Климатические ресурсы

EDN MFAKMO

УДК 551.583

Работа мощности парникового эффекта на усиление опасных природных последствий глобального потепления в XXI веке при умеренном сценарии декарбонизации энергетики

В. В. Тетельмин, д.т.н.,
Институт экологии Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Приводятся ранее выведенные автором функции мощности парникового эффекта и температурной чувствительности земной системы к выбросам парниковых газов. Отмечается необходимость характеризовать состояние земной системы, нагревающейся от действия парникового эффекта, двумя значениями глобальной температуры: текущей температурой и радиационно-равновесной температурой. Верификация содержащихся во второй и четвертой статьях Парижского соглашения количественных климатических целей выявила их недостоверность и невозможность использования при принятии управленческих климатических решений. Приводится функция интенсивности поглощения парниковой тепловой энергии земной поверхностью и схема основных энергетических потоков в современной климатической системе Земли. Предлагается умеренный сбалансированный сценарий декарбонизации мировой экономики со снижением к 2100 г. выбросов в атмосферу парниковых газов в два раза до 1,5 ppm-eq/год. Дается прогноз роста основных показателей глобального потепления и роста частоты повторяемости опасных природных последствий в XXI в. для умеренного сценария декарбонизации мировой хозяйственной деятельности.

Ключевые слова: глобальное потепление, мощность парникового эффекта, радиационно-равновесная температура, умеренный сценарий декарбонизации, природные стихийные бедствия.

С начала XX века текущее значение средней глобальной температуры приземного слоя атмосферы +15°С увеличилось к 2020 г. примерно на 1,2 °С. Климатологи пришли к заключению, что наблюдаемое «широкомасштабное, быстрое и усиливающееся изменение климата» — это следствие роста антропогенных парниковых газов (ПГ) в атмосфере [1].

До начала индустриального периода (в голоцене) средняя концентрация каждого из трех основных ПГ в атмосфере примерно составляла: диоксида углерода — 280 ppm (объемных миллионных долей); метана — 0,7 ppm; закиси азота — 0,27 ppm. В переводе на единицы, эквивалентные потенциалу глобального потепления диоксида углерода (GWP), общая доиндустриальная концентрация этих трех ПГ составляла около 370 ppm-eq. Привнесение человеком в атмосферу этих ПГ сместило веками установившееся равновесие теплового взаимодействия Мирового океана, суши и атмосферы с космическим пространством. С 1900 г. человечество выбросило в окружающую среду около 2,4 трлн т диоксида углерода, из которых более половины (примерно 55%) усваивают растительность планеты и Мировой океан, а вторая половина выбросов CO_2 остается в атмосфере. Современные годовые выбросы мировой экономикой трех основных антропогенных парниковых газов в единицах массы следующие: CO_2 — около 40 млрд т; CH_4 — 330 млн т, N_2O — 8,2 млн т.

Результатом антропогенных выбросов ПГ и работы сформированного ими парникового эффекта (ПЭ) явилось накопление в климатической системе (КС) Земли к 2020 г. около $215 \cdot 10^{15}$ кВт·ч тепловой энергии, в результате каждый произведенный человечеством кВт·ч энергии нагревал через ПЭ Землю на 25 кВт·ч [2]. Такова «климатическая цена» производимой и используемой современным человечеством энергии. В *табл. 1* приводятся систематизированные натурные данные об основных энергетических характеристиках про-

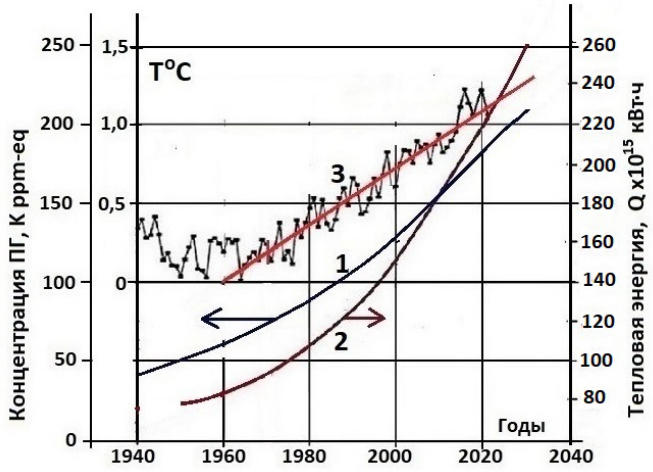


Рис. 1. **Графики изменения трех основных параметров глобального потепления с середины XX века:** 1 – концентрация ПГ в атмосфере; 2 – накопленная Землей парниковая тепловая энергия; 3 – средняя глобальная температура приземного слоя атмосферы (земной поверхности)

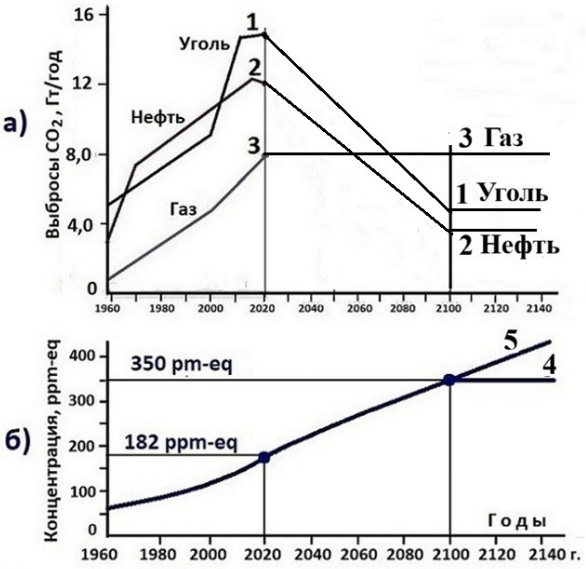


Рис. 2. **Умеренный сценарий декарбонизации мировой энергетики с накоплением к 2100 г. концентрации антропогенных парниковых газов в атмосфере K = 350 ppm-eq:** а) – снижение выбросов за счет снижения сжигания угля и нефти; б) – график роста концентрации ПГ в атмосфере до 2100 г. с последующей стабилизацией концентрации

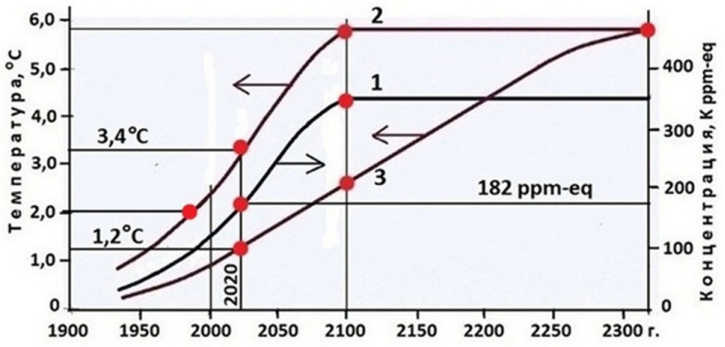


Рис. 3. **Графики синхронного роста двух значений глобальной температуры при умеренном сценарии декарбонизации энергетики и гипотетическом обеспечении углеродной нейтральности в 2100 г.:** 1 – концентрация антропогенных выбросов ПГ в атмосфере; 2 – соответствующая глобальная радиационно-равновесная температура; 3 – средняя текущая глобальная температура земной поверхности

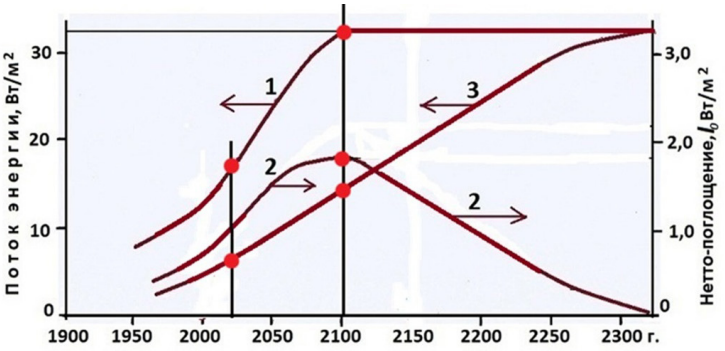


Рис. 4. **Графики изменения трех параметров в земной системе при умеренном сценарии декарбонизации и гипотетическом обеспечении в 2100 г. углеродной нейтральности:** 1 – мощность ПЭ; 2 – нетто-поглощение тепловой энергии земной системой (радиационный форсинг); 3 – собственное тепловое излучение земной поверхности

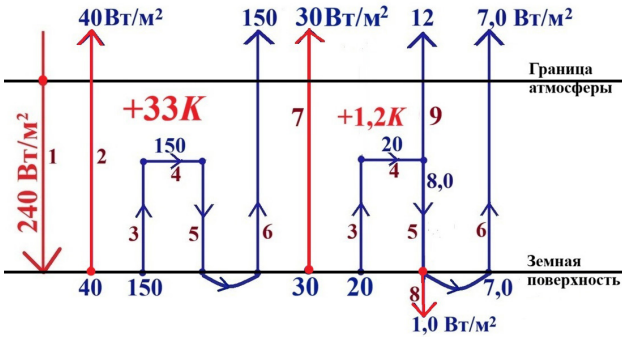


Рис. 5. **Схема радиационных потоков в климатической системе Земли в 2025 г., сформированных поступающей инсоляцией 240 Вт/м² и работой ПЭ:** 2 – мощность отраженного теплового излучения Земли, уходящая в Космос через «атмосферное окно»; 3, 4 – часть мощности отраженного теплового излучения земной поверхности, перехваченная ПГ, определяющая мощность ПЭ; 5 – усвоенная земной поверхностью тепловая мощность ПЭ; 6 – собственное тепловое излучение земной поверхности, нагревшейся за счет мощности ПЭ; 7 – не перехваченная ПГ мощность отраженного земной поверхностью излучения; 8 – нетто-поглощение земной поверхностью части мощности ПЭ; 9 – временно нереализованная (временно неусвоенная земной поверхностью) мощность ПЭ; +33K – повышение глобальной температуры земной поверхности за счет работы мощности природного ПЭ в доиндустриальный период; +1,2K – повышение глобальной температуры земной поверхности за счет работы мощности антропогенного ПЭ

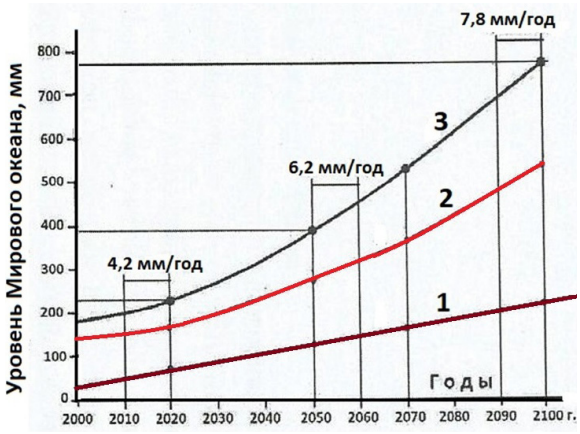


Рис. 6. **Графики расчетного роста уровня Мирового океана до 2100 г. при умеренном сценарии декарбонизации энергетики:** 1 – за счет таяния материковых льдов; 2 – за счет теплового расширения воды; 3 – общий рост

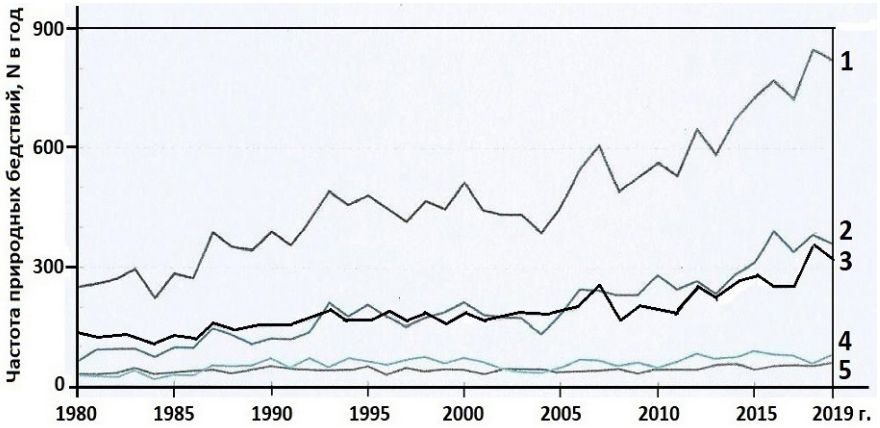


Рис. 7. **Графики роста частоты проявления произошедших в мире катастрофических природных стихийных бедствий, отмеченных страховыми компаниями в период 1980–2020 гг.:** 1 – общее количество; 2 – гидрологические; 3 – метеорологические; 4 – климатические; 5 – геофизические [15]

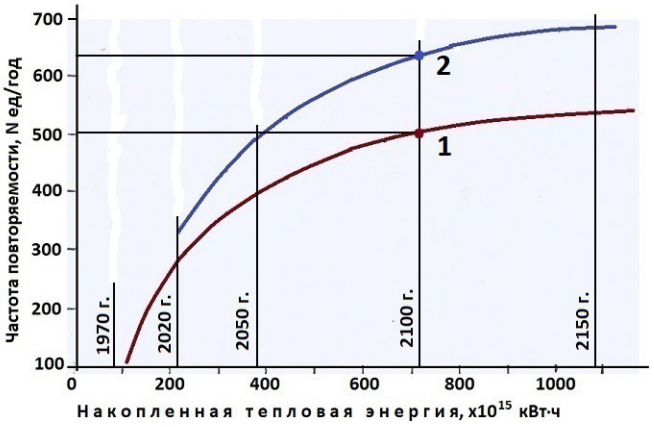


Рис. 8. **График роста частоты отмеченных в мире страховыми компаниями катастрофических бедствий в зависимости от накопленной планетой тепловой энергии:** 1 – метеорологические; 2 – гидрологические

Таблица 1

Накопленные выбросы антропогенных парниковых газов в атмосфере и энергетические характеристики процесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений

Годы	*Концентрация выбросов ПГ в атмосфере, K ppm-eq*	*Рост содержания тепла в КС, $\Delta Q \cdot 10^{15}$ кВт·ч / 10 лет*	*Рост текущей температуры атмосферы, ΔT °C / 10 лет*	*Интенсивность поглощения тепла, I0 Вт / м²*
1970-1980	82,0	14,2	0,165	0,32
1980-1990	101,4	19,4	0,175	0,43
1990-2000	121,0	24,6	0,175	0,55
2000-2010	141,4	31,0	0,175	0,69
2010-2020	168,6	38,3	0,175	0,86

цесса глобального потепления за последние 50 лет наблюдений, а на *рис. 1* (см. вклейку) приводятся соответствующие графики роста значений трех климатических параметров [3]. Перед современной цивилизацией возникают вопросы: как будут изменяться параметры глобального потепления на протяжении XXI в., а также насколько в будущем усилится частота природных стихийных бедствий (ПСБ), вызванных глобальным потеплением?

Провозглашенный глобальный энергопереход должен осуществляться не по принципу «сделать быстро» и достичь во второй половине XXI в. углеродной нейтральности как того необоснованно требует Парижское соглашение [4], а посредством экологически допустимого и технически осуществимого темпа замещения ископаемого топлива (ИТ) и ввода в эксплуатацию различных видов альтернативной генерации. Вектор эволюции человека как любого живого организма всегда направлен в сторону интенсификации потребления энергии. Именно рост использования энергии обеспечил рост численности современной цивилизации, научно-технический прогресс и высокий уровень жизни, поэтому человечеству под лозунгом борьбы с глобальным потеплением трудно будет снижать потребление энергии от достигнутого уровня. Человечество в скором времени будет вынуждено снижать использование ИТ по мере истощения его запасов в земных недрах.

Наиболее реальным для осуществления энергоперехода представляется умеренный сценарий декарбонизации энергетики [5]. Предлагаемый сценарий примерно отвечает балансу между производственно-экологическими возможностями замещения ИТ альтернативной энергетикой и последующей возможной социально-экономической напряженностью в мировом сообществе, вызванной дефицитом энергии и ростом цен на неё [2]. При реализации умеренного сценария декарбонизации энергетики с темпом снижения выбросов 2 ppm-eq/10 лет выбросы в атмосферу снизятся к 2100 г. с современного уровня 29 ppm-eq/10 лет до 15 ppm-eq/10 лет, а в атмосфере к тому времени накопится около 350 ppm-eq антропогенных ПГ (*рис. 2, см. вклейку*).

При умеренном сценарии выбросы CO_2 в энергетике к 2100 г. снизятся с 35 Гт/год до 15 Гт/год за счет сокращения использования угля и нефти. При этом природный газ как наиболее экологичное топливо будет в дальнейшем использоваться не ниже современного уровня около 4 млрд м^3/год с выбросом массы CO_2 около 8 Гт/год. В таком случае производство энергии за счет ИТ снизится с современного уровня 140 ПВт·ч/год наполовину, а выпадающее производство энергии в объеме 70 ПВт·ч/год необходимо будет заместить альтернативной генерацией. При этом следует иметь ввиду, что ни один из видов альтернативной энергетики не является чистым от выбросов ПГ [2].

Человечество может также придерживаться консервативного сценария выбросов и производства энергии, продолжая использовать ИТ в современном объеме и выбрасывать в окружающую среду до 35 Гт/год диоксида углерода CO_2. В таком случае в атмосфере к 2100 г. накопится около 420 ppm-eq ПГ. Каждая страна должна формировать Энергоклиматическую повестку, исходя из безусловного приоритета национальных целей развития отраслей экономики. Именно так поступила Россия, разработавшая Энергетическую стратегию на период до 2050 г., в которой при консервативном сценарии развития энергетики предполагается к 2050 г. ежегодно поставлять на внутреннее потребление примерно современные объемы ИТ: 260 млн т нефти; 130 млн т угля; 600 млрд куб. м природного газа.

Следует отметить, что обозначенные консервативный и умеренный сценарии декарбонизации энергетики являются промежуточными относительно двух крайних сценариев RCP4.5 (в 2100 г. антропогенная концентрация K = 280 ppm-eq) и RCP6.0 (в 2100 г. K = 480 ppm-eq), которые приводятся в Пятом оценочном докладе МГЭИК и представляются как наиболее вероятные [6]. В этих компьютерных климатических моделях антропогенное воздействие на глобальный климат за пределами XXI века учитывалось на уровне антропогенного воздействия в 2100 г.

Парниковые газы обеспечивают непрозрачность атмосферы для тепловых фотонов определенных длин волн, при этом спектры поглощения отдельных ПГ частично пересекаются, поэтому поглощение ИК-излучения смесью ПГ не обладает свойством аддитивности. Основным граничным условием, определяющим процесс наблюдаемого глобального потепления, является увеличивающаяся год от года концентрация K антропогенных ПГ в атмосфере. Для обеспечения роста глобальной температуры и нагревания Земли необходим до-

полнительный источник внешней энергии. Таким источником является поток перехваченной атмосферными ПГ отраженной земной поверхностью длинноволновой радиации, формирующей *мощность парникового эффекта* J_R (Вт/м^2). Этот присутствующий в атмосфере в виде явного тепла поток перехваченной мощности ИК-излучения определяет энергетику парникового эффекта (ПЭ).

«Заторможенная» по определению К. Тренберта [7] атмосферными парниковыми газами *мощность* J_R парникового эффекта является тем радиационным возмущающим воздействием на климатическую систему (КС) Земли, которое запускает процесс глобального потепления. Функция зависимости мощности J_R ПЭ от концентрации **антропогенных** ПГ в земной атмосфере имеет следующий вид [8]:

$$J_R = 117 \cdot 10^{-3} \cdot K - 67 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 \ (Вт/м^2), \qquad (1)$$

где: $0 \leqslant K \leqslant 870$ ppm-eq — значение концентрации антропогенных ПГ в атмосфере.

Чувствительность земной системы к воздействию антропогенных парниковых газов характеризуется значением глобальной радиационно-равновесной температуры приземного слоя атмосферы (земной поверхности) T_R, соответствующей определенному фиксированному значению концентрации K ppm-eq ПГ в атмосфере. Планета Земля на протяжении всей своей истории соответствующим образом реагировала на изменение содержания ПГ в атмосфере. Изучение закономерностей исторических изменений концентрации ПГ в атмосфере и глобальной равновесной температуры в ледниковые периоды, в эпоху голоцена, а также в современном индустриальном периоде позволили найти решение вековой задачи шведского физико-химика Сванте Аррениуса о чувствительности земной системы к двойному увеличению концентрации CO_2 в атмосфере и в целом к увеличению выбросов ПГ [9].

Решение задачи о чувствительности земной системы к выбросам ПГ получено в виде эмпирической функции зависимости глобальной радиационно-равновесной температуры приземного слоя атмосферы (земной поверхности) от концентрации ПГ в атмосфере [10].

$$T_R = 21 \cdot 10^{-3} \cdot K - 12 \cdot 10^{-6} \cdot K^2 \ (^\circ C), \qquad (2)$$

где: $0 \leqslant K \leqslant 870$ ppm-eq — значение концентрации **антропогенных** ПГ в атмосфере.

Значение радиационно-равновесной температуры T_R — это предел, к которому стремится текущая глобальная температура земной поверхности $T_{ЗП}$ при фиксированном содержании парниковых газов в атмосфере. Получаемая с помощью функции чувствительности (2) радиационно-равновесная температура является следствием всех происходивших на Земле многочисленных конвективных и теплообменных процессов, а также изменения состояний атмосферы и земной поверхности. Экстраполяция этой функции позволяет рассчитывать глобальное изменение климата в будущем.

Из функций (1) и (2) следует, что при умеренном сценарии декарбонизации увеличение концентрации ПГ в атмосфере на $\Delta K = 1$ ppm-eq увеличивает мощность ПЭ на величину $\Delta J_R = 0{,}08$ Вт/м^2, а радиационно-равновесную температуру на $\Delta T_R = 0{,}015^\circ$C. Увеличение концентрации на $\Delta K = 1$ ppm-eq по обогревающему воздействию на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу примерно на 11 тыс. км [11]. В текущем десятилетии с 2020 по 2030 гг. человечество выбросит в атмосферу не менее 29 ppm-eq ПГ, что усилит мощность ПЭ на 2,3 Вт/м^2 и сделает климат на Земле жарче настолько, как если бы Земля приблизилась к Солнцу на 320 тыс. км.

По мере накопления парниковой тепловой энергии и роста текущей глобальной температуры активизируются многие конвективные и теплообменные процессы, однако на конечный результат глобального потепления влияют только значения концентрации парниковых газов в атмосфере и мощности ПЭ. Можно сказать, что все процессы круговорота вещества и энергии в КС Земли «подстраиваются» под мощность ПЭ. Значение K (ppm-eq) — это единственное граничное условие процесса потепления, влияющее на конечные значения накопленной Землей парниковой тепловой энергии Q (кВт·ч), радиационно-равновесной температуры T_R°C и собственного теплового излучения земной поверхности $J_{ЗП} = J_R$ (Вт/м^2).

При фиксированной концентрации K (ppm-eq) процесс глобального потепления неизбежно заканчивается повышением текущей глобальной температуры земной поверхности $T_{ЗП}$ до соответствующей радиационно-равновесной температуры T_R и повышением собственного теплового излучения земной поверхности $J_{ЗП}$ на величину мощности ПЭ J_R (Вт/м^2). Можно сказать, что в процессе глобального потепления происходит передача содержащейся в атмосфере тепловой мощности парникового эффекта J_R мощности собственного теплового излучения земной поверхности $J_{ЗП} = J_R$. Эта цепочка передачи мощности J_R, осуществляемой за счет процессов теплообмена между составляющими КС Земли, представляется следующим образом:

$$J_R(K) \rightarrow T_{ЗП} = T_R \rightarrow J_{ЗП} = J_R. \qquad (3)$$

Названное свойство теплообмена между составляющими КС Земли в присутствии ПГ можно квалифицировать как «закон парникового эффекта»: мощность J_R парникового эффекта — это эквивалент мощности собственного теплового излучения земной поверхности $J_{ЗП}$, полученной ею после завершения процесса глобального потепления $J_{ЗП} = J_R$ и возвращения Земли в радиационно-равновесное состояние. Подобная передача (трансформация) мощности ПЭ ($J_{ЗП} = J_R$) позволяет использовать для описания равновесного состояния современной КС Земли уравнение Стефана-Больцмана [12]:

$$(390 + J_R) = \sigma \cdot (288 + T_R)^4 \text{ Вт/м}^2, \qquad (4)$$

где: $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/м^2·град^4) — постоянная Стефана-Больцмана; T_R°C — глобальная радиационно-равновесная температура; J_R (Вт/м^2) — мощность ПЭ, она же мощность собственного теплового излучения земной поверхности после завершения процесса глобального потепления.

Натурные данные отмечают важную особенность глобального потепления, которая наблюдается с 1970 г. и которая будет наблюдаться на протяжении всего XXI века (табл. 1). При относительно больших значениях темпов глобального потепления (интенсивность поглощения тепловой энергии всей площадью Земли $\Delta Q \geqslant 17 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет; нетто-поглощение $I_0 \geqslant 0{,}4$ Вт/м^2; градиент температуры $(T_R - T_{ЗП}) \geqslant 1{,}2$°C) средняя глобальная температура земной поверхности $T_{ЗП}$ получает постоянное приращение $\Delta T = 0{,}175$°C/10 лет (см. рис. 1). Внутренние процессы нарушают монотонность роста глобальной температуры, но в масштабе столетия она растет с постоянным темпом. Условие постоянства темпа роста средней глобальной температуры записывается следующим образом [11]:

$$\Delta T = 0{,}175\,^{\circ}\text{C}/10 \text{ лет}$$

при $\Delta Q \geqslant 17 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/10 лет; $I_0 \geqslant 0{,}4$ Вт/м^2; $(T_R - T_{ЗП}) \geqslant 1{,}2$°C (5)

В ходе процесса глобального потепления при фиксированном значении концентрации K (ppm-eq) тепловое состояние земной поверхности в каждый момент времени характеризуется *двумя значениями* глобальной температуры, существенно отличающимися по модулю: текущим значением $T_{ЗП}$ и значением радиационно-равновесной температуры T_R. В процессе глобального потепления мощность парникового эффекта J_R постепенно увеличивает среднюю глобальную температуру земной поверхности $T_{ЗП}$ до соответствующей радиационно-равновесной температуры T_R. При современных больших темпах выбросов ПГ рост текущей температуры земной поверхности $T_{ЗП}$ происходит с темпом не более 0,175°C/10 лет и отстает от быстрого роста радиационно-равновесной температуры T_R (*рис. 3, см. вклейку*). Чем больше интенсивность выбросов ПГ, тем больше это отставание.

На рис. 3 приводятся графические результаты синхронного изменения двух отличающихся значений глобальных температур при умеренном сценарии декарбонизации в предположении, что после 2100 г. обеспечивается углеродная нейтральность мировой хозяйственной деятельности. К 2100 г. текущая глобальная температура увеличится до 2,6°C, в атмосфере накопится концентрация K = 350 ppm-eq антропогенных ПГ, которые сформируют в атмосфере мощность парникового эффекта около J_R = 32 Вт/м^2. После 2100 г. глобальное потепление при постоянной концентрации ПГ в атмосфере будет продолжаться примерно 200 лет, пока текущая глобальная температура не увеличится с 2,6°C до радиационно-равновесной температуры 5,8°C [11].

Недавно принятый закон ФЗ № 578-ФЗ от 29.12.2025 г. о внесении изменений в ст. 7 ФЗ «Об охране окружающей среды» требует проведения обязательной проверки климатических проектов на достоверность (верификации и валидации). Мировая общественность слепо приняла на веру «научно не обоснованные» количественные цели Парижского соглашения [13], достоверность которых до настоящего времени не верифицирована. Функция чувствительности (2) позволяет проверить достоверность указанной в Парижском соглашении ограничительной температурной цели (Ст. 2), на достижение которой оно пытается направить вектор развития мирового сообщества.

В Парижском соглашении первой ограничительной целью глобального потепления относительно 1900 г. называется глобальная температура 2°C, которую человечество якобы может обеспечить за счет интенсивного снижения выбросов ПГ. Исследование ограничительной температурной цели 2°C на достоверность приводит к выводу о её непригодности для использования в процессе принятия климатических решений.

Начнем с оценки текущего состояния КС Земли, когда в 2020 г. концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла K = 182 ppm-eq. Согласно функции чувствительности (2) такое содержание антропогенных ПГ в атмосфере гарантированно нагреет планету до радиационно-равновесной температуры T_R= 3,4°C. Таким образом, называемая в ПС в качестве ограничительной температура глобального потепления 2°C является нереальной. Согласно функции (2), глобальное потепление могло бы остановиться на этом значении температуры, если бы человечество прекратило все выбросы в 1990 г., когда концентрация антропогенных ПГ в атмосфере составляла около 100 ppm-eq. Следовательно, первая цель ПС является запоздавшей, предлагающей современному человечеству на 30 лет откатится в прошлое и обеспечить там углеродную нейтральность.

Второй целью Парижского соглашения (Ст. 4) называется необходимость достижения мировой экономикой углеродной нейтральности (нулевых нетто выбросов ПГ), которая для современной энергонасыщенной цивилизации в соответствии с законами сохранения принципиально недостижима.

Ради достижения недостижимых целей Парижского соглашения ежегодно проводимые Саммиты Сторон РКИК ООН предлагали мировому сообществу быстрые и убийственные для экономики темпы снижения выбросов ПГ — сначала снизить к 2050 г., а затем к 2060 г. глобальные выбросы ПГ в два раза: с текущего значения 3,0 ppm-eq/год до 1,5 ppm-eq/год. Человечество при всем старании не успеет за столь короткие сроки заместить выпадающее производство «тепловой» энергии альтернативной генерацией. Но даже в случае гипотетического вы-

полнения этой невыполнимой рекомендации в атмосфере к 2050 г. накопится концентрация антропогенных ПГ около K = 250 ppm-eq, которая способна увеличить в будущем глобальную температуру до соответствующей радиационно-равновесной температуры T_R= 4,5°C, что намного превосходит называемую в ПС ограничительную температуру 2°C. Возникает вопрос: ради чего человечество должно добровольно тормозить собственное развитие и снижать качество жизни людей, если цели ПС являются обманными и их невозможно реализовать?

Если коллективный Запад, разработавший Парижское соглашение и назначивший в качестве возможных целей достижение ограничительной температуры +2°C (Ст. 2) и нулевых нетто-выбросов (Ст. 4), искренне не знал о том, что эти цели абсурдны и недостижимы, значит уровень их западной науки о климате очень низкий. Если же авторы Парижского соглашения заведомо знали о недостижимости этих целей, значит сформулированные ими Ст. 2 и Ст. 4 Соглашения следует квалифицировать как провокационные с далеко идущими последствиями.

Россия по поводу формирования собственной климатической повестки не вступает в полемику с адептами Парижского соглашения, официально не опровергает ложные цели этого международного документа, при этом Энергетическую стратегию РФ на период до 2050 г. сформировала без оглядки на ПС, сообразуясь с собственными интересами развития.

В процессе глобального потепления текущая глобальная температура земной поверхности $T_{ЗП}$ медленно растет, приближаясь к радиационно-равновесной температуре T_R (см. рис. 3). Разность этих температур (T_R — $T_{ЗП}$) формирует в приземном слое атмосферы градиент gradT, который обеспечивает осредненную по площади Земного шара удельную интенсивность поглощения тепловой энергии (нетто-поглощение), определяемую следующей функцией [2]:

$$I_0 = 0{,}63(T_R - T_{ЗП}) - 0{,}36\ Вт/м^2, \qquad (6)$$

где: значение градиента температуры ограничено условием (T_R — $T_{ЗП}$) ⩾ 1,2°C.

Связь между удельным нетто-поглощением I_0 (Вт/м^2) и интенсивностью поглощения парниковой тепловой энергии всей площадью земной поверхности ΔQ (кВт·ч/10 лет) определяется следующим выражением:

$$\Delta Q = 45 \cdot 10^{15} \cdot I_0\ (кВт \cdot ч / 10\ лет). \qquad (7)$$

На *рис. 4 (см. вклейку)* приводятся графики синхронного роста мощности ПЭ и собственного теплового излучения земной поверхности. Если в 2100 г. концентрация ПГ в атмосфере и соответствующая мощность ПЭ стабилизируются, то глобальное потепление будет продолжаться примерно до 2320 г., пока собственное тепловое излучение земной поверхности не достигнет мощности ПЭ J_R = 32 Вт/м^2. При этом нетто-поглощение парниковой тепловой энергии (радиационный форсинг) будет увеличиваться до I_0 = 1,6 Вт/м^2 в 2100 г. (график 2 рис. 4), затем будет уменьшаться до нулевого значения и наступления в 2300 г. равновесного состояния в системе «Земля-Космос». В процессе глобального потепления Земля возвращает в космическое пространство меньше энергии на величину нетто-поглощения I_0, по сравнению с получаемой энергией.

Основные энергетические потоки в 2025 г. в КС Земли, схематически изображены на *рис. 5 (см. вклейку)*. Поток отраженного земной поверхностью теплового излучения мощностью около 30 Вт/м^2 остается не перехваченным парниковыми газами ввиду их недостаточного содержания в атмосфере и проходит сквозь атмосферу транзитом в Космос. Из функции (1) следует, что в 2025 г. находившиеся в атмосфере антропогенные ПГ в количестве около 190 ppm-eq перехватили около J_R = 20 Вт/м^2 «свободной мощности» потока отраженного теплового излучения Земли. Именно эта перехваченная мощность длинноволнового излучения определяет энергетику парникового эффекта в 2025 г. Часть этой мощности потрачена на нагревание земной поверхности до температуры $T_{ЗП}$ = 1,2°C и на соответствующее увеличение её собственного теплового излучения на $J_{ЗП}$ = 7,0 Вт/м^2, а часть направлена на текущее нагревание земной поверхности (нетто-поглощение) с интенсивностью I_0 = 1,0 Вт/м^2. Остальная часть присутствующей в атмосфере мощности парникового эффекта 12 Вт/м^2 остается временно не реализованной и уходит в Космос (рис. 5).

Рост глобальной температуры и накопление тепловой энергии водами Мирового океана приводит к росту его уровня. Зависимость скорости роста уровня Мирового океана в XXI веке определяется следующей функцией [2]:

$$\Delta h = 16{,}2(T_{ЗП} - 0{,}4) + 0{,}75 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta Q\ (мм / 10\ лет), \qquad (8)$$

где: $T_{ЗП}$ (°C) — среднее значение глобальной температуры земной поверхности в расчетном 10-летнем периоде; ΔQ (кВт·ч/10 лет) — интенсивность накопления тепловой энергии всеми составляющими КС Земли в расчетном 10-летнем периоде.

В функции (8) первое слагаемое определяет вклад таяния материковых льдов в скорость роста уровня Мирового океана, второе слагаемое определяет вклад теплового расширения воды. На *рис. 6* (*см. вклейку*) приводятся расчетные графики роста уровня Мирового океана в XXI в. при умеренном сценарии снижения выбросов ПГ.

Рост глобальной температуры и потепление климата проявляется в росте числа и силы природных катастроф: ураганов, волн жары, природных пожаров и засух, ливневых осадков и наводнений, землетрясений и оползней (*рис. 7, см. вклейку*). Для количественной оценки наблюдаемого изменения во времени t частоты повторяемости N (год)$^{-1}$ природных стихийных бедствий (ПСБ), вызванных

глобальным потеплением, в качестве исходного используется полученное на основании натурных данных уравнение линейной регрессии: $N = (a + bt)$ [2]. Это уравнение позволяет определять для предшествующего прогнозному расчету 10 летнего периода значение энергии, необходимой для формирования одного ПСБ: $E_i = (\Delta Q_i/\Delta N_i)$. Наблюдения за частотой повторяемости N (ед./год) опасных ПСБ отмечают их следующую энергетическую особенность: на формирование одного дополнительного бедствия ΔN (ед./год·10 лет) требуется на 25% больше накопленной Землей тепловой энергии ΔQ по сравнению с затраченной энергией в предыдущем 10-летнем периоде. Эта закономерность позволяет использовать для прогноза приращения частоты повторяемости ΔN_{i+1} в течение последующего расчетного периода следующую эмпирическую функцию [2]:

$$\Delta N_{i+1} = 0{,}8\Delta Q_{i+1}\cdot(E_i)^{-1}\ (\text{ед}/10\ \text{лет}), \qquad (9)$$

где: ΔQ_{i+1} (кВт·ч/10 лет) — расчетное приращение накопленной КС Земли парниковой тепловой энергии в каждом последующем расчетном 10-летнем периоде; $E_i = \Delta Q_i/\Delta N_i$ кВт·ч/(ед./год) — известное начальное значение накопленной Землей парниковой тепловой энергии в предшествующем периоде, необходимой для формирования одного дополнительного ПСБ.

В *табл. 2* приводятся количественные параметры уравнения регрессии применительно к приведенным на рис. 7 природным стихийным бедствиям. На *рис. 8* (*см. вклейку*) приводятся графики роста частоты повторяемости метеорологических и гидрологических бедствий от накопленной планетой Земля парниковой тепловой энергии.

В *табл. 3* и на рис. 8 приводятся значения некоторых параметров глобального потепления в 2020 г. и расчетные усилившиеся последствия в 2100 г. для умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики. Формируемая антропогенными выбросами мощность ПЭ будет безостановочно работать в XXI веке, повышая каждые 10 лет среднюю глобальную температуру на 0,175°С до 2,6°С, вследствие чего могут, например, окончательно пересохнуть Мертвое море и р. Евфрат. Произойдет «функциональное высыхание» некоторых рек, которые перестанут поддерживать судоходство и земледелие. В то же время ускоренный рост температуры в средней полосе России может к 2100 г. увеличить на две недели вегетационный период и способствовать росту урожайности сельскохозяйственных культур. Например, за последние 20 лет средняя урожайность зерновых культур в Курской и Брянской областях увеличилась, в среднем на 170% до 50 ц/га.

Частота катастрофических климатических бедствий в мире (волны жары, атмосферные, почвенные, гидрологические засухи, лесные пожары) увеличится с 86 в 2020 г. до 150 ед. в 2100 г. В настоящее время из-за засух и опустынивания ежегодно теряются огромные территории плодородных земель и страдают более 1 млрд человек. На протяжении последних десятилетий площадь, пройденная пожарами в России, увеличивается примерно на 70 тыс. га/год. Если в качестве индекса засушливости принять произведение общей продолжительности

Таблица 2

Параметры уравнения линейной регрессии изменения во времени повторяемости катастрофических природных стихийных бедствий (ПСБ), отмеченных в мире страховыми компаниями в период 1980-2020 гг.

ПСБ	*Коэффициент регрессии, b (год)$^{-2}$*	*Свободный член a (год)$^{-1}$*	*ΔQ/ΔN в 2010-2020 гг. x10^{15} кВт·ч/(ед/год)*
Геофизические	0,75	26	5,0
Метеорологические	4,35	107	0,89
Гидрологические	6,1	80	0,63
Климатические	1,5	26	2,56

Таблица 3

Прогноз роста показателей глобального потепления и частоты повторяемости опасных природных последствий до 2100 г. для умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики

Параметры и природные бедствия	*2020 г.*	*2100 г.*
Концентрация K, ppm-eq	182	350
Мощность ПЭ J_R, Вт/м^2	19	32
Равновесная температура, T_R°С	3,4	5,8
Текущая температура, $T_{зп}$°С	1,2	2,6
Нетто-поглощение I_0, Вт/м^2	0,9	1,6
Уровень Мирового океана, мм	235	790
Рост осадков по сравнению с 1980 г., %	2,8	7,0
Метеорологические, ед./год	280	520
Гидрологические, ед./год	324	630
Климатические, ед./год	86	150
Геофизические, ед./год	56	90

засух на общую площадь их воздействия, то, например, на широте Белоруссии этот индекс может возрасти к 2100 г. с современного значения 10 млн ($км^2$·сут/год) примерно в два раза.

Большую опасность для инфраструктуры Арктической зоны представляет таяние многолетнемерзлых пород. В 1993 г. среднее значение глубины сезонного протаивания в российской тундре составляло около 45 см, а в 2023 г. увеличилось до 70 см. Ежегодно площадь оттаявшей тундры увеличивается примерно на 80 тыс. $км^2$. Процесс деградации мерзлоты способствует попаданию в атмосферу дополнительного количества высвобождающихся парниковых газов. Северный Ледовитый океан к концу каждого арктического лета будет свободен ото льда, что облегчит навигацию по Северному морскому пути.

К 2100 г. Земля накопит около $710 \cdot 10^{15}$ кВт·ч парниковой тепловой энергии, отчего уровень Мирового океана за счет теплового расширения воды и таяния материковых льдов поднимется почти до 800 мм. Рост уровня моря скорее всего продолжится и в следующем столетии [15]. Подобный подъем уровня потребует реконструкции портовой инфраструктуры и строительства защитных гидротехнических сооружений, без которых, например, значительная территория Бангладеш и Мальдивы окажутся под водой и миллионы людей окажутся климатическими беженцами. За счет увеличивающегося испарения и усиливающегося круговорота воды среднее количество осадков над сушей относительно 1980 г. увеличится примерно на 7%. Уже сегодня градостроительную политику следует проводить с поправкой на рост уровня Мирового океана, а также на рост частоты и силы экстремальных осадков и вызванных ими наводнений. Следует переносить существующие сооружения, а также запретить новое строительство на потенциально затапливаемых территориях и территориях, подверженных лавинно-оползневой опасности.

В условиях глобального потепления меняется и «подземный климат», отчего наблюдается увеличение сейсмической активности планеты, проявляющееся в опережающем росте числа сильных землетрясений. Частота катастрофических геофизических бедствий (землетрясений, извержений вулканов, оползней) увеличится с 56 в 2020 г. до 90 в 2100 г. Рост подобной активности объясняется накоплением в горных породах земной коры дополнительной тепловой энергии, которая формирует в толще пород термоупругие напряжения, способные оживить существующие разломы и сочленения тектонических плит и инициировать сейсмические события.

В случае если человечество предпочтет консервативный сценарий и до конца XXI века не станет снижать современные выбросы ПГ 29 ppm-eq/10 лет, то уровень Мирового океана поднимется к 2100 г. до 860 мм [2], а катастрофические природные стихийные бедствия будут происходить на 15-20% чаще, чем при умеренном сценарии декарбонизации.

Выводы

Парниковый эффект как спектральное явление имеет конкретное энергетическое содержание, определяемое мощностью J_R (Вт/$м^2$) потока отраженного земной поверхностью длинноволнового излучения, перехваченного присутствующими в атмосфере парниковыми газами.

В процессе глобального потепления состояние земной поверхности в каждый момент времени характеризуется двумя значениями глобальной температуры: текущей температурой $T_{ЗП}$ и определяемой функцией чувствительности радиационно-равновесной температурой T_R.

В процессе глобального потепления текущая глобальная температура земной поверхности $T_{ЗП}$ увеличивается до радиационно-равновесной температуры T_R, а мощность собственного теплового излучения земной поверхности $J_{ЗП}$ увеличивается до соответствующей мощности парникового эффекта $J_{ЗП} = J_R$ (Вт/$м^2$).

Появление в атмосфере дополнительной объемной единицы концентрации парниковых газов 1,0 ppm-eq увеличивает: мощность парникового эффекта J_R на 0,08 Вт/$м^2$; радиационно-равновесную температуру T_R на 0,015°С; продолжительность процесса глобального потепления на 0,6 года. Подобное обогревающее воздействие парникового эффекта на планету эквивалентно приближению Земли к Солнцу примерно на 11 тыс. км.

Выполненная оценка достоверности (верификация) количественных целей Парижского соглашения (Ст. 2 и Ст. 4) приводит к выводу об их нереальности и непригодности для использования в процессе принятия глобальных климатических решений. В частности, мировому сообществу при разработке глобальной Энергетической стратегии не следует руководствоваться ложной целью по ограничению потепления глобальной температурой +2°С. При современном уровне технологического развития самые срочные действия человечества по снижению выбросов парниковых газов не помогут остановить процесс глобального потепления с темпом около 0,18°С/10 лет до достижения к 2100 г. значения текущей температуры 2,6°С.

При современных объемах потребления энергии и темпах сведения лесов невозможно обеспечить баланс выбросов и поглощения парниковых газов (нулевые нетто-выбросы), что делает неосуществимым достижение современной цивилизацией углеродной нейтральности.

Нереальность целей Парижского соглашения позволяет странам формировать свои Энергоклиматические повестки, исходя из безусловного приоритета национальных интересов и развития экономики. Каждая страна вправе снижать использование ископаемого топлива по мере возможности его равнозначного замещения альтернативными источниками энергии.

Россия прямо не опровергает ложные количественные цели Парижского соглашения, однако Энергетическую стратегию РФ на период до 2050 г. сформировала без оглядки на Парижское соглашение, сообразуясь с собственными интересами развития.

Предлагается вариант умеренного сценария декарбонизации мировой энергетики с темпом снижения выбросов в атмосферу с современного уровня 29 ppm-eq/10 лет до 15 ppm-eq/10 лет в 2100 г., с одновременным замещением альтернативными источниками около $70 \cdot 10^{12}$ кВт·ч/год выпадающей топливной генерации и накоплением в атмосфере к 2100 г. концентрации антропогенных ПГ около 350 ppm-eq.

При умеренном сценарии декарбонизации сформированная концентрация парниковых газов 350 ppm-eq и соответствующая мощность парникового эффекта $J_R = 32$ Вт/м^2 увеличат параметры состояния климатической системы Земли в 2100 г. до следующих значений:

- текущую глобальную температуру до 2,6°С; а радиационно-равновесную температуру до 5,8°С; глобальное нетто-поглощение парниковой тепловой энергии до 1,6 Вт/м^2; количество накопленной парниковой тепловой энергии до $710 \cdot 10^{15}$ кВт·ч; уровень Мирового океана до 790 мм;
- частоту гидрометеорологических катастрофических бедствий с N = 604 ед./год в 2020 г. до 1150 ед./год в 2100 г.; частоту засух и пожаров — с 86 до 150 ед./год; частоту землетрясений, оползней и извержений вулканов — с 56 до 90 ед./год.

Человечество предупреждено о неизбежности процесса глобального потепления, основные последствия которого предсказаны на столетие вперед. Глобальное потепление не угрожает существованию жизни на Земле. Мировое сообщество сумеет учесть и капитализировать климатические прогнозы в разработку адаптивных проектов.

Меры по адаптации жизненного пространства к учащающимся природным стихийным бедствиям должны стать первоочередными действиями человечества. В данном вопросе следует согласиться со Ст. 7 Парижского соглашения, гласящей, что «адаптация является ключевым компонентом долгосрочного глобального реагирования на изменение климата». Задача *Homo sapiens* заключается в том, чтобы осуществить такие адаптивные действия, которые в условиях приближающегося «горячего климатического будущего» обеспечат население Земли энергией, продовольствием и водой.

Литература

1. 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 [Masson-*Delmotte V.*, P. Zhai, A. Pirani (eds.)]. — Cambridge: Cambridge University Press, 2021. — Pp. 33-144.
2. *Тетельмин В. В.* Физическая теория глобального потепления. Алгоритм расчета климатического будущего. — М.: ЛЕНАНД. 2026.– 344 с.
3. *Тетельмин В. В.* Функции и алгоритм расчета глобального потепления и его опасных природных последствий//Экология промышленного производства, 2025. № 1. — С. 48-59.
4. *Тетельмин В. В.* О нереальности климатических целей Парижского соглашения//Энергетика: экономика, техника, экология, 2024. № 9. — С. 28-37.
5. *Тетельмин В. В.* Физическая сущность парникового эффекта и его работа на потепление климата в XXI веке и за его пределами//Вестник РАЕН, 2025. № 1. — С. 127-137.
6. IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, in Core Writing Team, R. K. Pachauri *and L. A.* Meyer (eds.). — Geneva; IPCC, 2014. — 151 p.
7. *Trenberth K. E., Fasullo J. T., Kiehl J.* Earth global energy budget//American Meteorological Society, march 2009. — H. 311-323.
8. *Тетельмин В. В.* Алгоритм аналитического расчета последствий глобального потепления на примере двух сценариев декарбонизации энергетики// Использование и охрана природных ресурсов в России, 2026. № 2. — С. 40-47.
9. *Arrhenius S.* On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground // The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1896. 41. — Pp. 237-276.
10. *Тетельмин В. В.* Вывод и подтверждение достоверности функции чувствительности к выбросам парниковых газов с использованием исторических и современных данных// Использование и охрана природных ресурсов в России, 2025. № 4. — С. 42-52.
11. *Тетельмин В. В.* Парниковый эффект: как устроен и как работает на потепление климата в XXI веке// Энергетика: экономика, техника, экология, 2025. № 8. — С. 40-51.
12. *Бринкман Э.* Физические проблемы экологии (пер. с англ.). — М.: Интеллект, 2012. — 288 с.
13. *Романовская А. А.* Анализ решений, принятых на КС-28 РКИК ООН// Использование и охрана природных ресурсов в России, 2024. № 1. — С. 95-98.
14. *Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю.* Глобальная климатическая угроза и экономика России в поисках особого пути. — М.: Центр энергетики МШУ «Сколково», 2020. — 110 с.
15. *Переведенцев Ю. П., Мохов И. И., Елисеев А. В., Мирсаева Н. А.* Теория климата: учебник. — М.: КНОРУС, 2024. — 192 с.

Сведения об авторе:

Тетельмин Владимир Владимирович, д.т.н., проф., главный специалист Института экологии Российского университета дружбы народов им. Патриса Лумумбы, член Общественного совета при Минэнерго РФ, эксперт Минобрнауки России в научно-технической сфере; e-mail: v-tetelmin@rambler.ru.