



## ЭКОЛОГИЯ

## ECOLOGY

DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-3-233-250

EDN: ZRYSUA

УДК 551.5:574

Научная статья / Research article

### Рост уровня Мирового океана в условиях глобального потепления

**В.В. Тетельмин**✉

*Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация*

✉v-tetelmin@rambler.ru

**Аннотация.** Приведены эмпирические расчетные функции глобального потепления, а также результаты расчета роста уровня Мирового океана для трех сценариев декарбонизации мировой энергетики. Представлены функции роста уровня Мирового океана, отдельно учитывающие вклад таяния материковых льдов и вклад теплового расширения воды. Сделан вывод о недостижимости целей Парижского соглашения по удержанию температуры глобального потепления в пределах +2 °С. Даже при интенсивном сценарии декарбонизации мир в ближайшие 100 лет будет идти по траектории повышения глобальной температуры до 5 °С.

**Ключевые слова:** парниковые газы, глобальное потепление, сценарии декарбонизации, уровень Мирового океана

**История статьи:** поступила в редакцию 15.01.2024; доработана после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 14.03.2024.

**Для цитирования:** Тетельмин В.В. Рост уровня Мирового океана в условиях глобального потепления // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 3. С. 233–250. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-3-233-250>

© Тетельмин В.В., 2024



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

## Sea level rising under global warming

Vladimir V. Tetelmin✉

RUDN University, Moscow, Russian Federation

✉v-tetelmin@rambler.ru

**Abstract.** Empirical calculation functions of global warming are presented, as well as the results of the sea level rising calculation for three scenarios of the world energy sector decarbonization. The functions of the sea level rising are given, separately considering the impact of continental ice melting and the impact of water thermal expansion. It is concluded that the goals of the Paris Agreement to keep global warming within  $+2^{\circ}\text{C}$  are unattainable. Even under the intensive decarbonization scenario, the world will follow a trajectory of global temperature rise by  $5^{\circ}\text{C}$  over the next 100 years.

**Keywords:** greenhouse gases, global warming, decarbonization scenarios, sea level

**Article history:** received 15.01.2024; revised 15.02.2024; accepted 14.03.2024

**For citation:** Tetelmin VV. Sea level rising under global warming. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(3):233–250. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-3-233-250>

В XXI в. климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста содержания антропогенных парниковых газов (АПГ) в атмосфере. Выбросы АПГ выводят из равновесия климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан (МО), атмосфера и суша. За последние полтора века к 2020 г. в атмосфере накопилось около 182 ppm-eq АПГ, содержание которых повысилось до значений:  $\text{CO}_2$  – 416 ppm,  $\text{CH}_4$  – 1,88 ppm,  $\text{N}_2\text{O}$  – 0,335 ppm<sup>1</sup>.

Основные следствия выбросов АПГ представлены в материалах Оценочных докладов МГЭИК, в которых приведена динамика выбросов парниковых газов с разбросом оценок  $\pm 3\%$ ; повышение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы с погрешностью  $\pm 20\%$ ; увеличение накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии в период 1970–2020 гг. с разбросом оценок в пределах  $\pm 30\%^2$ , а также увеличение частоты природных стихийных бедствий и рост уровня Мирового океана (табл.).

Активный рост средней приповерхностной температуры Земли начался в 1980 г. с постоянным приращением  $0,175^{\circ}\text{C}/10$  лет. При этом пространственная картина глобального потепления неоднородная. В районе  $32$ – $40^{\circ}$  северной широты потепление совпадает со средним значением глобального потепле-

<sup>1</sup> Здесь и далее содержание основных АПГ в атмосфере ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) приводится в единицах объемной концентрации (млн<sup>-1</sup>), эквивалентных потенциалу глобального потепления GWP диоксида углерода  $\text{CO}_2$  (ppm-eq).

<sup>2</sup> МГЭИК. Изменение климата, Обобщенный доклад. Вклад рабочих групп I, II и III в пятый оценочный доклад МГЭИК [основная группа авторов Р. Пачаури и Л. Мейер]. Женева: МГЭИК, 2014. С. 44.

ния, поверхность южнее указанной широты нагревается медленнее, а севернее – намного быстрее. Например, на берегах Гренландии и на арктическом побережье России тренд потепления характеризуется  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$  [1]. Можно сказать, что «энерго-климатическая цена» использования человечеством ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый кВт·ч произведенной антропогенной энергии обеспечил через парниковый эффект накопление в КС Земли  $25\text{ кВт}\cdot\text{ч}$  парниковой тепловой энергии.

На графиках рис. 1 представлены детальные данные об энергетике потепления атмосферы, суши и верхних слоев Мирового океана как доминирующего фактора КС Земли<sup>3</sup>. Из графика (рис. 1) следует, что за последние 50 лет КС Земли накопила  $127\cdot 10^{15}\text{ кВт}\cdot\text{ч}$  тепловой энергии, отраженной ПГ. Всего с 1900 по 2020 г. КС Земли аккумулировала примерно  $Q_{\text{КС}} = 215\cdot 10^{15}\text{ кВт}\cdot\text{ч}$  парниковой тепловой энергии. Главным аккумулятором парниковой тепловой энергии является Мировой океан – около 91 %, на сушу приходится около 5 %, на льды около 3 %; на атмосферу около 1,0 % накопленной энергии.

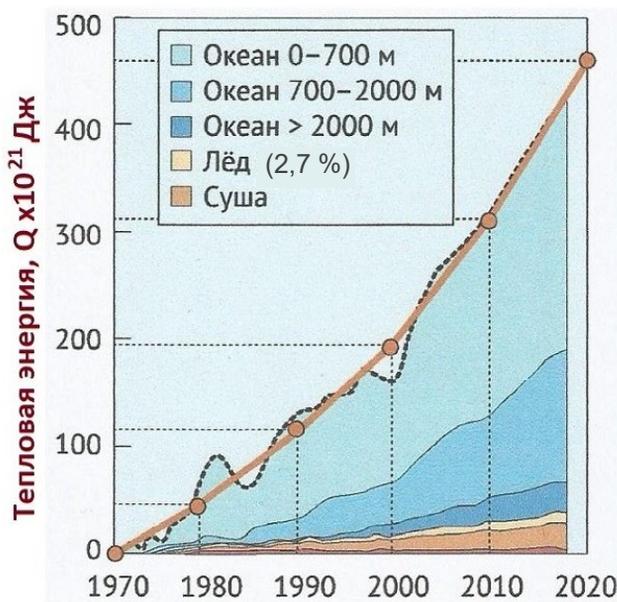


Рис. 1. Увеличение количества парниковой тепловой энергии, аккумулированной климатической системой Земли в период 1970–2020 гг.  
Источник: составлено авторами.

<sup>3</sup> Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. P. 33–144.

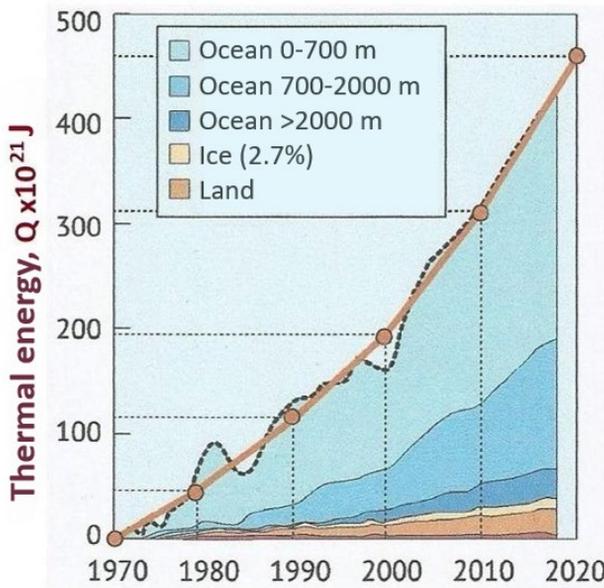


Figure 1. Increase in the amount of greenhouse thermal energy accumulated by the Earth's climate system in 1970–2020

Source: compiled by the authors.

В таблице приведены систематизированные натурные данные об изменении энергетических показателей КС Земли и росте уровня Мирового океана. На графиках (рис. 1) и в таблице отражены результаты передачи всех видов радиационной и нерадиационной парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, включая все виды положительных и отрицательных обратных связей. Наиболее значимыми факторами проявления положительных обратных связей помимо снижения альбеда является усиление циклонической деятельности и конвективного переноса тепла из тропиков в высокие широты; деградация криолитозоны арктического шельфа и тундры с выбросом метана из газогидратных кластеров; увеличение абсолютной влажности сухого арктического воздуха, сопровождающееся увеличением парникового эффекта.

На основании данных рис. 1 получена следующая эмпирическая зависимость интенсивности нагрева КС Земли  $\Delta Q_{КС}$  от концентрации  $K$  ppm-eq антропогенных ПГ в атмосфере [2]:

$$\Delta Q_{КС} = 276 \cdot 1012 \cdot (K - 30) \text{ [кВт} \cdot \text{ч/10 лет]}, \quad (1)$$

где  $320 \text{ ppm-eq} \geq K \geq 90 \text{ ppm-eq}$  – среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в каждом расчетном 10-летнем периоде времени.

**Динамика наблюдаемого до 2020 г. роста уровня Мирового океана как функция накопленной в КС Земли тепловой энергии, а также расчетного роста уровня при умеренном сценарии снижения выбросов антропогенных парниковых газов**

Годы	Содержание парниковых газов $K$ , ppm-eq	Интенсивность поглощения тепла КС Земли $Q_0 \times 10^{15}$ , кВт·ч/10 лет	Накопленная энергия в КС Земли $Q_{КС} \times 10^{15}$ , кВт·ч	Накопленная температура $T_{AT}$ , °C	Общий рост уровня МО $h$ , мм
1910	24,0	10,0	17,0	0,10	9,0
1930	34,3	11,5	37,6	0,20	28,0
1950	44,6	13,0	61,6	0,30	62,0
1970	70,0	13,8	88,0	0,40	96,0
1980	90,0	19,5	101,8	0,50	113
1990	112	24,6	121,1	0,625	130
2000	132	31,0	145,7	0,800	153
2010	155	38,3	176,7	0,975	186
2020	182	41,9	215,0	1,150	232
2050	246	59,5	314,0	1,70	393
2100	335	84,1	665,5	2,60	780

Источник: составлено авторами.

**Dynamics of the sea level rising observed until 2020 as a function of the thermal energy accumulated in the Earth's CS, as well as the calculated level growth under the moderate scenario of reducing anthropogenic greenhouse gas emissions**

Years	Greenhouse gas content $K$ , ppm-eq	Heat absorption rate of the Earth's CS $Q_0 \times 10^{15}$ , kW-h/10 years	Accumulated energy in the Earth's CS $Q_{CS} \times 10^{15}$ kW-h	Accumulated temperature $T_{AT}$ , °C	Total sea level rising $h$ mm
1910	24.0	10.0	17.0	0.10	9.0
1930	34.3	11.5	37.6	0.20	28.0
1950	44.6	13.0	61.6	0.30	62.0
1970	70.0	13.8	88.0	0.40	96.0
1980	90.0	19.5	101.8	0.50	113
1990	112	24.6	121.1	0.625	130
2000	132	31.0	145.7	0.800	153
2010	155	38.3	176.7	0.975	186
2020	182	41.9	215.0	1.150	232
2050	246	59.5	314.0	1.70	393
2100	335	84.1	665.5	2.60	780

Source: compiled by the authors.

Охлаждающее воздействие на КС Земли оказывают процессы испарения и таяния материковых и морских льдов: в течение 2020 г. года из МО испарилось около 1,2 м толщи воды и растаяло около 500 км<sup>3</sup> материковых льдов. Каждые 400 км<sup>3</sup> растаявших материковых льдов поднимают уровень МО на 1 мм. Процессы испарения и таяния препятствуют быстрому нагреванию планеты, сдерживая темп глобального потепления приземного слоя атмосферы в пределах 0,17–0,18 °C/10 лет. Таяние льда – это фазовый переход первого рода, поглощающий 332,4 Дж/г (83,6 кВт·ч/м<sup>3</sup>) тепловой энергии. В начале XXI в. Гренландия теряла около 162 км<sup>3</sup>/год льдов, а в 2020 г. теряет уже до 270 км<sup>3</sup>/год [3]. Холодные талые воды материковых льдов Гренландии воздействуют на теплое течение Гольфстрим. Площадь морских льдов Арктики сократилась с 7,7 млн км<sup>2</sup> в 1980 г. до 4,6 км<sup>2</sup> в 2015 г.

Рост уровня МО  $\Delta h$  за расчетный 10-летний период определяется двумя слагаемыми: ростом уровня за счет теплового расширения воды  $\Delta h_{\text{в}}$ , а также за счет таяния материковых льдов  $\Delta h_{\text{л}}$  за 10-летний период:

$$\Delta h = (\Delta h_{\text{в}} + \Delta h_{\text{л}}) \text{ мм/10 лет.} \quad (2)$$

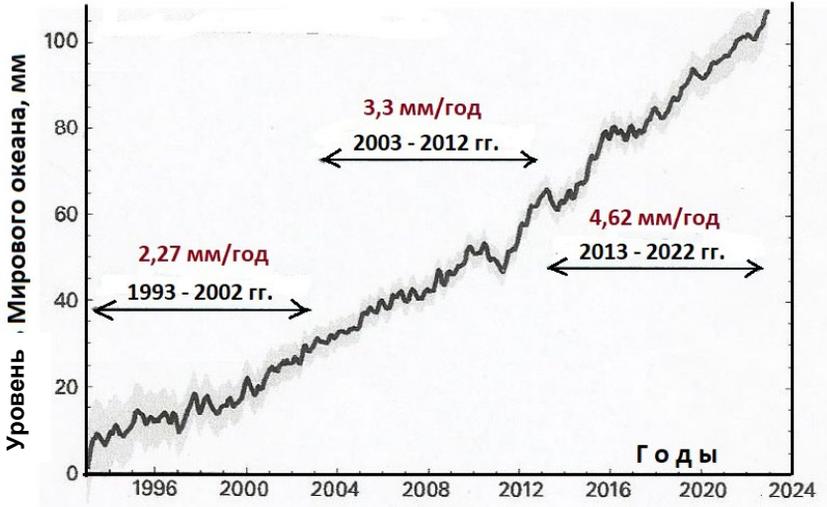


Рис. 2. Ускоряющийся рост уровня Мирового океана после 1993 г.  
 Источник: составлено авторами.

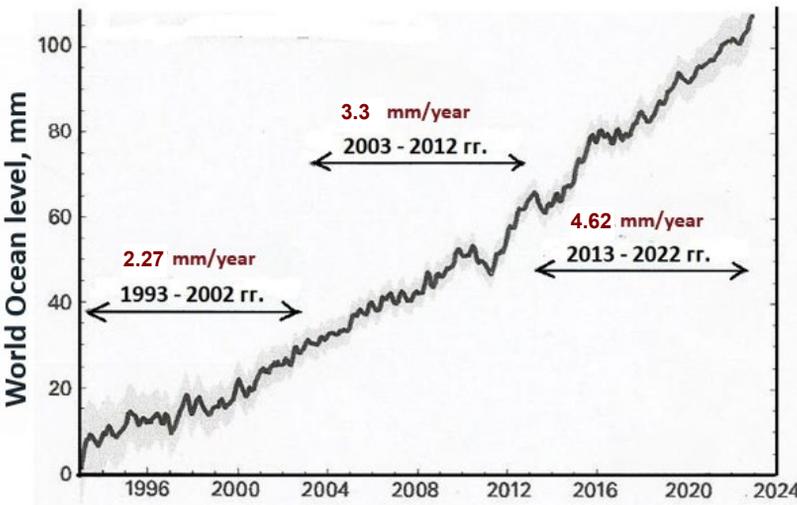


Figure 2. Accelerating sea level rise since 1993  
 Source: compiled by the authors.

Рост уровня Мирового океана МО фиксируется с начала прошлого века (см. табл.) и проходит с нарастающей скоростью (рис. 2). В период 1900–1930 гг. скорость роста УМО составляла  $\Delta h = 9 \text{ мм/10 лет}$ , в 2010–2020 гг. увеличилась до  $42 \text{ мм/10 лет}^2$ . В 2020 г. за счет интенсивного

таяния материковых льдов Гренландии (около  $270 \text{ км}^3/\text{год}$ ), Антарктиды ( $150 \text{ км}^3/\text{год}$ ) и Аляски ( $100 \text{ км}^3/\text{год}$ ) в МО поступило  $468/\text{км}^3$  талых вод, которые подняли его уровень примерно на  $\Delta h_{\text{л}} = 13 \text{ мм}$  из общего поднятия  $\Delta h = 42 \text{ мм}$  [3]. За счет теплового расширения воды уровень МО за рассматриваемый период поднялся примерно на  $\Delta h_{\text{в}} = 29 \text{ мм}$ . В общем поднятии уровня МО доля участия талых вод составила около 30 %.

Количество тепла  $\Delta Q_{\text{л}}$ , идущее на таяние материковых льдов, определяется выражением

$$\Delta Q_{\text{л}} = \Delta h_{\text{л}} \cdot S \cdot L \text{ кВт}\cdot\text{ч}/10 \text{ лет}, \quad (3)$$

где  $S = 361 \cdot 10^{12} \text{ м}^2$  – площадь зеркала МО;  $L = 83,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$  – удельная теплота фазового перехода в системе «лед – вода». Подставляя в (3) известные физические параметры, получаем функцию

$$\Delta h_{\text{л}} = 33,1 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta Q_{\text{л}} \text{ (мм}/10 \text{ лет)}, \quad (4)$$

где  $\Delta Q_{\text{л}}$  – количество тепла, идущее на таяние льдов (кВт·ч).

В период 2010–2020 гг. на таяние объема  $5200 \text{ км}^3$  материковых льдов потребовалось  $\Delta Q_{\text{л}} = 0,39 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  тепловой энергии, что составляет около 1 % от аккумулированной в этот период КС Земли энергии  $\Delta Q_{\text{КС}} = 38,3 \cdot 10^{15} \text{ кВт}\cdot\text{ч}$  парниковой тепловой энергии. В этот период КС Земли получила от растаявших материковых льдов всего 1 % тепла фазового перехода, в то время как приращение уровня МО за счет образовавшихся талых вод составило 30 %. В ОД-6 [3] указывается, что на весь лед земной поверхности расходуется примерно 2,7 % от общей накопленной парниковой КС Земли тепловой энергии  $Q_{\text{КС}}$ , из чего следует, что оставшаяся доля 1,7 % от  $Q_{\text{КС}}$  расходуется на таяние арктического морского льда. По прогнозам, арктический морской лед во второй половине XXI в. будет в летние месяцы полностью отсутствовать [4].

Таяние материковых льдов происходит за счет прямого контакта поверхности льдов с нагревающимся приземным слоем атмосферного воздуха ТАТ. Процесс таяния льдов является градиентным процессом, поэтому он в первую очередь определяется средней температурой омывающего его поверхность воздуха, то есть средней температурой глобального потепления.

Поверхность льдов, на которой происходит фазовый переход, имеет постоянную температуру  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , в то время как воздух с каждым 10-летием все более нагревается. По мере потепления приземного слоя атмосферы увеличивается градиент температуры на границе фазового перехода «лед – вода», отчего пропорционально увеличивается скорость таяния материковых льдов и поступление талой воды в МО. В 2020 г. при температуре ТАТ =  $1,16 \text{ }^\circ\text{C}$  растаяло около  $V_{\text{л}} = 520 \text{ км}^3$  материковых льдов, откуда получаем функцию роста уровня МО за счет вклада вод от таяния материковых льдов:

$$\Delta h_{\text{л}} = 11,2 \cdot \text{ТАТ} \text{ (мм}/10 \text{ лет)}, \quad (5)$$

где ТАТ – средняя температура за расчетные 10 лет.

При современных параметрах орбиты Земли, когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, зависимость максимального глобального потепления приземного слоя атмосферы  $T_{\max}$  от содержания выбросов антропогенных ПГ в атмосфере  $K$  определяется функцией [5]

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

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

Из (6) следует, что при концентрации антропогенных ПГ в атмосфере  $K = 850$  ppm-eq наступает «парниковое насыщение» атмосферы, при котором соответствующий максимально возможный вклад антропогенных ПГ в глобальное потепление составляет  $T_{\max} = 8,9$  °С. Следует отметить, что основная цель Парижского Соглашения (ПС) по долговременному удержанию глобального потепления в пределах +2 °С является нереальной. Намеченная ПС ограничительная температурная отметка глобального потепления +2 °С будет преодолена в 2070 г. [6]. Из функции (6) следует, что температуру глобального потепления +2 °С можно было удержать в долговременном плане, если бы человечество обеспечило углеродную нейтральность в 1985 г., когда концентрация антропогенных ПГ в атмосфере не превышала 100 ppm-eq.

Продолжительность таяния льдов определяется продолжительностью роста температуры глобального потепления ТАТ до достижения ею максимального значения  $T_{\max}$  (6). Эта температура соответствует радиационно-равновесному состоянию КС Земли. Через некоторое время после достижения температуры  $T_{\max}$  установится материально-вещественный баланс между массой растаявшего льда и массой накопленных на поверхности льдов снежных осадков.

Основной вклад в рост уровня МО  $\Delta h$  обеспечивает тепловое расширение нагреваемой воды. Для нахождения функции связи между поглощением тепла МО и ростом его уровня необходимо знать среднее значение коэффициента  $\beta$  теплового расширения вод МО, который изменяется в широких пределах и зависит от температуры воды и давления. Физическая сущность этого коэффициента выражена зависимостью

$$\beta = \Delta V / V \cdot \Delta T \text{ град}^{-1}, \quad (7)$$

где  $\Delta V = \Delta h_{\text{в}} \cdot S$  – увеличение объема воды за счет ее теплового расширения;  $\Delta h_{\text{в}}$  – рост УМО за счет теплового расширения воды;  $S$  – площадь зеркала МО;  $V$  – объем нагретой воды;  $\Delta T$  – изменение температуры воды.

Количество накопленного водами МО тепла определяется выражением

$$\Delta Q_{\text{в}} = \Delta T \cdot m \cdot C_{\text{в}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}, \quad (8)$$

где  $m = V \cdot \rho$  – масса нагретой воды (т);  $\rho$  – плотность воды (т/м<sup>3</sup>);  $C_{\text{в}} = 1,16$  кВт·ч/т·град – удельная теплоемкость воды.

Подставляя сюда выражение (7), получаем функцию связи между физическими параметрами, характеризующими процесс нагревания воды МО:

$$\Delta Q_{\text{В}} = \Delta h_{\text{В}} \cdot S \cdot \rho \cdot C_{\text{В}} / \beta, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 10 \text{ лет}. \quad (9)$$

Для периода 2010–2020 гг. из натуральных данных известны значения накопленного водами МО тепла  $\Delta Q_{\text{В}}$  (см. рис. 1) и роста уровня МО за счет теплового расширения воды  $\Delta h_{\text{В}}$  (см. рис. 2). Из функции (9) находим среднее эффективное значение коэффициента теплового расширения воды МО в условиях наблюдаемого глобального потепления:  $\beta = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ град}^{-1}$ . При известном коэффициенте  $\beta$  получаем функцию зависимости вклада теплового расширения воды от накопленной тепловой энергии климатической системой (КС) Земли за расчетный 10-летний период:

$$\Delta h_{\text{В}} = 0,75 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta Q_{\text{КС}} \text{ (мм/10 лет)}, \quad (10)$$

где  $\Delta Q_{\text{КС}}$  (кВт·ч/10 лет) – накопленная КС Земли тепловая энергия за расчетный 10-летний период, определяемая функцией (1). Формула (10) справедлива при следующем примерном соотношении тепла, накопленного МО  $Q_{\text{МО}}$ , и тепла, накопленного в КС Земли:  $\Delta Q_{\text{В}} = 0,91 \cdot \Delta Q_{\text{КС}}$ .

При известных слагаемых  $\Delta h_{\text{Л}}$  (5) и  $\Delta h_{\text{В}}$  (10) выражение (2), определяющее скорость роста уровня МО, можно представить в развернутом виде:

$$\Delta h = 11,2 \cdot \text{TAT} + 0,75 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta Q_{\text{КС}} \text{ (мм/10 лет)}, \quad (11)$$

где  $\Delta Q_{\text{КС}}$  – тепловая энергия, накопленная КС Земли в расчетный 10-летний период; TAT – средняя температура за расчетные 10 лет.

Функция (11) определяет общий рост уровня МО как сумму долей участия притока талых вод (первое слагаемое) и теплового расширения воды (второе слагаемое). Функцию общего роста уровня МО можно также определить из натуральных данных, полученных за период 1970–2020 гг. (см. табл.). За этот период КС Земли получила  $\Delta Q_{\text{КС}} = 127 \cdot 10^{15}$  кВт·ч парниковой тепловой энергии, за счет чего уровень МО поднялся на 136 мм. В результате получаем линейную зависимость общего роста уровня МО от накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии:

$$\Delta h = 1,07 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta Q_{\text{КС}} \text{ (мм/10 лет)}. \quad (12)$$

Представляет интерес вопрос о том, насколько чувствительна реакция уровня МО на поступление одного и того же количества тепла отдельно материковым льдам и отдельно водам МО, когда  $\Delta Q_{\text{Л}} = \Delta Q_{\text{В}}$ . При этом условии из выражений (4) и (10) находим  $\Delta h_{\text{Л}} = 47 \cdot \Delta h_{\text{В}}$  мм/10 лет, из чего следует вывод: при получении одинакового количества тепла талые воды материковых льдов почти в 47 раз сильнее поднимали бы уровень МО по сравнению с нагреваемой водой. Это означает, что в будущем для эффективного торможения роста уровня МО следует максимально препятствовать поступлению тепла материковым льдам, используя различные технологические приемы.

Около 56 % антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> поглощают суша и МО, в котором растворено около 800 млрд т этого антропогенного газа. Закисление вод МО выбросами CO<sub>2</sub> приводит к устойчивому снижению показателя pH морских вод: с 1990 г. он снизился с 8,11 до 8,05 и уменьшается на 0,022/10 лет. С начала XXI в. увеличивается доля площади МО с волнами экстремальной морской жары. В 2019 г<sup>4</sup>. волны жары наблюдались на 57 % поверхности МО [7]. Глобальное потепление увеличивает площадь МО с поверхностной температурой 27 °С, что увеличивает число термических депрессий и зон пониженного атмосферного давления, которые обеспечивают возникновение тропических циклонов (ТЦ). Теплая вода действует как мощный аккумулятор, из которого ТЦ черпают энергию. Циклоны как крупномасштабная разновидность конвекции в атмосфере способствуют ускоренному переносу накопившегося избыточного тепла из низких широт в высокие широты. В частности, тепло из большой площади тропиков глобально распределяется по меньшей площади приполярных областей. Площадь области годового стока тепла, переносимого конвективными потоками, почти в три раза меньше площади областей его источников. Частота и энергия циклонов, являющихся причинами гидрометеорологических стихийных бедствий, по мере глобального потепления увеличиваются [8].

Климатического суверенитета не может быть: ураганы, засухи, ливни, наводнения, волны жары, лесные пожары, деградация вечной мерзлоты, рост уровня МО и другие природные стихийные бедствия не знают границ. Перед современным человечеством стоит выбор: бороться или не бороться с глобальным изменением климата. По этому вопросу в сегодняшнем мире нет глобального климатического единства.

Можно не бороться с глобальным потеплением, продолжать использовать ископаемое топливо (ИТ) в прежнем объеме, при этом не испытывать дефицита энергии и таким образом оставаться гуманным по отношению к сегодняшнему населению Земли, но не быть гуманным по отношению к будущим поколениям, которым придется жить на максимально разогретой планете.

Можно проявить гуманность к будущим поколениям и бороться с потеплением: активно проводить декарбонизацию энергетики, исключить из использования ИТ, обречь современную цивилизацию на жизнь с дефицитом энергии во имя того, чтобы будущие еще не родившиеся жители Земли в XXII в. не жили в условиях невыносимой жары.

---

<sup>4</sup> The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper/Group Chief Risk Officer (CRO). January.2019. 28. Laboratoire d'Etudes en Geophysique et Oceanographie Spatiales (LEGOS); data from AVISO altimetry (<https://www.aviso.altimetry.fr>).

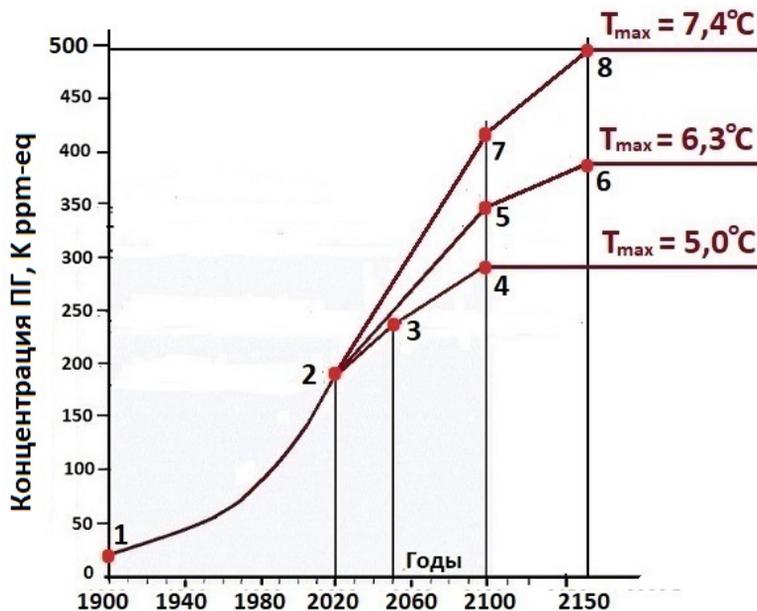


Рис. 3. Рост концентрации антропогенных ПГ в атмосфере:  
 1-2 – реальный рост до 2020 г.; 2-3-4 – интенсивный сценарий; 2-5-6 – умеренный сценарий;  
 2-7-8 – консервативный сценарий  
 Источник: составлено авторами.

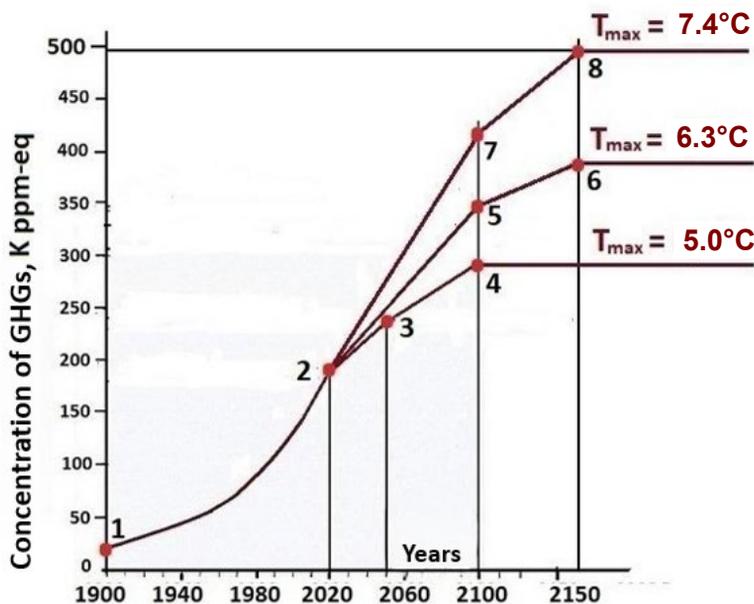


Figure 3. Graphs of growth in the concentration of anthropogenic GHGs in the atmosphere:  
 1-2 – real growth before 2020; 2-3-4 – intensive scenario; 2-5-6 – moderate scenario;  
 2-7-8 – conservative scenario  
 Source: compiled by the authors.

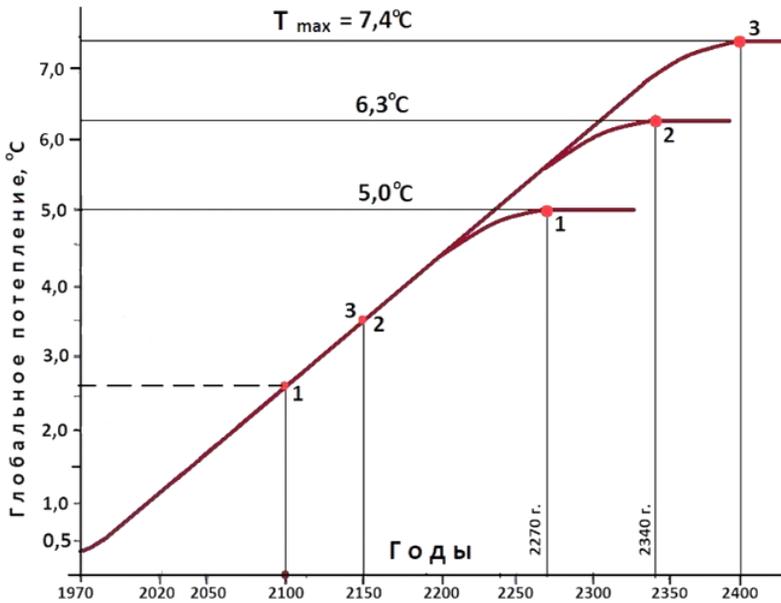
На рис. 3 приведены графики роста концентрации антропогенных ПГ в атмосфере для трех возможных сценариев декарбонизации энергетики: интенсивный, умеренный и консервативный. При интенсивном сценарии выбросы  $\text{CO}_2$  обнуляются к 2100 г., при умеренном и консервативном сценариях углеродная нейтральность достигается к 2150 г. при разных темпах снижения выбросов.

Конечно, человечество не согласится вернуться к лучине, но будет вынуждено идти на компромисс и реализовать один из сценариев декарбонизации энергетики. Приходит понимание того, что заканчивается пора безудержного роста использования природных ресурсов. Эта пора заканчивается не только из-за необходимости смягчить опасные последствия ГИК, но и от того, что к концу XXI в. ИТ может закончиться и его следует постепенно замещать альтернативными источниками энергии.

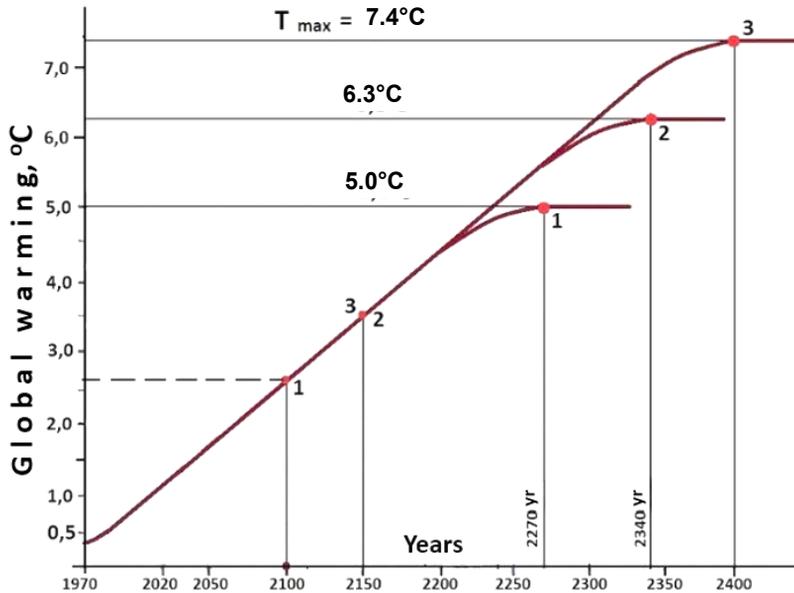
Результаты и последствия сокращения выбросов ПГ можно будет увидеть только через много лет из-за инертности климатической системы (КС) Земли. На рис. 4 представлены расчетные графики продолжительности достижения максимальной температуры глобального потепления  $T_{\max}$  (б) для каждого из трех сценариев борьбы с изменением климата. При достижении в 2100 г. углеродной нейтральности и постоянном значении концентрации  $K = 292$  ppm-eq (интенсивный сценарий) потепление будет продолжаться еще 170 лет до достижения температуры  $T_{\max} = 5^\circ\text{C}$  (график 1-1). Это лучшие климатические условия, которые может обеспечить современная цивилизация будущим еще не родившимся жителям планеты Земля. Однако реализовать этот сценарий быстрого отказа от ископаемого топлива, замещения его ВИЭ и обеспечения к 2100 г. углеродной нейтральности, скорее всего, не удастся по многим причинам и негативным социально-экономическим последствиям.

Если будущему человечеству после реализации умеренного сценария удастся к 2150 г. обеспечить углеродную нейтральность при  $K = 390$  ppm-eq, то глобальное потепление будет продолжаться до 2340 г. до достижения температуры  $6,3^\circ\text{C}$  (кривая 2-2). При консервативном сценарии снижения выбросов при накоплении в атмосфере концентрации  $K = 497$  ppm-eq потепление будет продолжаться до 2400 г. до достижения радиационно-равновесного состояния при  $7,4^\circ\text{C}$  (кривая 3-3). Таким образом, даже при интенсивном сценарии декарбонизации в ближайшие 100 лет мир будет идти по траектории повышения глобальной температуры на  $4\text{--}5^\circ\text{C}$ .

На рис. 5 представлены расчетные графики роста уровня МО для умеренного сценария декарбонизации. Интенсивность роста уровня МО от таяния льдов (график 1) носит линейный характер, потому что определяется интенсивностью роста глобальной температуры, которая растет с постоянным приращением  $0,175^\circ\text{C}/10$  лет. Интенсивность роста уровня МО за счет теплового расширения воды (график 2) нелинейная, потому что определяется интенсивностью поглощения океаном тепла, которая определяется параболической зависимостью (см. рис. 1).



**Рис. 4. Продолжительность роста температуры глобального потепления до достижения климатической системой Земли состояния радиационного равновесия для трех возможных сценариев обеспечения углеродной нейтральности:** график 1-1 – интенсивный сценарий при  $K = 292$  ppm-eq; график 2-2 – умеренный сценарий при  $K = 390$  ppm-eq; график 3-3 – консервативный при  $K = 497$  ppm-eq  
 Источник: составлено авторами.



**Figure 4. Graphs of the duration of global warming temperature increase until the Earth's climate system reaches a state of radiative equilibrium for three possible scenarios of ensuring carbon neutrality:** graph 1-1 – intensive scenario at  $K = 292$  ppm-eq; graph 2-2 – moderate scenario at  $K = 390$  ppm-eq; graph 3-3 – conservative scenario at  $K = 497$  ppm-eq  
 Source: compiled by the authors.

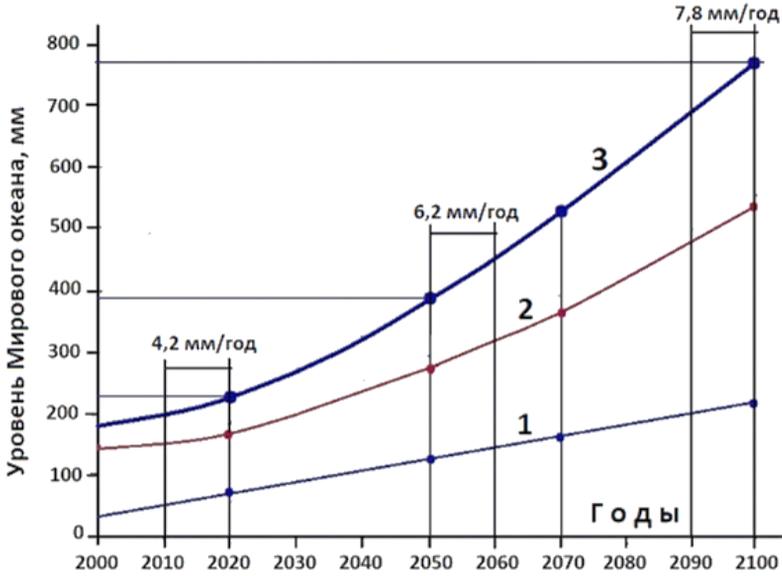


Рис. 5. Рост уровня МО, вызванного глобальным потеплением, при умеренном сценарии декарбонизации до 2100: 1 – рост за счет таяния материковых льдов; 2 – рост за счет теплового расширения воды МО; 3 – общий рост уровня  
 Источник: составлено авторами.

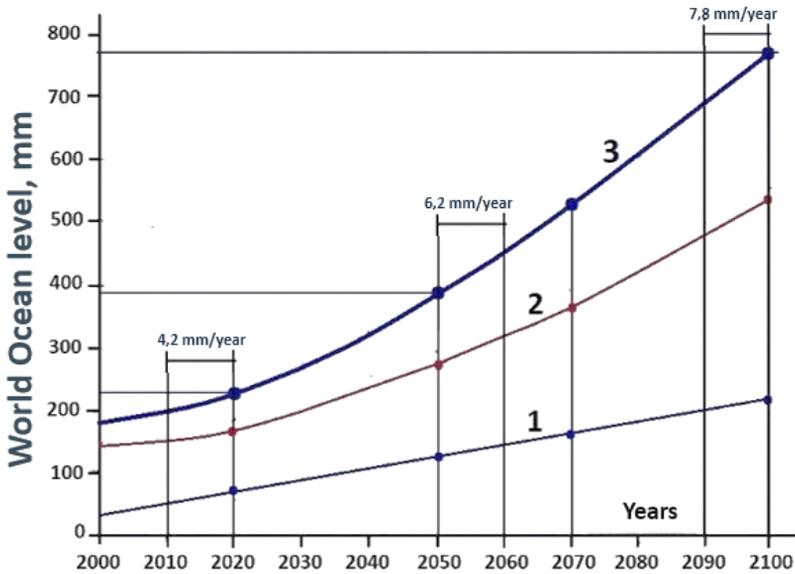


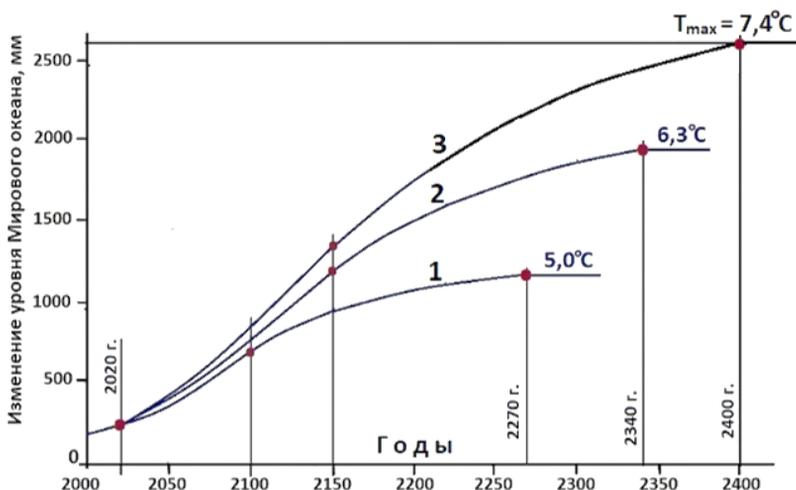
Figure 5. Graphs of the sea level rising caused by global warming under the moderate decarbonization scenario: 1 – growth caused by continental ice melting; 2 – growth caused by sea water thermal expansion; 3 – general level growth  
 Source: compiled by the authors.

Доля участия талых вод в росте уровня МО растет, так как льды реагируют на повышение температуры атмосферы мгновенно, а МО прогревается медленно. Вклад талых вод материковых льдов в общий рост 3 уровня МО увеличивается от 19 % в 2020 г. до 27 % в 2100 г. При этом вклад талых вод в

увеличение уровня МО в каждом отдельном расчетном 10-летии постепенно увеличивается от 29 % в 2020 г. до 32 % в 2100 г. Общий рост уровня МО (график 3) увеличится от современного значения 232 мм до 780 мм в 2100 г. Подобная перспектива требует строительства новых и увеличения высоты действующих береговых защитных гидротехнических сооружений во всем мире.

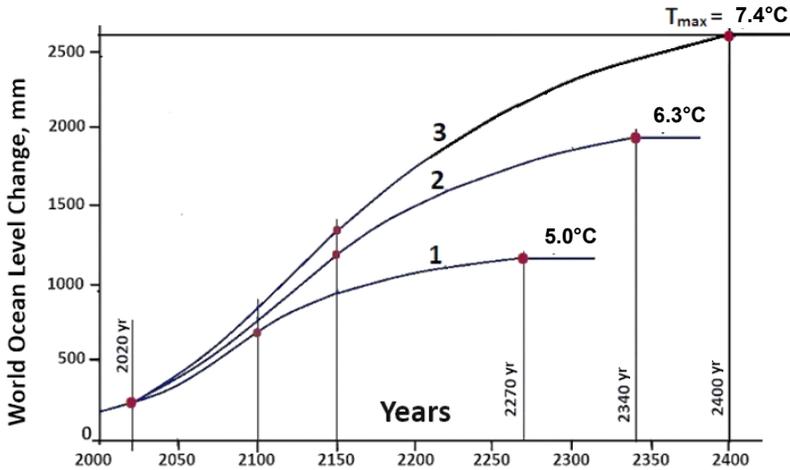
На рис. 6 представлены графики роста уровня МО для трех сценариев снижения выбросов  $\text{CO}_2$  и достижения углеродной нейтральности. Каждый сценарий характеризуется своей продолжительностью глобального потепления и своей максимальной температурой глобального потепления (см. рис. 4). При консервативном сценарии потепление будет продолжаться до 2400 г., пока Земля не нагреется до  $7,4^\circ\text{C}$ , при этом уровень МО поднимется почти на 2,51 м. При умеренном сценарии декарбонизации КС Земли придет в равновесное состояние в 2340 г., нагревшись до  $6,3^\circ\text{C}$ . Наилучший результат с наименьшими последствиями обеспечивает интенсивный сценарий декарбонизации, при котором радиационное равновесие наступит в 2270 г., глобальное потепление составит  $5^\circ\text{C}$ , уровень МО поднимется на 1,15 м.

Нагревание атмосферы имеет следующую особенность: по мере глобального потепления количество тепловой энергии, накопленной в атмосфере в каждом расчетном 10-летнем периоде, уменьшается относительно накопленной тепловой энергии КС Земли в целом. В результате при умеренном темпе декарбонизации к 2340 г., когда Земля вернется к радиационно-равновесному состоянию при  $T_{\max} = 6,3^\circ\text{C}$ , доля полученного атмосферой парникового тепла составит всего 0,5 % от общего тепла, полученного КС Земли.



**Рис. 6.** Рост уровня Мирового океана для трех сценариев снижения выбросов  $\text{CO}_2$  и достижения углеродной нейтральности: 1 – интенсивный при достижении нулевых выбросов в 2100 г.; 2 – умеренный при достижении нулевых выбросов в 2150 г.; 3 – консервативный при достижении нулевых выбросов в 2150 г.

*Источник:* составлено авторами.



**Figure 6. The sea level rising for three scenarios of reducing CO<sub>2</sub> emissions and achieving carbon neutrality:** 1 – intensive scenario with achieving zero emissions in 2100; 2 – moderate scenario with achieving zero emissions in 2150; 3 – conservative scenario with achieving zero emissions in 2150  
*Source:* compiled by the authors.

## Выводы

Процессы испарения и таяния препятствуют быстрому нагреванию планеты, ограничивая темп глобального потепления приземного слоя атмосферы в пределах 0,17–0,18 °C/10 лет.

Единица тепловой энергии, пошедшая на таяние материковых льдов, в 47 раз больше поднимает уровень МО, чем единица тепловой энергии, пошедшая на нагревание вод МО. Каждые 400 км<sup>3</sup> растаявших материковых льдов поднимают уровень МО на 1 мм. Для торможения роста уровня МО следует препятствовать поступлению тепла к материковым льдам, используя различные технологические приемы.

В современных условиях глобального потепления на таяние материковых льдов расходуется около 1 % от полученной климатической системой Земли тепловой энергии, в то время как образующиеся при этом талые воды обеспечивают подъем уровня Мирового океана (МО) на 30 %. Вклад талых вод в рост уровня МО пропорционален текущему значению средней приземной температуры атмосферы ТАТ в рассматриваемый расчетный период и определяется функцией (5).

В данных условиях эффективное значение коэффициента теплового расширения вод МО примерно равно  $\beta = 3,5 \cdot 10^{-4}$  град<sup>-1</sup>. Вклад теплового расширения воды в рост уровня МО пропорционален текущему значению поглощенной Землей парниковой тепловой энергии  $Q_{\text{КС}}$  и определяется функцией (10).

Общий рост уровня МО может быть определен как линейная функция от накопленной климатической системой Земли парниковой тепловой энергии (12).

Декарбонизацию мировой энергетики следует осуществлять не только из-за необходимости смягчить опасные последствия изменения климата, но и потому, что к концу XXI в. геологические запасы ископаемого топлива могут быть исчерпаны и их следует постепенно замещать альтернативными источниками энергии.

Лучшие климатические условия, которые человечество может обеспечить будущим поколениям, могут быть реализованы при интенсивном сценарии декарбонизации и достижении в 2100 г. углеродной нейтральности при концентрации антропогенных парниковых газов (ПГ)  $K = 292$  ppm-eq. В таком случае глобальное потепление будет продолжаться до 2270 г. до достижения Землей радиационно-равновесного состояния при температуре  $T_{\max} = 5$  °C, при которой уровень МО поднимется на 1150 мм.

Основная цель Парижского Соглашения по долговременному удержанию глобального потепления в пределах +2 °C является нереальной. В соответствии с функцией (6) температуру глобального потепления +2 °C можно было удержать в долговременном плане при условии, если бы человечество обеспечило углеродную нейтральность в 1985 г., когда концентрация антропогенных ПГ в атмосфере не превышала 100 ppm-eq.

При умеренном сценарии декарбонизации глобальное потепление в 2100 г. составит 2,6 °C, а общий рост уровня МО составит примерно 780 мм, из которых на долю поступивших талых вод будет приходиться около 210 мм.

При умеренном и консервативном сценариях декарбонизации климатические условия для будущих поколений окажутся намного более тяжелыми. При умеренном сценарии максимальная расчетная глобальная температура составит 6,3 °C, а уровень МО поднимется на 1960 мм, при консервативном сценарии, соответственно, 7,4 °C и 2480 мм.

В ситуации неизбежности глобального потепления первоочередным способом борьбы за сохранение комфортного существования человечества на нагревающейся планете должны стать меры по адаптации жизненного пространства к изменению климата. Именно такие необходимые действия предусматривает Климатическая Доктрина РФ (п. 22), чтобы минимизировать грядущие катастрофические последствия глобального потепления на территории России.

### Список литературы

- [1] Груза Г.В., Ранькова Э.Я., Корнева И.А., Самохина О.Ф., Антипина У.И. Особенности температурного режима поверхности Земли в 2019 г. // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2020. № 1. С. 91–123. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-2-288-323>
- [2] Тетельмин В.В. Энергетический анализ особенностей глобального потепления и его последствий // *Вестник Российской академии естественных наук*. 2023. № 3. Т. 23. С. 91–99.
- [3] King M.D., Howat I.M., Candela S.G., Noh M. J., Jeong S., Noël B.P.Y., Broeke M.R. van den, Wouters B., Negrete A. Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat // *Communications Earth & Environ.* 2020. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0001-2>.

- [4] Тетельмин В.В. Расчет глобального потепления и его последствий для трех возможных сценариев декарбонизации энергетики // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2024. № 1. С. 34–42.
- [5] Тетельмин В.В. Формула максимального глобального потепления. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. № 1. Т. 30. С. 45–57.
- [6] Тетельмин В.В. Расчетное подтверждение недостижимости климатических целей Парижского соглашения // Экология промышленного производства. 2024. № 2. С. 58–63.
- [7] Tanaka K.R., Van Houtan K.S. The recent normalization of historical marine heat extremes. // Maite de Castro. University of Vigo. Spain: PLOS Clim, 2022. 13 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm0000007>
- [8] Мохов И.И. Изменение климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14.

### References

- [1] Gruza GV, Rankova EY, Korneva IA, Samokhina OF, Antipina UI. Features of the temperature regime of the Earth's surface in 2019. *Fundamental and Applied Climatology*. 2020;1:91–123. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2024-2-288-323>
- [2] Tetelmin VV. Energy analysis of the features of global warming and its consequences. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*. 2023;3(23):91–99.
- [3] King MD, Howat IM, Candela SG, Noh MJ, Jeong S, Noel BPY, Broeke MR, Wouters B, Negrete A. Dynamic Ice Loss from the Greenland Ice Sheet Driven by Sustained Glacier Retreat. *Communications Earth & Environ*. 2020;1:1–7. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0001-2>
- [4] Tetelmin VV. Calculation of global warming and its consequences for three possible scenarios of energy decarbonisation. *Use and protection of natural resources in Russia*. 2024;1:34–42.
- [5] Tetelmin VV. Formula of maximum global warming. *Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety*. 2022;1:45–57.
- [6] Tetelmin VV. Calculated confirmation of unattainability of climate goals of the Paris Agreement. *Ecology of industrial production*. 2024;2:58–63.
- [7] Tanaka KR, Van Houtan KS. The recent normalization of historical marine heat extremes. *Maite de Castro. University of Vigo. Spain: PLOS Clim*; 2022. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm0000007>
- [8] Mokhov II. Climate change: causes, risks, consequences, problems of adaptation and regulation. *Vestnik RAS*. 2022;92(1):3-14.

### Сведения об авторе:

Тетельмин Владимир Владимирович, академик РАН, член Общественного совета при Минэнерго РФ, доктор технических наук, профессор, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. SPIN-код: 54521315. 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. SPIN-code: 54521315. E-mail: v-tetelmin@rambler.ru