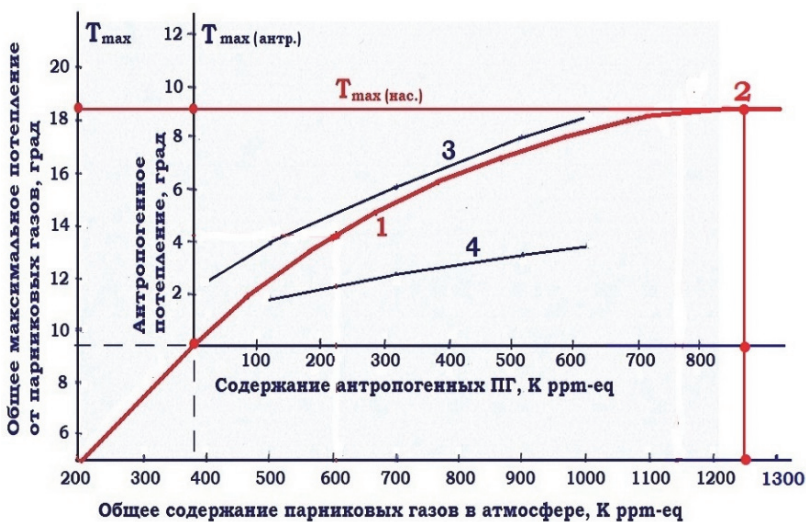


Рис. 4. График функции максимального глобального потепления (1), соответствующего равновесному состоянию климатической системы:

2 – точка «парникового насыщения» КС; 3, 4 – полученные моделированием верхний и нижний пределы оценки T_{\max} .

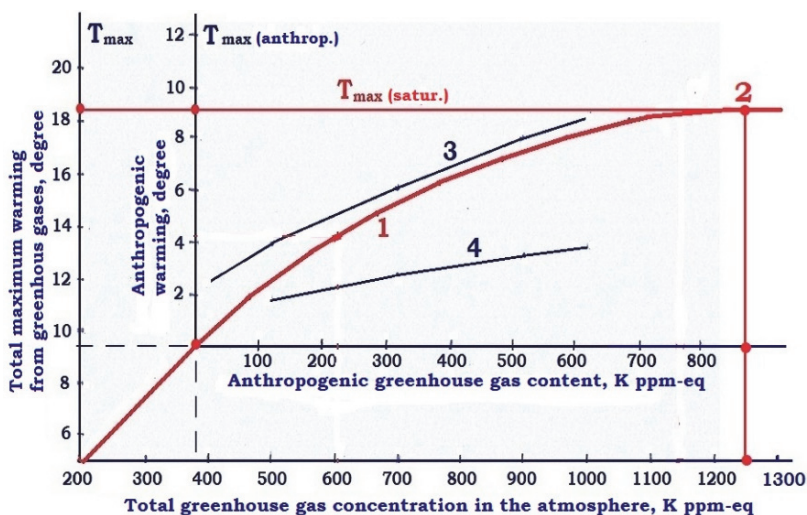


Figure 4. Graph of the maximum global warming function (1), corresponding to the equilibrium state of the climate system: 2 – point of “greenhouse saturation” of the climate system; 3, 4 – obtained by simulation the upper and lower limits of the T_{\max} estimation

Используя данные табл. 3, можно определить функцию зависимости «нагревательного потенциала» (град./t-eq) от массы M (t-eq) ПГ в атмосфере:

$$P_M = 3,8 \times 10^{-12} - 0,195 \times 10^{-24} \times M. \quad (5)$$

Значение температуры максимального глобального потепления (град.), вызванного массой M (t-eq) содержащихся в атмосфере ПГ, определяется произведением

$$T_{\max} = P_M \times M = 3,8 \times 10^{-12} \times M - 0,195 \times 10^{-24} \times M^2. \quad (6)$$

Исследуя функцию (6) на экстремум, находим массу $M_{\text{нас}}$, при которой происходит «парниковое насыщение» атмосферы: $M_{\text{нас}} = 9,7 \times 10^{12}$ t-eq. При таком содержании массы ПГ в атмосфере их «парниковые возможности» себя исчерпают, и в случае дальнейшего увеличения $M > M_{\text{нас}}$ температура атмосферы повышаться не будет.

Полученное значение максимальной температуры $T_{\max(\text{нас})} = 18,6$ °C определяет собой абсолютный вклад основных ПГ в глобальное потепление. Максимальное участие антропогенных выбросов ПГ в глобальном потеплении вычисляется разностью $T_{\max(\text{нас,антр})} = 18,6 - 9,4 = 9,2$ °C. Таким образом, неограниченные выбросы и неограниченное участие человека в глобальном потеплении способны добавить к глобальной доиндустриальной температуре примерно 9,2 °C, то есть к наблюдаемому современному антропогенному потеплению на 1,2 °C может быть добавлено еще 8,0 °C.

На рис. 5 приводится расчетная кривая роста глобальной температуры, построенная по данным табл. 1, а также кривая изменения предельной температуры T_{\max} , которая менялась в соответствии с графиком изменения содержания ПГ в атмосфере (рис. 1). Точка пересечения (3) этих кривых определяет собой время наступления термодинамического равновесия в системе

«Земля – Космос». К этому состоянию радиационного баланса Земля подойдет примерно в 2110 г., а максимальная температура глобального потепления к этому времени достигнет значения 3,1 °С.

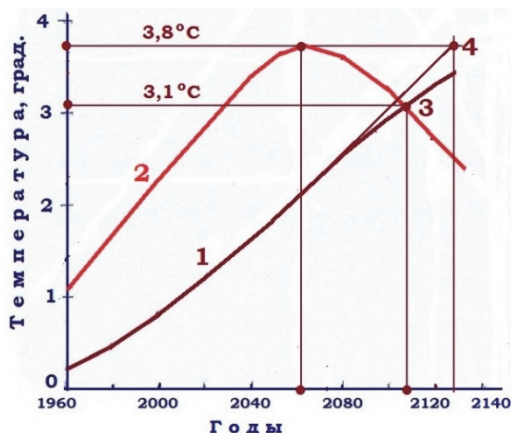


Рис. 5. Динамика изменения глобальной температуры во времени (кривая 1) и график изменения во времени максимальной температуры в соответствии с изменением содержания ПГ в атмосфере (кривая 2)

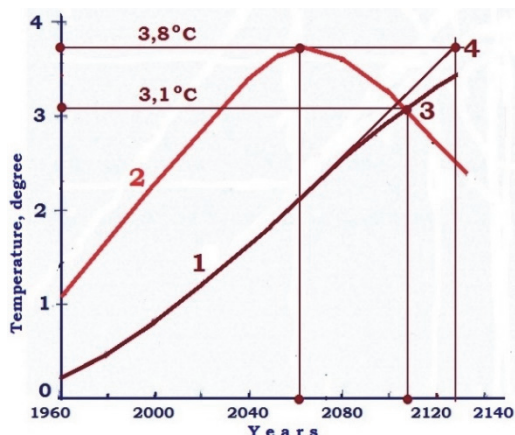


Figure 5. Global temperature trend over time (curve 1) and graph of maximum temperature change over time according to greenhouse gas content change in the atmosphere (curve 2)

Если представить, что в 2060 г. содержание ПГ в атмосфере стабилизируется, то состояние термодинамического равновесия будет определяться точкой пересечения (4). В таком случае радиационный баланс наступит позже – в 2130 г., а глобальное потепление составит 3,8 °С.

Заключение

Рассмотрение и использование параметров квазистационарного состояния КС Земли в доиндустриальный и ледниковый периоды позволило получить:

- функции (3) и (5), определяющие зависимость «удельного нагревательного потенциала» парниковых газов от их содержания в атмосфере;
- функции (4) и (6), определяющие зависимость максимальной температуры T_{\max} глобального потепления от содержания ПГ в атмосфере.

Исследование нелинейных функций (4) и (6) на экстремум позволяет определить:

- приведенную концентрацию $K_{\text{нас}} = 1250$ ppm-eq и приведенную массу $M_{\text{нас}} = 9,7 \times 10^{12}$ t-eq антропогенных ПГ, при достижении которых наступает «парниковое насыщение» атмосферы, из них на антропогенные ПГ приходится 880 ppm-eq и $6,84 \times 10^{12}$ t-eq соответственно;
- максимальную температуру глобального потепления, отвечающую равновесному состоянию «парникового насыщения» атмосферы антропогенными ПГ – $T_{\max(\text{антр})} = 9,2$ °С.

Совместное использование функций (2) и (6) позволяет при любом сценарии выбросов ПГ рассчитать темп глобального потепления и момент достижения атмосферой предельного значения температуры, при которой устанавливается радиационный баланс в системе «Земля – Космос».

Через несколько тысяч лет Земля войдет в очередной ледниковый период, когда на ее поверхности впервые будет присутствовать технологически и технически вооруженный человек. Сегодняшний человек понимает, что происходит с климатом, предвидит последствия его изменения, осознает причины и особенности изменения солнечной постоянной S и сумеет подготовиться к длительному глобальному похолоданию.

Список литературы

- [1] *Тетельмин В.В.* Антропогенные выбросы парниковых газов и формула глобального потепления // *Экология промышленного производства*. 2021. № 4. С. 46–52. http://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_4_46
- [2] *Изменение климата, 2014 г.: обобщающий доклад / под ред. Р. Пачаури, Л. Мейер.* Женева: МГЭИК, 2015. С. 44.
- [3] *Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. Пердеро А. Мельникова М., Залюбовский Е.* Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. М.: Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, 2020. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/dokuments/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Climate_Primer_RU.pdf (дата обращения: 14.01.2022).
- [4] *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 / ed. by C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken.* Cambridge – New York: Cambridge University Press, 2014. 1132 p.
- [5] *Тетельмин В.В.* Планета Земля и человек: единая экосистема. М.: ЛЕНАНД, 2022. 480 с.
- [6] *Силвер Дж.* Глобальное потепление без тайн. М.: Эксмо, 2009. 336 с.
- [7] *Бялко А.В.* Палеоклимат: дополнение к теории Миланковича // *Природа*. 2009. № 12. С. 18–28.
- [8] *Мельников В.П., Смутьский В.И.* Астрономическая теория ледниковых периодов: новые приближения. Решенные и нерешенные проблемы. Новосибирск: ГЕО, 2009. 98 с.
- [9] *Бажин Н.Б.* Метан в окружающей среде. Новосибирск: СО РАН, 2010. 56 с.
- [10] *Джирард Дж.Е.* Основы химии окружающей среды. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 640 с.
- [11] *Бринкман Э.* Физические проблемы экологии. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 288 с.
- [12] *Тетельмин В.В.* Физика и проблемы изменения климата // *Вестник РАЕН*. 2019. № 4. С. 29–35.
- [13] *Тетельмин В.В., Пимашиков П.И.* Биосфера и человек. Глобальное потепление. М.: ЛЕНАНД, 2021. 336 с.

References

- [1] Tetelmin VV. Anthropogenic greenhouse gas emissions and the global warming formula. *Ecology of Industrial Production*. 2021;(4):46–52. (In Russ.) http://doi.org/10.52190/2073-2589_2021_4_46
- [2] Pachauri RK, Meyer LA. (eds.) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva: IPCC; 2015. p. 44.
- [3] Mitrova T, Hohlov A, Melnikov Y, Perdero A, Melnikova M, Salybovskiy E. *The global climate threat and Russia's economy in search of a special path*. Moscow: Center for Energy at the Moscow School of Management SKOLKOVO, 2020. (In Russ.) Available from:

- https://energy.skolkovo.ru/downloads/dokuments/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Climate_Primer_RU.pdf (accessed: 14.01.2022).
- [4] Field CB, Barros VR, Dokken DJ. (eds.) *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, New York: Cambridge University Press; 2014.
- [5] Tetelmin VV. *Planet Earth and man: one ecosystem*. Moscow: LENAND Publ.; 2022. (In Russ.)
- [6] Silver D. *Global warming without secrets*. Moscow: Eksmo Publ.; 2009. (In Russ.)
- [7] Balko AV. Paleoclimate: a supplement to Milankovitch's theory. *Nature*. 2009;(12):18–28. (In Russ.)
- [8] Melnikov VP. *Astronomical theory of ice ages: new approximations. Solved and unsolved problems*. Novosibirsk: GEO Publ.; 2009. (In Russ.)
- [9] Bazhin NB. *Methane in the environment*. Novosibirsk: SO RAN Publ.; 2010. (In Russ.)
- [10] Dzhirard D. *Basics of environmental chemistry*. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2008. (In Russ.)
- [11] Brinkman E. *Physical problems of ecology*. Moscow: Intellect Publ.; 2012. (In Russ.)
- [12] Tetelmin VV. Physics and climate change. *Vestnik RAEN*. 2019;(4):29–35. (In Russ.)
- [13] Tetelmin VV, Pimachkov PI. *The biosphere and man. Global warming*. Moscow: LENAND Publ.; 2021. (In Russ.)

Сведения об авторе:

Тетельмин Владимир Владимирович, академик РАЕН, член Общественного совета при Минэнерго РФ, доктор технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. E-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Bio note:

Vladimir V. Tetelmin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, member of the Social Council at the Ministry of Energy of the Russian Federation, D.Sc. in Engineering, Professor, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. E-mail: v-tetelmin@rambler.ru