

ТЕПЛОВОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ КАК ВАЖНЫЙ АНТРОПОГЕННЫЙ ВКЛАД В ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ КЛИМАТА

В.В. Снакин, Г.В. Митенко, Д.В. Гаврикова*

Рассматривается проблема антропогенного вклада в климатическую систему планеты вследствие теплового загрязнения. Несмотря на количественное преобладание солнечной и геотермальной энергии в тепловом балансе Земли, антропогенное тепло воздействует на самую чувствительную оболочку планеты – биосферу. Проведена оценка теплового загрязнения различных стран на основе удельного (на единицу площади) энергопотребления, поскольку вся потребляемая человечеством энергия в конечном итоге превращается в тепло и поступает в биосферу. Косвенным показателем теплового загрязнения (маркером) служит также удельная эмиссия углекислого газа, ибо основным источником энергии до сих пор является ископаемое углеродсодержащее топливо. Рассчитанные коэффициенты корреляции показателей теплового загрязнения (удельное энергопотребление и эмиссия CO₂) с потеплением климата в различных регионах обнаружили низкую положительную взаимосвязь этих показателей (0,17–0,13 соответственно), что свидетельствует о незначительном пока вкладе теплового загрязнения в глобальное потепление климата. Таким образом, в настоящее время вклад антропогенного тепла в климатическую систему существенно сказывается, прежде всего, на региональном уровне, что необходимо учитывать в экологической политике с целью предупреждения негативного влияния этого фактора на функционирование природных экосистем. Это особенно важно в условиях глобального потепления климата, обусловленного преимущественно естественными факторами.

Ключевые слова: климатическая система, глобальное потепление климата, удельное энергопотребление, удельная эмиссия углекислого газа.

Ссылка для цитирования: Снакин В.В., Митенко Г.В., Гаврикова Д.В. Тепловое загрязнение как важный антропогенный вклад в глобальное потепление климата // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 4. С. 503–513. DOI: 10.29003/m4984.0514-7468.2025_47_4/503-513.

Поступила 26.11.2025 / Принята к публикации 10.11.2025

THERMAL POLLUTION AS A SIGNIFICANT ANTHROPOGENIC CONTRIBUTION TO GLOBAL WARMING

V.V. Snakin^{1,2}, G.V. Mitenko^{2,3}, and D.V. Gavrikova¹

¹ Lomonosov Moscow State University

² Institute of Fundamental Problems of Biology, Russian Academy of Sciences

³ Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences

This article examines the anthropogenic contribution to the planet's climate system due to thermal pollution. Despite the quantitative predominance of solar and geothermal energy in the Earth's heat balance, anthropogenic heat impacts the planet's most sensitive shell – the biosphere. Thermal pollution in various countries has been assessed based on

* Снакин Валерий Викторович – д.б.н., проф., Музей земледелия МГУ, Институт фундаментальных проблем биологии РАН, snakin@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9389-752; Митенко Геннадий Викторович – вед. инженер, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, gen.mitenko@yandex.ru, ORCID: 0009-0009-5057-5359; Гаврикова Дарья Владимировна – студент, МГУ имени М.В. Ломоносова, d.v.gavrikova@gmail.com, ORCID: 0009-0000-6236-1889.

specific (per unit area) energy consumption, as all energy consumed by humanity is ultimately converted into heat and released into the biosphere. Specific carbon dioxide emissions also serve as an indirect indicator (marker) of thermal pollution, as fossil fuels remain the primary energy source. Calculated correlation coefficients between thermal pollution indicators (specific energy consumption and CO₂ emissions) and climate warming in various regions have revealed a low positive correlation between these indicators (0.17–0.13, respectively), which indicates thermal pollution's contribution to global warming to be still insignificant. Thus, the current contribution of anthropogenic heat to the climate system is primarily regional, which is undoubtedly important to consider in environmental policy to prevent the negative impact of this factor on the functioning of natural ecosystems. This is especially important in the context of global warming, primarily caused by natural factors.

Keywords: climate system, global warming, specific energy consumption, specific carbon dioxide emissions.

For citation: Snakin, V.V., Mitenko, G.V., Gavrikova, D.V., “Thermal pollution as a significant anthropogenic contribution to global warming”, *Zhizn Zemli* [Life of the Earth] 47, no 4, ?-? (in Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.29003/m4984.0514-7468.2025_47_4/503-513.

Введение. Изменение климата – очень чувствительная для человечества и активно обсуждаемая тема. От климата зависят условия нашей жизни, урожайность сельскохозяйственных культур, функционирование всего хозяйственного комплекса. Постоянно имеющие место погодные катаклизмы будоражат воображение. Достаточно вспомнить сложное лето/осень 2024 г., когда на территории многих стран обрушились ураганы, наводнения и другие опасные природные явления, унёсшие тысячи жизней. В первой декаде октября на пустыню Сахара обрушились ливни; из-за затопления в Марокко погибло 20 человек, нанесён ущерб урожаю фермеров. Ураган «Хелен» в США (Флорида) в конце сентября унёс жизни более 200 человек, наводнение в Боснии и Герцеговине 5 октября унесло жизни 22 человек, ураган Милтон, обрушившийся на Флориду, вызвал эвакуацию более 5,5 млн жителей.

Тенденции глобальных изменений климата в последние десятилетия вызывают озабоченность мирового сообщества возможными негативными последствиями таких изменений, в частности, потеплением климата и, соответственно, угрозой таяния ледников и вечной мерзлоты, подъёмом уровня Мирового океана, климатическими катаклизмами и прочими негативными явлениями. Главной проблемой при этом является научная обоснованность таких опасений, а главное – понимание причин наблюдаемых изменений. Одним из важнейших вопросов в рассматриваемой проблеме является вопрос о реальной величине вклада антропогенного фактора в современном потеплении и основных механизмах этого воздействия.

Важно отметить, что при попытках решения проблемы глобального потепления основное внимание международного сообщества сосредоточено на декарбонизации и сокращении выбросов парниковых газов, показавших свою низкую эффективность. В то же время другой антропогенный фактор – прямое тепловое загрязнение – часто остаётся в тени. Это загрязнение является очевидным, прямым следствием человеческой деятельности, в ходе которой потребляемая энергия в конечном итоге преобразуется в тепло и рассеивается в окружающую среду.

Циклы потепления–похолодания в истории Земли постоянно имели место. Поэтому большая часть исследователей считает, что основной причиной современного потепления является цикличность изменения природных факторов космического уровня, определяющих динамику инсоляции, а также геотермальные

процессы, несомненно, более мощные, чем деятельность человечества [1, 2, 4–6, 8, 10, 13 и мн. др.].

Однако человек всё больше заявляет о себе как о важной геологической силе, меняющей облик планеты и набирающей всё большую энергетическую мощность.

Из антропогенных факторов следует выделить прежде всего три: 1) гипотеза о возможном усилении парникового эффекта за счёт загрязнения атмосферы парниковыми газами; 2) изменение человеком отражательной способности поверхности планеты (альбедо) и прозрачности атмосферы, меняющих поступление солнечного тепла; 3) прямое тепловое загрязнение [2].

Несмотря на отсутствие достаточного научного обоснования, гипотеза антропогенного роста парникового эффекта считается наиболее приоритетной, особенно в международных природоохранных документах. Более того, эта гипотеза легла в основу многих природоохранных документов и мероприятий. Так, очень часто в научной литературе встречаются безапелляционные утверждения типа «углекислый газ является основным парниковым газом, вызывающим изменение климата» [7], несмотря на достоверное положение о том, что пары воды на 80 % и более обуславливают парниковый эффект, а также многочисленные работы, утверждающие, что рост концентрации углекислого газа в атмосфере – результат, а не причина потепления [1, 3 и др.].

Вполне органичной выглядит позиция Группы Лавуазье (The Lavoisier Group, Австралия), утверждающая, что нет научных доказательств «вины» роста антропогенных выбросов углекислого газа в потеплении, который в обсуждаемых концентрациях оказывает лишь незначительное влияние на радиационный баланс Земли. В то же время углекислый газ способствует росту биопродуктивности ландшафтов, а «попытка декарбонизации мировой экономики приведёт к серьёзным экономическим потрясениям» [8].

Хотя «вина» выбросов углекислого газа и метана в глобальном потеплении климата до сих пор научно не доказана, некоторые исследователи (например, [12]), уже обвиняют конкретные государства и группы населения в непропорционально большом влиянии на потепление. Но «практика – критерий истины». Несмотря на господство точки зрения о вреде углеродного топлива, в соответствии с которой субсидии на ископаемое топливо вредны, «попытки их отмены терпят неудачу более чем в 90 % случаев» [14].

В данной работе основное внимание уделено рассмотрению вклада антропогенного теплового загрязнения – непосредственного, прямого фактора, влияющего на повышение температуры окружающей среды.

Тепловое загрязнение биосферы. Самый очевидный вклад в потепление климата человечество вносит в результате прямого теплового загрязнения биосферы – изменения естественного теплового режима среды в результате антропогенной деятельности. Оно происходит в результате получения человеком энергии из самых различных источников (ископаемое топливо, атомная, гидроэнергетика, альтернативные источники и др.) и превращения этой энергии в конечном счёте в тепло.

Среди основных источников теплового загрязнения биосферы следует указать:

- энергетический сектор – тепловые (ТЭС) и атомные (АЭС) электростанции, сбрасывающие большие объёмы нагретой воды в водоёмы;
- промышленность – металлургические, химические, цементные и другие производства с высоким энергопотреблением;
- населённые пункты (особенно города) – обогрев и кондиционирование жилых и производственных помещений, транспорт и иная инфраструктура;

– альтернативная энергетика – имеет низкий углеродный след, но солнечные и ветровые электростанции также в конечном итоге преобразуют энергию в тепло, хотя и с иным пространственным распределением.

Несмотря на то, что, по некоторым оценкам, тепло антропогенного происхождения в настоящее время ещё неизмеримо мало по сравнению с теплом, поступающим от Солнца и из земных недр, и составляет ~0,005 % этого количества, тепловое загрязнение вполне ощутимо сказывается на температуре окружающей человека среды. По оценкам [9], в среднем по миру это воздействие составляет всего +0,028 Вт/м², но над континентальной частью США и Западной Европой оно составляет +0,39 и +0,68 Вт/м² соответственно.

Мощные источники антропогенных выбросов тепла при условии их высокой концентрации в окружающей человека среде могут оказывать (и оказывают) заметное влияние на тепловой режим этой среды.

Наглядным фактом влияния теплового загрязнения на климат является наличие т. н. «тепловых шапок» над поселениями и промышленными объектами, особенно ярко проявляющееся над крупными городами. Температура воздуха в последних обычно на несколько градусов выше, чем в близости расположенных небольших населённых пунктах. При этом следует учитывать, что температура окружающей среды городов сформировалась с учётом постоянного подогрева со стороны мегаполисов и что реальная разница в температуре города и окружающей его среды в отсутствие этого постоянного подогрева была бы существенно больше.

Однако это только часть проявления теплового загрязнения. В реальности тепловое загрязнение имеет место на всех транспортных артериях, как на земле, так и в воздухе. Тепло выделяют все продуктопроводы (как в атмосферу, так и в грунты, и в природные воды). Электростанции, особенно АЭС, сбрасывают в реки колоссальное количество нагретой воды. Это существенно влияет на условия обитания водных организмов и на структуру экологических систем таких водоёмов.

Таким образом, влияние мощных антропогенных источников тепла на биосферу вполне ощутимо. Во многом благодаря этому постоянному «подогреванию» окружающей среды населёнными пунктами, объектами энергетики, другими промышленными предприятиями и инфраструктурой (дороги, подземные сооружения, летательные аппараты и др.) метеостанции постоянно фиксируют новые температурные рекорды. Особенно это проявляется в зимний период¹. Модельные расчёты [15] показали, что города в США, на Ближнем Востоке, в северной части Центральной Азии, на северо-востоке Китая, а также во внутренних районах Южной Америки и Африки испытывают к концу столетия существенное потепление, более чем на четыре градуса превышающее глобальное потепление.

Повышение температуры фиксируется именно в воздушной среде, обладающей наименьшей теплоёмкостью по сравнению с водной средой и грунтом и потому более чётко реагирующей на тепловое загрязнение. Тепловое загрязнение происходит в той части биосферы, где фиксируется изменение приповерхностной температуры, на основании которой делается вывод о глобальном потеплении. В расчёте на единицу объёма теплоёмкость воды в 2970 раз больше теплоёмкости воздуха: $C_{\text{воды}}/C_{\text{возд}}=2970$. Благодаря этому океан является основным терморегулятором планеты. Теплоёмкость лишь 10-метрового слоя воды в 4 раза больше теплоёмкости всей атмосферы. Поэтому небольшие изменения теплового состояния океана сильнейшим образом могут сказаться на атмосфере.

¹ Возможно, поэтому глобальное потепление климата несколько больше проявляется в зимний период.

Потребление энергии человечеством и, следовательно, тепловое загрязнение непрерывно возрастают. Согласно статистическим данным, с 1860 по 2015 г. потребление энергии увеличилось приблизительно в 40 раз, и, по прогнозам, к 2040 г. должно увеличиться ещё в 1,24 раза. Вся эта энергия после совершения полезной работы переходит в тепловую и разогревает атмосферу. Оценка влияния альтернативной (водородной, солнечной и ветровой) энергетики на тепловое загрязнение планеты в сравнении с традиционной углеродной показала, что они приводят порой даже к большему тепловому загрязнению и имеют ряд других существенных недостатков, не позволяющих считать их в полной мере «зелёной» энергетикой [2, 6].

Несмотря на очевидность прямого влияния антропогенного теплового воздействия на климат планеты, роль этого фактора в потеплении до сих пор не оценена количественно. По неясным причинам этот очевидный фактор никак не учитывается в документах Межправительственной группы по изменению климата [11] и в Парижском соглашении по климату, где вся борьба с потеплением климата сосредоточена на декарбонизации энергетики, так и не показавшей свою эффективность.

Результаты и обсуждение.

Оценка теплового загрязнения по регионам мира. Поскольку практически вся потребляемая человечеством энергия в конечном итоге превращается в тепло, то в первом приближении за оценку теплового загрязнения территории различных стран можно принять данные по удельному энергопотреблению, т. е. суммарному потреблению энергии в стране, приходящемуся на единицу её площади. Для этого данные по суммарному потреблению 47 стран, заимствованные из World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2025², разделили на площади этих стран (рис. 1). Первые места по этому показателю, значительно опережая другие страны, занимают Тайвань, Южная Корея, Кувейт, Бельгия и Нидерланды. В целом наибольшее энергопотребление, а,

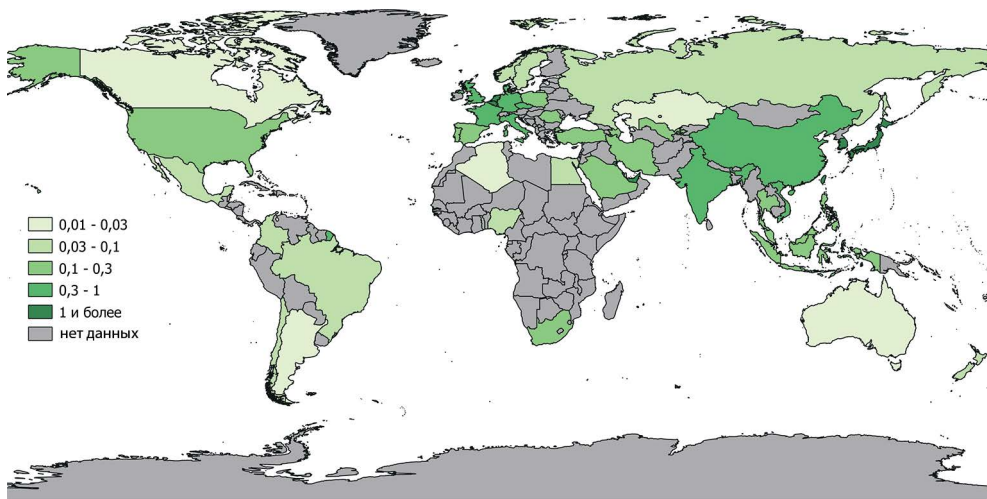


Рис. 1. Удельное энергопотребление различных стран за 2024 г. (мегатонн условного топлива на 1 тыс. км²).

Fig. 1. Specific energy consumption by countries in 2024 (megatons of equivalent fuel per 1000 km²).

² <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>

следовательно, и наибольший вклад в потепление климата, вносят страны Западной Европы, Китай и Индия. Согласно этим оценкам, Австралия, Алжир, Казахстан, Аргентина и Канада вносят наименьший вклад в тепловое загрязнение планеты. Вклад России также невысок.

Похожая картина получилась при расчёте удельного нефтепотребления различными странами (рис. 2). Здесь лидирующие позиции заняли, соответственно, Тайвань, Кувейт, Южная Корея, Бельгия, Нидерланды и Япония. Среди наименее потребляющих нефть на единицу площади стран оказались Казахстан, Австралия, Узбекистан, Алжир и Россия.

Важно отметить, что выделение углекислого газа в процессе хозяйственной деятельности человека происходит чаще всего одновременно с выделением тепла в окружающую среду.

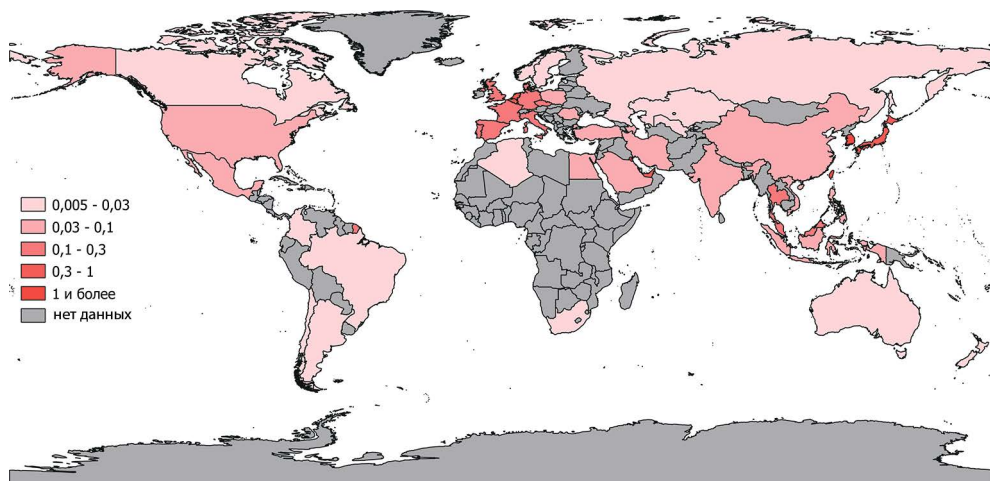


Рис. 2. Удельное нефтепотребление различных стран за 2024 г. (млн т на 1 тыс. км²).

Fig. 2. Specific oil consumption by countries in 2024 (million tons per 1000 km²).

Поскольку в процессе производства энергии основную долю до сих пор занимают углеродсодержащие источники, о степени теплового загрязнения можно судить также по имеющимся оценкам выбросов углекислого газа в атмосферу различными странами. Видимо, именно поэтому климатические исследования показывают близкую к линейной связь между глобальным потеплением и кумулятивными выбросами CO₂ с начала индустриализации [11, рис. 6.12, с. 438].

Таким образом, эмиссию углекислого газа в значительной степени можно считать маркером теплового загрязнения. В этом случае из рассмотрения выпадут источники теплового загрязнения, обусловленные атомными электростанциями и альтернативными источниками энергии, но они до сих пор не занимают лидирующее положение в энергетическом комплексе. Подавляющее количество энергии до сих пор получают из ископаемых источников, преимущественно обуславливающих выбросы углекислого газа.

На рис. 3 с использованием данных World Energy & Climate Statistics – Yearbook 2025³ представлены удельные (на единицу площади) выбросы углекислого газа по

³ <https://yearbook.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html>

странам мира. Рисунок показывает, что и по этим оценкам лидерами теплового загрязнения являются Тайвань, Кувейт, Южная Корея, Нидерланды и Япония. К странам с наименьшей удельной эмиссией CO₂ относятся Австралия, Бразилия, Канада, Аргентина, Казахстан и Россия.

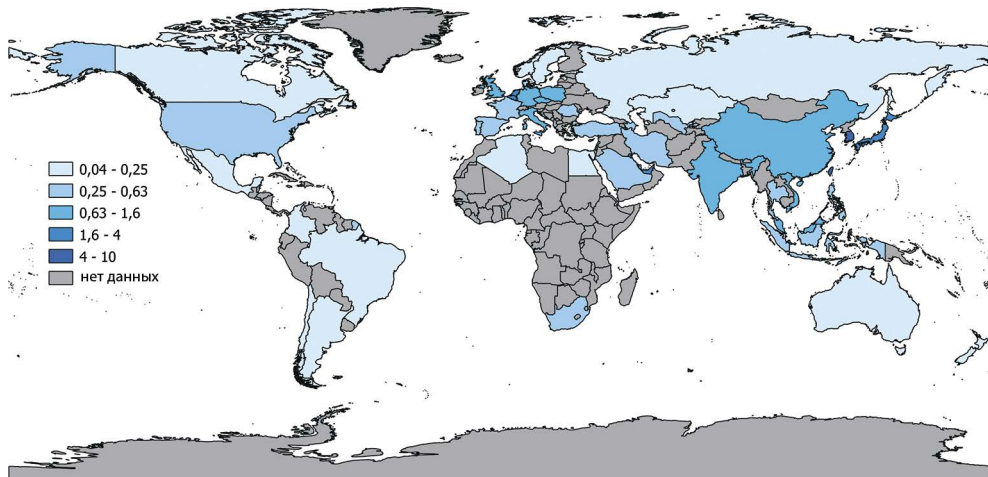


Рис. 3. Удельная эмиссия CO₂ в различных странах за 2024 г. (млн т CO₂-эквивалента на 1 тыс. км²).

Fig. 3. Specific CO₂ emissions by countries in 2024 (million tons of CO₂ equivalent per 1000 km²).

Оценка взаимосвязи между энергопотреблением и глобальным потеплением.

Если сравнить особенности распределения глобального потепления с географическим распределением энергопотребления человечеством, то можно заметить, что максимальное энергопотребление по территориям стран не вполне соответствует «географии» глобального потепления (рис. 4).

На основании представленных выше данных были рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона рассмотренных показателей с оценкой статистической значимости (p-value) для территорий 47 стран (табл.). Уровень значимости $p < 0,05$ показывает значимую корреляцию, $p \geq 0,05$ говорит о слабой корреляции, не отвергающей нулевую гипотезу (статистически недостоверной).

Полученные результаты, во-первых, однозначно показывают сильные взаимосвязи между энергопотреблением, нефтепотреблением и выбросами CO₂ (коэффициенты корреляции 0,94–0,98). Это вполне закономерно, поскольку нефтепотребление – существенная часть энергопотребления, а выбросы углекислого газа сопровождают основную часть процессов, связанных с получением энергии в самых разных технологических процессах.

Во-вторых, отмечается отсутствие значимой связи между показателями, характеризующими тепловое загрязнение, и температурной аномалией при данном уровне статистической значимости (коэффициенты корреляции 0,13–0,18). Это может указывать на то, что потепление климата определяется преимущественно другими факторами, и для выявления искомой связи может потребоваться больший объем данных, а связь может быть нелинейной или опосредованной.

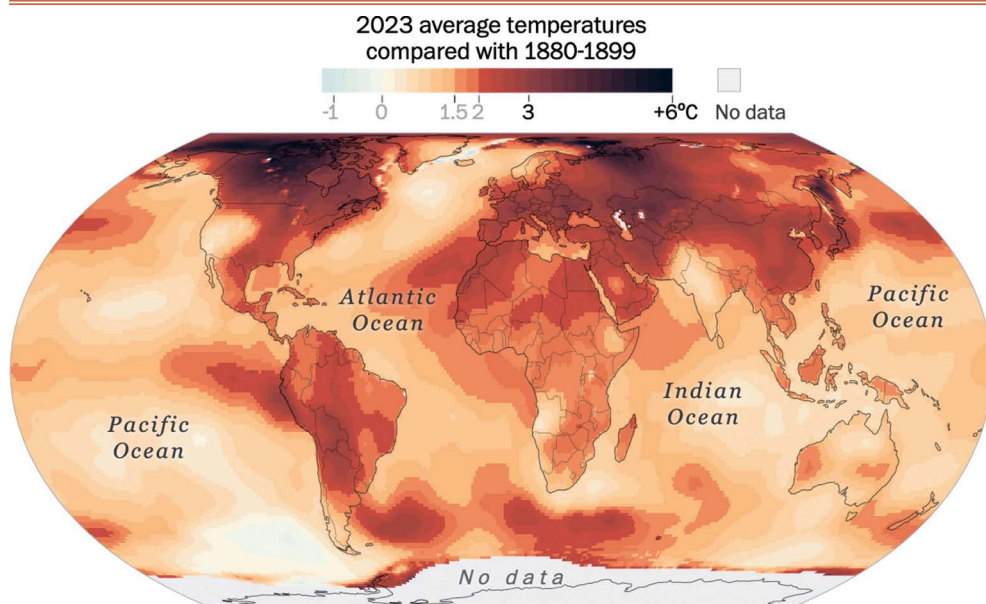


Рис. 4. Увеличение средней температуры в различных регионах планеты в 2023 г. по отношению к 1880–1899 гг., по данным FlowingData⁴.

Fig. 4. Average temperature increase in regions of the planet in 2023 relative to 1880–1899, according to FlowingData.

Таблица. Коэффициенты корреляции между показателями, характеризующими тепловое загрязнение, и реальным повышением температуры по странам мира

Table. Correlation coefficients between the indicators characterizing thermal pollution and the actual temperature increase over countries

Показатели	Коэффициенты корреляции Пирсона (граница уровня значимости), рассчитанное значение p-value			
	Удельное энергопотребление	Удельное нефтепотребление	Удельная эмиссия CO ₂	Рост температуры за 140 лет
Удельное энергопотребление	1,00	0,97 (p<0,05) p-value: 1,63×10 ⁻²⁹	0,98 (p<0,05) p-value: 3,97×10 ⁻³⁴	0,18 (p≥0,05) p-value: 0,2181
Удельное нефтепотребление	0,97 (p<0,05)	1,00	0,94 (p<0,05) p-value: 2,30×10 ⁻²²	0,18 (p≥0,05) p-value: 0,2174
Удельная эмиссия CO ₂	0,98 (p<0,05)	0,94 (p<0,05)	1,00	0,13 (p≥0,05) p-value: 0,3708
Рост температуры за 140 лет	0,18 (p≥0,05)	0,18 (p≥0,05)	0,13 (p≥0,05)	1,00

Следовательно, тепловое загрязнение при всей очевидности его вклада в тепловой баланс планеты не является определяющим в глобальном потеплении климата. При этом удельное энергопотребление (как и нефтепотребление) оказалось в большей

⁴ Where it warmed the most in the world – FlowingData (<https://flowingdata.com/2024/01/17/where-it-warmed-the-most-in-the-world/>).

степени связанным с глобальным потеплением в сравнении с эмиссией углекислого газа (коэффициенты корреляции, соответственно, 0,18 и 0,13).

Заключение. Проанализированная в настоящей работе взаимосвязь параметров, характеризующих антропогенное воздействие на климатическую систему, показывает, что вклад деятельности человека на глобальный климат, несмотря на его прямой характер, пока относительно небольшой в глобальном аспекте, проявляясь преимущественно на региональном уровне. Это является ещё одним свидетельством преимущественно естественных причин современных глобальных изменений климата.

Важно также отметить, что взаимосвязь реального потепления климата в разных странах с ростом антропогенных выбросов углекислого газа оказалась даже ниже взаимосвязи с характеристиками теплового загрязнения, что, по всей вероятности, показывает отсутствие прямого воздействия антропогенных выбросов углекислого газа на потепление климата. Наличие некоторой слабой связи с потеплением (коэффициент корреляции 0,13) объясняется тем, что выбросы углекислого газа тесно связаны с тепловым загрязнением, поскольку процессы выделения тепла большей частью связаны с выделением CO_2 .

Тем не менее тепловое загрязнение биосферы – прямое антропогенное воздействие на климат – повсеместно проявляется в региональном аспекте в виде «тепловых шапок» над крупными поселениями, прогревом грунта, ростом температуры водотоков в результате сброса нагретых вод, что несёт угрозу нарушения функционирования естественных экосистем, в частности, угрозу гибели термочувствительным биологическим видам. В значительной степени тепловое загрязнение определяет всё более частую регистрацию метеостанциями температурных максимумов.

Следует отметить, что тепловое загрязнение – это управляемый фактор, борьба с которым может дать быстрый и измеримый локальный эффект, напрямую улучшая качество жизни горожан и состояние экосистем, особенно в период наблюдаемого в настоящее время глобального потепления.

Для снижения отрицательного влияния теплового загрязнения на окружающую среду важен комплексный подход на различных уровнях. На *региональном уровне* следует модернизировать энергетическую политику в направлении повышения энергоэффективности, в частности, использование «сбрасываемого» тепла от выработки электроэнергии для отопления зданий, внедрение замкнутого цикла в системах охлаждения для ТЭС/АЭС, стимулирование т. н. «холодного» градостроительства (использование светлых и отражающих материалов для крыш и фасадов) и т. п. На *городском уровне* следует поощрять массовое озеленение, создание отражающих поверхностей, развитие общественного транспорта, утилизацию органических отходов через компостирование, а не сжигание, и т. д. На *бытовом уровне* важно использование энергосберегающей техники, утепление жилья для снижения затрат на обогрев и кондиционирование, осознанное энергопотребление.

Важно понять, что управление тепловым загрязнением – это важный и практический компонент комплексной стратегии по созданию устойчивой и комфортной среды обитания для будущих поколений.

Благодарности и источники финансирования. Исследование выполнено в рамках государственных заданий Музея земледедения МГУ имени М.В. Ломоносова «Биосферные функции экосистем и рациональное природопользование» и Института фундаментальных проблем биологии РАН «Разработка научных основ методов снижения техногенного загрязнения окружающей среды и экомониторинг состояния естественных и антропогенно изменённых экосистем».

ЛИТЕРАТУРА

1. Снакин В.В. Глобальные изменения климата: прогнозы и реальность // Жизнь Земли. 2019. Т. 41, № 2. С. 148–164. DOI: 10.29003/m649.0514-7468.2019_41_2/121-246.
2. Снакин В.В. Низкоуглеродная энергетика и глобальное потепление климата // Жизнь Земли. 2024. Т. 46, № 1. С. 4–19. DOI: 10.29003/m3770.0514-7468.2024_46_1/4-19.
3. Снакин В.В. Углекислый газ атмосферы и глобальное потепление // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2025. № 2. С. 39–44. EDN HSOVRS.
4. Фёдоров В.М. Эволюция современного глобального климата Земли и её возможные причины // Геориск. 2020. Т. XIV, № 4. С. 16–29.
5. Фёдоров В.М., Чуков В.С., Фролов Д.М. Причины современных изменений климата в Арктике // Жизнь Земли. 2025. Т. 47, № 2. С. 203–214. DOI: 10.29003/m4689.0514-7468.2020_47_2/203-214.
6. Цегельский В.Г. Мифы Парижского соглашения по климату // Жизнь Земли. 2023. Т. 45, № 4. С. 540–555. DOI: 10.29003/m3535.0514-7468.2019_45_4/540-555.
7. Evans R.D., Koyama A., Sonderegger D.L., Charlet T.N., Newingham B.A., Fenstermaker L.F., Harlow B., Jin V.L., Ogle K., Smith S.D., & Nowak R.S. Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO₂ // Nat. Clim. Change. 2014. V. 4 (5). P. 394–397. DOI: 10.1038/nclimate2184/.
8. Evans R. Nine Facts About Climate Change. The Lavoisier Group, November 2006 (<https://lavoisier.com.au/articles/greenhouse-science/climate-change/longversionfinal.pdf>).
9. Flanner M.G. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models // Geophysical Research Letters. 2009. V. 36, Is. 2. DOI: 10.1029/2008GL036465.
10. Friis-Christensen E. and Lassen K. Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate // Science, 1991. V. 254 (5032). P. 698–700. DOI: 10.1126/science.254.5032.698.
11. IPCC Fifth Assessment Report, 2014 (ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf).
12. Mahdavi P, Ross M.L. & Simoni E. Government efforts to reduce fossil fuel subsidies have failed at a very high rate // Nat. Clim. Change. 2025. V. 15. P. 471–472. DOI: 10.1038/s41558-025-02304-2.
13. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud, D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. 1999. V. 399, № 6735. P. 429–436.
14. Schöngart S, Nicholls Z, Hoffmann R. et al. High-income groups disproportionately contribute to climate extremes worldwide // Nat. Clim. Change. 2025. V. 15. P. 627–633. DOI: 10.1038/s41558-025-02325-x.
15. Zhao L., Oleson K., Bou-Zeid E. et al. Global multi-model projections of local urban climates // Nat. Clim. Change. 2021. V. 11. P. 152–157. DOI: 10.1038/s41558-020-00958-8.

REFERENCES

1. Snakin, V.V., “Global climate change: forecasts and reality”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **41** (2), 148–164 (2019). DOI: 10.29003/m649.0514-7468.2019_41_2/121-246 (in Russian).
2. Snakin, V.V., “Low-carbon energy and global warming”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **46** (1), 4–19 (2024). DOI: 10.29003/m3770.0514-7468.2024_46_1/4-19 (in Russian).
3. Snakin, V.V., “Atmospheric carbon dioxide and global warming”, *Use and protection of natural resources in Russia* **2**, 39–44 (2025). EDN HSOVRS (in Russian).
4. Fedorov, V.M., “Evolution of the modern global climate of the Earth and its possible causes”, *Georisk* **XIV** (4), 16–29 (2020) (in Russian).
5. Fedorov, V.M., Chukov, V.S., Frolov, D.M., “Causes of Modern Climate Change in the Arctic”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **47** (2), 203–214 (2025). DOI: 10.29003/m4689.0514-7468.2020_47_2/203-214 (in Russian).
6. Tsegelsky, V.G., “Myths of the Paris Climate Agreement”, *Zhizn Zemli [Life of the Earth]* **45** (4), 540–555 (2023). DOI: 10.29003/m3535.0514-7468.2019_45_4/540-555 (in Russian).
7. Evans, R.D., Koyama, A., Sonderegger, D.L., Charlet, T.N., Newingham, B.A., Fenstermaker, L.F., Harlow, B., Jin, V.L., Ogle, K., Smith, S.D., & Nowak, R.S. “Greater ecosystem carbon in the Mojave Desert after ten years exposure to elevated CO₂”, *Nat. Clim. Change* **4** (5), 394–397 (2014). DOI: 10.1038/nclimate2184.

8. Evans, R., “Nine Facts about Climate Change”, *The Lavoisier Group*, November 2006 (<https://lavoisier.com.au/articles/greenhouse-science/climate-change/longversionfinal.pdf>).
9. Flanner, M.G., “Integrating anthropogenic heat flux with global climate models”, *Geophysical Research Letters* **36** (2). January 2009. DOI: 10.1029/2008GL036465.
10. Friis-Christensen, E., and Lassen, K., “Length of the Solar Cycle: An Indicator of Solar Activity Closely Associated with Climate”, *Science* **1**, V. 254 (5032), 698–700 (1991). DOI: 10.1126/science.254.5032.698.
11. *IPCC Fifth Assessment Report*, 2014 (ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf).
12. Mahdavi, P., Ross, M.L. & Simoni, E., “Government efforts to reduce fossil fuel subsidies have failed at a very high rate”, *Nat. Clim. Change* **15**, 471–472 (2025). DOI: 10.1038/s41558-025-02304-2.
13. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., *et al.*, “Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica”, *Nature* **399** (6735), 429–436 (1999).
14. Schöngart, S., Nicholls, Z., Hoffmann, R. *et al.*, “High-income groups disproportionately contribute to climate extremes worldwide”, *Nat. Clim. Change* **15**, 627–633 (2025). DOI: 10.1038/s41558-025-02325-x.
15. Zhao, L., Oleson, K., Bou-Zeid, E., *et al.*, “Global multi-model projections of local urban climates”, *Nat. Clim. Change* **11**, 152–157 (2021). DOI: 10.1038/s41558-020-00958-8.