

Количественная оценка глобального потепления

В.В. Тетельмин^{1,2}✉

¹ Институт экологии РУДН им. Патриса Лумумбы, г. Москва, Российская Федерация

² Общественный совет при Минэнерго РФ, г. Москва, Российская Федерация

✉ v-tetelmin@rambler.ru

Резюме: Приводится сводная таблица энергетических показателей глобального потепления, рассчитанных с использованием накопленных мировой наукой с 1970 г. натуральных данных. Анализ показывает, что в каждом последующем десятилетии по сравнению с предыдущим увеличивается вклад положительных обратных связей в глобальное потепление. Каждый киловатт-час производимой человечеством энергии нагревает нашу планету через парниковый эффект на 18 кВт·ч.

Приводится функция зависимости радиационно-равновесной температуры от содержания в атмосфере трех основных парниковых газов. Предлагаются функции зависимости количества накопленной тепловой энергии в климатической системе Земли и продолжительности глобального потепления от содержания антропогенных парниковых газов в атмосфере. Дается прогноз роста уровня Мирового океана и предельного значения частоты природных стихийных бедствий с течением времени.

Если человечество снизит к 2060 г. выбросы парниковых газов в два раза, то глобальное потепление будет прогрессировать в течение примерно 210 лет до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2°C. Следование этому сценарию предотвратит в будущем возможное дополнительное нагревание атмосферы примерно на 4,7°C.

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

Для цитирования: Тетельмин В.В. Количественная оценка глобального потепления. *Горная промышленность*. 2023;(3):64–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-64-70>

Quantitative estimation of global warming

V.V. Tetelmin^{1,2}✉

¹ Institute of Ecology of the Russian Peoples' Friendship University named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation

² Public Council at the Ministry of Energy of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

✉ v-tetelmin@rambler.ru

Abstract: The paper presents a summary table of global warming energy patterns calculated using historical natural data accumulated by the world science. The analysis shows that in each successive decade contribution of the positive feedbacks to global warming is increasing as compared to the preceding decade. Each kilowatt-hour of energy produced and used by the humanity warms up our planet through the human-caused greenhouse effect by 18 kWh.

The dependence functions of the radiative temperature equilibrium on the content of the three main greenhouse gases in the atmosphere have been derived. We propose functions for the dependence of the amount of accumulated thermal energy in the Earth's climatic system and the duration of global warming on the amount of the man-made greenhouse gases in the atmosphere. A forecast of the global sea level rise and the marginal frequency of natural disasters over time is provided.

If the mankind has halved greenhouse gas emissions by 2060, the global warming will progress for about 210 years until it reaches the radiation equilibrium temperature of 4,2°C. By following this scenario, it will be possible to prevent a possible additional warming of the atmosphere by about 4,7°C in the future.

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

For citation: Tetelmin V.V. Quantitative estimation of global warming. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):64–70. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-64-70>

Введение

В XXI в. климатологи всего мира пришли к заключению, что наблюдаемое глобальное изменение климата – это следствие роста антропогенных парниковых газов в атмосфере. Выбросы парниковых газов (ПГ) расшатывают климатическую систему (КС) Земли, основными составляющими которой являются Мировой океан (МО), атмосфера и суша. 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.

До 1850 г. содержание основных ПГ в атмосфере было следующим: CO₂ 280 ppm (2,24·10¹² т), метан 0,7 ppm (2,03·10⁹ т), закись азота 0,26 ppm (2,08·10⁹ т). Современные годовые выбросы мировой экономикой основных парниковых газов примерно следующие: CO₂ около 40 млрд т; CH₄ – 330 млн т; N₂O – 8,2 млн т. К 2020 г. содержание накопленных в атмосфере выбросов антропогенных ПГ составило 182 ppm-eq.

Современная наука предсказывает поджидающие человечество опасности и призывает постепенно отходить от использования ископаемого топлива с переходом на использование возобновляемой энергии. Парижское соглашение к Рамочной Конвенции ООН об изменении климата направлено на ограничение к 2050 г. роста глобальной температуры максимальным значением 2°C сверх доиндустриального уровня. Для достижения этой цели предлагается в ближайшие 30 лет в два раза сократить выбросы ПГ.

Методы и материалы

Для прогноза глобального потепления строятся сложные математические модели энергетического баланса (ЕВМ), в которых задается дополнительное тепловое излучение ПГ, воспринимаемое земной поверхностью. В настоящей статье в прогнозных расчетах используется ряд функций, выведенных автором на основе анализа натуральных данных процесса накопления тепловой энергии климатической системой Земли. Основными источниками информации явились Четвертый, Пятый и Шестой Оценочные доклады Межправительственной группы экспертов ООН (МГЭИК) по изменению климата [1–4].

Основными показателями происходящих изменений в климатической системе являются: выбросы парниковых газов, сопутствующие производству антропогенной энергии [1]; повышение средней глобальной температуры атмосферы, заметный рост которой начался с 1910 г. [3]; увеличение накопленной в климатической системе Земли тепловой энергии [4]; увеличение частоты природных стихийных бедствий¹.

С использованием систематизированных натуральных данных выполнены расчеты основных энергетических характеристик процесса глобального потепления, представленные в виде таблиц, рисунков и функций. Выявлены общие закономерности энергообмена между парниковыми газами атмосферы и климатической системой Земли, экстраполяция которых позволяет рассчитывать темпы и пределы глобального потепления при различных сценариях антропогенных выбросов ПГ. Содержание основных

ПГ в атмосфере (CO₂, CH₄, N₂O) приводится в единицах, эквивалентных потенциалу глобального потепления диоксида углерода GWP на горизонте 100 лет (t-eq и ppm-eq).

Результаты

За последние полтора века человечество произвело и использовало около 8,3·10¹⁵ кВт·ч энергии, в результате чего к 2020 г. в атмосфере накопилось около 182 ppm-eq антропогенных парниковых газов, содержание которых повысилось до значений: CO₂ – 416 ppm, CH₄ – 1,88 ppm, N₂O – 0,335 ppm. Следствием выбросов ПГ явилось накопление в климатической системе (КС) Земли парниковой тепловой энергии в количестве около 160·10¹⁵ кВт·ч [4]. Можно сказать, что «энерго-климатическая цена» использования человечеством ископаемого топлива оказалась очень высокой: каждый киловатт-час производства антропогенной энергии обеспечивает накопление в КС Земли около 18 кВт·ч парниковой тепловой энергии. Главным аккумулятором накопленной тепловой энергии является Мировой океан – около 91%, на сушу приходится около 5%, на льды около 3%; на атмосферу около 1,0% энергии.

Представляется, что при наблюдающихся рассогласованных действиях мирового сообщества наиболее вероятным результатом планируемого двойного сокращения глобальных выбросов является следующий: содержание антропогенных ПГ в атмосфере удастся стабилизировать к 2060 г. на уровне 233 ppm-eq (1,75·10¹² т-eq). После достижения концентрации K = 233 ppm-eq глобальная температура атмосферы будет в течение продолжительного времени приближаться к некоторому предельному значению, соответствующему радиационно-равновесному состоянию системы «Земля – Космос».

Приемлемая для прикладных расчетов функция зависимости вклада антропогенных ПГ в радиационно-равновесную температуру от их содержания в атмосфере предложена в [5; 6]. При современных параметрах орбиты Земли и значении солнечной постоянной 1368 Вт/м², когда планета находится в комфортном для жизни состоянии межледникового периода, зависимость максимального глобального потепления T_{max} от содержания выбросов антропогенных ПГ определяется следующей функцией, град:

$$T_{\max} = (20,9 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12,3 \cdot 10^{-6} \cdot K^2), \quad (1)$$

где K (ppm-eq) – эквивалент объемного содержания в атмосфере антропогенных выбросов трех основных (CO₂, CH₄, N₂O) парниковых газов.

Из функции (1) следует, что содержание антропогенных ПГ, при котором наступает «парниковое насыщение» атмосферы K_{НАС} = 850 ppm-eq, а максимально возможный вклад антропогенных ПГ в глобальное потепление составляет T_{НАС} = 8,9°C. При концентрации антропогенных ПГ K ≥ K_{НАС} атмосфера перестанет откликаться повышением температуры на дальнейшие выбросы.

На рис. 1 приводится график увеличения накопленной за 50 лет наблюдений парниковой тепловой энергии, взятый из материалов Доклада МГЭИК [4]. Этот график отражает данные о потеплении атмосферы, суши и верхних слоев Мирового океана и позволяет определять значения приращения тепловой энергии, получаемой КС Земли за 10-летние периоды наблюдений.

Таблица 1. Накопленные выбросы антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетические характе-

¹ 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).

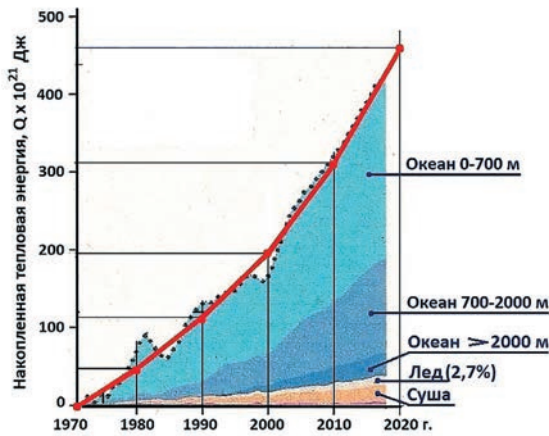


Рис. 1
Увеличение количества парниковой тепловой энергии, аккумулированной климатической системой Земли

Fig. 1
Increase in the amount of greenhouse heat energy accumulated by the Earth's climate system since the mid-20th century

Таблица 1
Накопленные выбросы антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетические характеристики процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за климатической системой Земли

Table 1
Accumulated human-caused greenhouse gas emissions in the atmosphere and the field energy profiles of global warming over the past 50 years of observations of the Earth's climate system

Годы	Содержание выбросов ПГ в атмосфере K, ppm-eq	Рост содержания тепла в КС Q ₀ ·10 ¹⁵ , кВт·ч/10 лет	Рост температуры атмосферы ΔT, град/10 лет	Эффективность поглощения тепла КС, q·10 ¹² , кВт·ч/год·ppm-eq	Мощность поглощения парниковой энергии i, Вт/м ²	Доля тепла, остающегося в атмосфере, n, %
1970–1980	77,5	13,3	0,165	17,2	0,30	1,84
1980–1990	101,4	19,8	0,170	19,5	0,44	1,27
1990–2000	121,0	24,6	0,175	20,3	0,55	1,05
2000–2010	141,4	31,0	0,180	21,9	0,69	0,86
2010–2020	168,6	38,3	0,185	22,7	0,86	0,72

ристики процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений за климатической системой Земли

Приведенные в табл. 1 энергетические параметры глобального потепления являются результатом всех видов радиационной и нерадиационной передачи парниковой тепловой энергии климатической системе Земли, включая все виды положительных и отрицательных обратных связей. Наиболее значимыми факторами проявления положительных обратных связей, помимо снижения альбедо, являются: усиление конвективного переноса тепла из тропиков в высокие широты; деградация криолитозоны арктического шельфа и тундры с выбросом метана из газогидратных кластеров; увеличение влажности сухого арктического воздуха, сопровождающееся увеличением парникового эффекта. На основании анализа приведенных в табл. 1 энергетических особенностей процесса глобального потепления предлагается к использованию ряд следующих расчетных функций [7].

После середины 1970-х годов положительные обратные связи активизировали темп передачи парникового тепла Мировому океану и КС Земли в целом. Для этого периода зависимость интенсивности получаемой климатической системой (КС) тепловой энергии Q₀ от концентрации антропогенных ПГ имеет следующий вид:

$$Q_0 = 276 \cdot 10^{12} \cdot (K - 30) \text{ [кВт·ч/10 лет]}, \quad (2)$$

где K – среднее значение объемной концентрации антропогенных ПГ в атмосфере в расчетном 10-летнем периоде времени. Это выражение, отражающее медианную реакцию КС на увеличение содержания ПГ в атмосфере, справедливо при изменении концентрации ПГ в следующих пределах: 85 ppm-eq ≤ K ≤ 235 ppm-eq.

Эффект глобального потепления от экранирующего действия антропогенных выбросов ПГ является отложенным во времени. Продолжительность глобального потепления t_{max} до достижения радиационного баланса в системе «Земля – Космос» определяется следующей зависимостью [7]:

$$t_{\max} = 10^2 \cdot (T_{\max} - T_0) \cdot m \cdot c_p / 0,5n \cdot Q_0 \text{ (годы)}, \quad (3)$$

где t_{max} – время, определяемое количеством 10-летних периодов; T₀ – начальная глобальная температура атмосферы; m = 5,18·10¹⁵ т – масса атмосферы; c_p = 0,286 кВт·ч/т·град – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; n – доля, %, тепловой энергии, остающаяся в атмосфере в каждом 10-летнем акте теплообмена КС с отраженной парниковыми газами радиацией (табл. 1).

Накопленная в КС за время t тепловая энергия определяется следующей зависимостью:

$$\Sigma Q_{\text{КС}} = Q_0 \cdot (2t_{\max} - t) / 2t_{\max} \text{ [кВт·ч]}, \quad (4)$$

где t – время, определяемое количеством 10-летних периодов.

На рис. 2 приводятся рассчитанные с помощью функций (1)–(4) кривые роста накопленной КС тепловой энергии для двух сценариев достижения углеродной нейтральности. Эти кривые являются продолжением эмпирического графика (см. рис. 1) для двух возможных сценариев выбросов ПГ. Если бы углеродная нейтральность была обеспечена в 2020 г. (кривая 3), то потепление продолжалось бы до 2240 г. и достигло бы предельного значения T_{max} = 3,4 °С.

Кривая 2 отвечает сценарию вероятного достижения КС углеродной нейтральности к 2060 г. при содержании антропо-

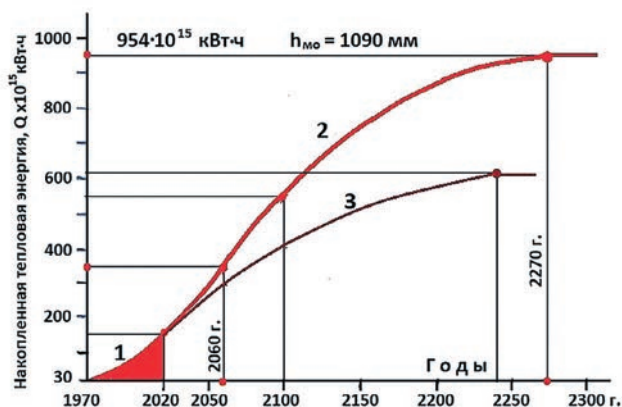


Рис. 2
Расчетные кривые роста накопленной КС тепловой энергии для двух сценариев достижения углеродной нейтральности:
1 – эмпирическая кривая рис. 1;
2 – углеродная нейтральность достигнута к 2060 г. при содержании антропогенных ПГ в атмосфере $K = 233$ ppm-eq;
3 – углеродная нейтральность достигнута в 2020 г. при $K = 182$ ppm-eq

Fig. 2
Calculated curves of the accumulated CC heat energy growth for the two scenarios of achieving carbon neutrality:
1 – empirical curve of Fig. 1;
2 – carbon neutrality is achieved by 2060 with the anthropogenic GHG content in the atmosphere $K = 233$ ppm/eq.;
3 – carbon neutrality is achieved in 2020 with $K = 182$ ppm/eq

погенных ПГ в атмосфере $K = 233$ ppm-eq. После 2060 г. при постоянном значении $K = 233$ ppm-eq планета Земля будет нагреваться в течение $t_{max} = 210$ лет и к 2270 г. КС накопит тепловую энергию в количестве $954 \cdot 10^{15}$ кВт·ч. Эта энергия в первую очередь пойдет на нагревание вод Мирового океана и таяние льдов.

На рис. 3 приводятся графики роста средней температуры глобального потепления для трёх сценариев достижения углеродной нейтральности. Из функции (1) следует, что наблюдаемое в настоящее время глобальное потепление на $1,2^\circ\text{C}$ является радиационно-равновесной температурой для концентрации антропогенных ПГ в атмосфере $K = 57$ ppm-eq, которая наблюдалась в 1960 г. (кривая 4, рис. 3). Если человечество обеспечит углеродную нейтральность в 2060 г. при $K = 233$ ppm-eq, то процесс глобального потепления не прекратится, а за счет накопленных в атмосфере ПГ будет продолжаться до 2270 г. до достижения радиационно-равновесной температуры $T_{max} = 4,2^\circ\text{C}$ (кривая 2, рис. 3).

Функция (4) позволяет прогнозировать рост уровня Мирового океана (МО). Из рис. 1 следует, что на нагревание МО до глубины 2000 м расходуется 84%, а на таяние льдов 2,7% накопленной КС тепловой парниковой энергии. С помощью гипсометрической кривой поверхности земной коры [8] находим, что в пределах глубин МО до 2000 м находится $643 \cdot 10^{15}$ т воды. Из рис. 2 следует, что в период с 2020 по 2060 г. КС получит $\Sigma Q_{КС} = 201 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии, из которой $176 \cdot 10^{15}$ кВт·ч (84%) пойдет на нагревание вод МО до глубины 2000 м. При коэффициенте теплового расширения воды $\beta = 16,5 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹ указанный объем воды увеличится на $25 \cdot 10^{12}$ м³, что обеспечит подъем уровня МО на 70 мм.

Из полученной за рассматриваемый период тепловой энергии на таяние льдов будет использовано $5,64 \cdot 10^{15}$ кВт·ч

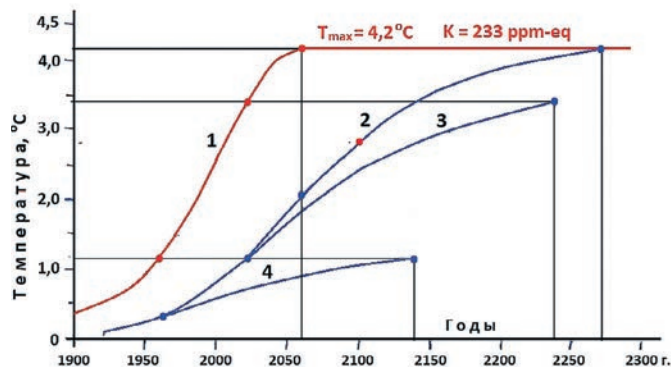


Рис. 3
Динамика роста глобальной температуры для трех сценариев достижения углеродной нейтральности:
1 – кривая изменения радиационно-равновесной температуры T_{max} , соответствующая изменению концентрации антропогенных ПГ в атмосфере;
2 – углеродная нейтральность обеспечена в 2060 г. при $K = 233$ ppm-eq;
3 – углеродная нейтральность обеспечена в 2020 г. при $K = 182$ ppm-eq;
4 – углеродная нейтральность обеспечена в 1960 г. при $K = 57$ ppm-eq

Fig. 3
Dynamics of the global temperature rise for the three scenarios of carbon neutrality:
1 – curve of the radiative equilibrium temperature T_{max} , corresponding to changes in the human-caused GHG concentrations in the atmosphere;
2 – carbon neutrality is achieved in 2060 with $K = 233$ ppm/eq;
3 – carbon neutrality is achieved in 2020 with $K = 182$ ppm/eq;
4 – carbon neutrality is achieved in 1960 with $K = 57$ ppm/eq

(2,7%) тепла. На фазовый переход «лед–вода» требуется $83,6$ кВт·ч/м³ тепловой энергии. Отсюда получаем объем материковых льдов $66,8$ тыс. км³, который будет расплавлен в период 2020–2060 гг. Ввиду разницы в плотности образовавшийся за счет таяния льда объем воды составит $60,1 \cdot 10^{12}$ м³, который поднимет уровень МО на 167 мм. Таким образом, за период 2020–2060 гг. нагревание КС обеспечит общий подъем уровня МО на 237 мм. В среднем темп подъема уровня МО составит 5,7 мм/год, из которых на эффект теплового расширения будет приходиться около 30%, а на эффект таяния материковых льдов около 70%.

На рис. 4 приводятся расчетные графики роста уровня Мирового океана за счет таяния материковых льдов и общего подъема уровня Мирового океана до момента достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния в 2270 г. Расчет выполнен при условии достижения к 2060 г. «углеродной нейтральности» и концентрации $K = 233$ ppm-eq. К 2270 г. в КС будет накоплена тепловая энергия в количестве $954 \cdot 10^{15}$ кВт·ч, которая растопит $306\,000$ км³ материковых льдов и поднимет уровень МО на 1090 мм.

В период 1970–2020 гг. мощность нетто-поглощения тепловой энергии КС Земли увеличилась от $i = 0,30$ до $0,86$ Вт/м² (см. табл. 1). Радиационное воздействие ПГ формирует в литосфере нисходящий тепловой поток мощностью $i = 6,2 \cdot 10^{-3} \cdot (K - 30)$ [Вт/м²], который является встречным по отношению к восходящему естественному геотермальному потоку 60 мВт/м². Поток энергии нетто-поглощения

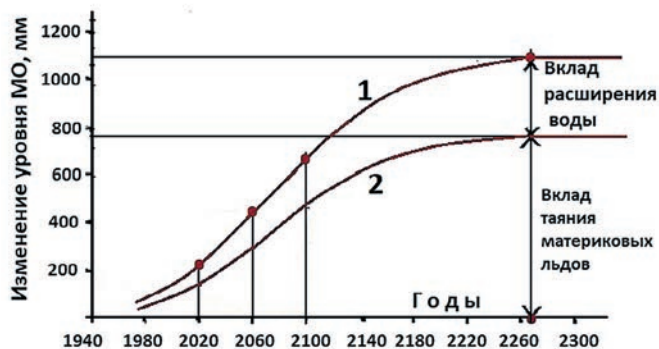


Рис. 4
Графики подъема уровня Мирового океана за счет таяния материковых льдов – 2, а также общего подъема уровня – 1 до момента достижения климатической системой Земли радиационно-равновесного состояния

Fig. 4
Graphs of the Global Sea level rise due to melting of the continental ice (2), as well as the general rise in sea level (1) up to the moment of reaching the radiation-equilibrium state in the Earth's climatic system

искажает естественное температурное поле земной коры, снижает естественный геотермический градиент, чем затрудняет разгрузку восходящего геотермального потока. К 2020 г. за счет эффекта антропогенного глобального потепления в приповерхностных слоях континентальной земной коры накопилось около $6,4 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии. Эта энергия формирует в горных породах термоупругие напряжения, потенциальная энергия которых с определенной периодичностью самопроизвольно разгружается в виде землетрясений и других геофизических стихийных бедствий (горных ударов, оползней, селевых потоков, лавин и термокарстов в криолитозоне).

По мере роста глобального потепления также активизируются спровоцированные гидрометеорологические (СГМ-события, рис. 5) и другие природные стихийные бедствия². По силе воздействия на экономику СГМ-события выходят на первое место: на тропические циклоны и приносимые ими осадки и наводнения приходится 32%, на землетрясения – 12, на засухи – 10% природных катастроф. Только в период 2000–2010 гг. отмечено 1260 метеорологических, 1944 гидрологических, 349 геофизических и 283 климатических стихийных бедствий [9]. Кинетическая энергия ураганов, штормов, тайфунов ежегодно увеличивается как за счет увеличения скорости ветра, так и за счет увеличения продолжительности их жизни. Средняя энергия тропического циклона составляет $0,3 \cdot 10^{12}$ кВт·ч, что эквивалентно энергии взрыва 250 мегатонных бомб в тротиловом эквиваленте.

В табл. 2 приводятся осредненные количественные характеристики отмеченных страховыми компаниями стихийных бедствий³ [10], а также их расчетные предель-

Таблица 2
Рост средних значений отмеченных природных стихийных бедствий, вызванных глобальным потеплением, а также их предельные расчетные значения в 2050 г.

Table 2
An increase in the mean values of observed natural disasters caused by global warming and their estimated limit values in 2050.

Процессы	1980	1995	2015	2050
Частота геофизических бедствий (СГФ-событий), число в год	26	42	54	65
Частота метеорологических бедствий (СМ-бедствий), число в год	107	175	258	358
Частота гидрологических бедствий (СГ-бедствий), число в год	80	175	290	400
Частота климатических бедствий (СК-бедствий), число в год	26	48	79	104

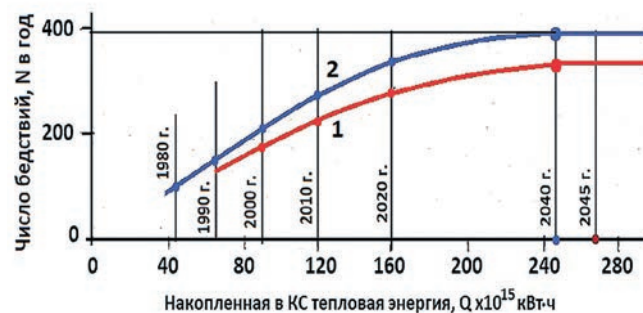


Рис. 5
Зависимость частоты отмеченных метеорологических – 1 и гидрологических – 2 стихийных бедствий от накопленной энергии глобального потепления

Fig. 5
The frequency of the observed meteorological 1 and hydrological 2 natural disasters as a function of the cumulative global warming energy

ные значения в 2050 г. Расчеты роста частоты проявления природных стихийных бедствий выполнены с использованием энергетических особенностей глобального потепления.

На рис. 5 приводятся графики роста отмеченных в период с 1980–2020 гг. средних значений частоты метеорологических и гидрологических стихийных бедствий от накопленной тепловой энергии. Видно, что каждый график, построенный по опытным точкам, стремится к некоторому своему пределу. Для метеорологических событий (СМ-бедствий) зависимость роста их частоты от количества накопленной тепловой энергии определяется следующей эмпирической зависимостью:

$$N = 2,6 \cdot 10^{-15} \cdot Q - 4,7 \cdot 10^{-33} \cdot Q^2. \tag{5}$$

² 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).

³ 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).

The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper/Group Chief Risk Officer (CRO). January.2019.

Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qCOx>. <https://munichre.com/en/risks/natural-disasters-losses-are-trending-upwards.html>

Из (5) следует, что при накоплении в КС Земли $276 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии частота катастрофических СМ-событий достигнет своего максимального значения $N = 358$ в год. При дальнейшем потеплении частота СМ-событий N увеличиваться не будет, а возможно будет только увеличение энергии отдельного СМ-события. В табл. 2 приводятся расчетные предельные значения других природных стихийных бедствий, частота которых достигает своего максимума в районе 2040–2050 гг.

В период с 1980 по 2020 г. мировая статистика регистрировала растущее число страховых случаев природных катастроф и неблагоприятных событий в год. Этот рост составил 2,5 раза и произошел в основном за счет событий метеорологического и гидрологического характера. В последнее десятилетие 2010–2020 гг. средняя частота таких случаев увеличилась до 603 в год, а в 2017 г. зарегистрирован самый высокий показатель природных стихийных бедствий (катастроф) за всю историю – 730 случаев в год ⁴.

Основной причиной роста частоты страховых случаев природных стихийных бедствий является глобальное потепление. Объединенная страховая компания CRO Forum в случае потепления на 5°C расценивает будущие последствия как катастрофические, при которых страхование большинства рисков становится невозможным⁵. В таком случае, по их прогнозам, частота экстремальных осадков (СГ-событий) увеличится на 150%, вероятность тропических циклонов (СМ-событий) 4-й и 5-й категорий увеличится на 55%, годовая сумма осадков увеличится на 35%. В случае, если наши расчеты предельных значений частоты спровоцированных опасных событий верны (табл. 3), то к 2050 г. частота СМ-бедствий, СГ-бедствий и СГФ-бедствий увеличится не более чем на 20% по сравнению с современными значениями.

Выводы

Каждый киловатт-час произведенной и накопленной человечеством антропогенной энергии нагревает планету Земля за счет парникового эффекта на 18 кВт·ч. Каждая

⁴ Global Challenges Annual Report: GCF and Thought Leaders Sharing What You Need to Know on Global Catastrophic Risks 2017: <https://bit.ly/2Z6qC0x>.

⁵ The heat is insurability and Resilience in a Changing Climate Emerging Risk Initiative-Position Paper/Group Chief Risk Officer (CRO). January.2019.

порция полученной климатической системой тепловой энергии $E = 3110$ кВт·ч/м³ обеспечивает таяние 1 м³ материковых льдов.

Предлагаемые эмпирические зависимости (1)–(4) позволяют при любом сценарии выбросов парниковых газов выполнить расчет продолжительности глобального потепления до достижения климатической системой состояния радиационного баланса.

Если человечество достигнет к 2060 г. «углеродной нейтральности» и зафиксирует содержание антропогенных парниковых газов на уровне 233 ppm-eq, то глобальное потепление будет прогрессировать до 2270 г. до достижения радиационно-равновесной температуры 4,2°C. К этому моменту уровень Мирового океана поднимется на 1090 мм.

Следование сценарию достижения «углеродной нейтральности» предотвратит в будущем возможное дополнительное нагревание атмосферы примерно на 4,7°C.

По мере роста глобальной температуры активизируются спровоцированные потеплением гидрометеорологические стихийные бедствия, суммарная частота которых к 2050 г. увеличится примерно до 758 в год.

За счет эффекта глобального потепления в приповерхностных слоях континентальной земной коры накапливается тепловая энергия, которая формирует в горных породах термоупругие напряжения, которые с определенной периодичностью разгружаются в виде геофизических стихийных бедствий, частота которых к 2050 г. вырастет примерно до 65 в год.

Намечаемое ограничение глобальных выбросов парниковых газов является экономически затратным процессом и его осуществление возможно только за счет снижения мирового ВВП. В данном случае необходимо сопоставить экономическую цену предпринимаемых человечеством усилий по сдерживанию глобального потепления с последствиями неограниченных выбросов парниковых газов и неконтролируемого роста частоты и силы спровоцированных стихийных бедствий и катастроф.

Список литературы

- Solomon S., Qin D., Manning M., Miller H.L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2007. 1007 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
- Пачаури Р., Мейер Л. (ред.) *Изменение климата, 2014 г.: Обобщенный доклад*. Женева. Швейцария: МГЭИК; 2014. 163 с. Режим доступа: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf
- Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Malley J. (eds) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2022. 48 p. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf
- Technical Summary. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2021, pp. 33–144. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf

5. Тетельмин В.В. Потенциал глобального потепления. *Охрана окружающей среды и заповедное дело*. 2022;(1):93–102.
6. Тетельмин В.В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2023;(3):27–34. <https://doi.org/10.7868/S0233361923030059>
7. Тетельмин В.В. Энергетические особенности и пределы глобального потепления. *Экология промышленного производства*. 2023;(1):51–59. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_1_51
8. Тетельмин В.В., Язев В.А. *Геоэкология углеводородов*. Долгопрудный: Интеллект; 2009. 304 с.
9. Бондур В.Г. Что болит у Земли. *В мире науки*. 2022;(1/2):5–12.
10. Tanaka K.R., Van Houtan K.S. The recent normalization of historical marine heat extremes. *PLOS Climate*. 2022;1(2):e0000007. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007>

References

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Miller H.L. (eds) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2007. 1007 p. Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf
2. Pachauri R., Meyer L. (eds) *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC; 2014. 163 p. (In Russ.) Available at: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_ru.pdf
3. Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M., Hasija A., Lisboa G., Luz S., Malley J. (eds) *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2022. 48 p. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicy-makers.pdf
4. Technical Summary. In: Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2021, pp. 33–144. Available at: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
5. Tetelmin V.V. Global warming potential. *Okhrana okruzhayushchei sredy i zapovednoe delo*. 2022;(1):93–102. (In Russ.)
6. Tetelmin V.V. Energy patterns and limits of global warming. *Energiya: Ekonomika, Tekhnika, Ekologiya*. 2023;(3):27–34. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0233361923030059>
7. Tetelmin V.V. Energy patterns and limits of global warming. *Industrial Ecology*. 2023;(1):51–59. (In Russ.) https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_1_51
8. Tetelmin V.V., Yazev V.A. *Hydrocarbon geoecology*. Dolgoprudnyi: Intellekt; 2009. 304 p. (In Russ.)
9. Bondur V.G. What makes the Earth sick. *V mire nauki*. 2022;(1/2):5–12. (In Russ.)
10. Tanaka K.R., Van Houtan K.S. The recent normalization of historical marine heat extremes. *PLOS Climate*. 2022;1(2):e0000007. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000007>

Информация об авторе

Тетельмин Владимир Владимирович – доктор технических наук, главный специалист Института экологии РУДН им. Патриса Лумумбы, член Общественного совета при Минэнерго РФ, Москва, Российская Федерация; e-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Information about the author

Vladimir V. Tetelmin – Dr. Sci. (Eng.), Chief Specialist of the Institute of Ecology of the Russian Peoples' Friendship University named after Patrice Lumumba, member of the Public Council at the Ministry of Energy of the Russian Federation; Moscow, Russian Federation; e-mail: v-tetelmin@rambler.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 23.04.2023
Поступила после рецензирования: 15.05.2023
Принята к публикации: 22.05.2023

Article info

Received: 23.04.2023
Revised: 15.05.2023
Accepted: 22.05.2023