

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-03>
УДК 504.054:628.4.038

В. Л. БЕЗСОННИЙ, канд. техн. наук, доц.,
доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
e-mail: bezsonny@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
майдан Свободи, 6, м. Харків, Україна 61022

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПІДХОДИ В ДОСЛІДЖЕННЯХ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ

Мета. Аналіз з термодинамічних позицій причини виникнення глобальних екологічних проблем та можливості їх подолання.

Результати. Проаналізовано застосування законів термодинаміки щодо спроб вирішення екологічних проблем. Існування життя та біосфери в цілому визначається потоком енергії, інтенсивність якого на одиницю ваги живих істот значно перевищує питому інтенсивність трансформації енергії на Сонці. З другого закону термодинаміки робиться висновок про об'єктивність забруднення довкілля, оскільки ККД трансформації енергії завжди менше 100%, і становить 1-50%. Частина деградованої енергії, що залишилася, і є головною причиною забруднення навколишнього середовища. Виникнення багатьох глобальних екологічних проблем безпосередньо пов'язані з цією частиною енергії. Спостерігається безперервне експоненційне зростання як населення, так і енергоспоживання. Дається критичний огляд існування та розвитку глобальних екологічних проблем. Прогнозується розвиток зростання населення нинішньому столітті. Обговорюються можливі шляхи подолання глобальних екологічних проблем.

Висновки. Надано критичний огляд існування та розвитку глобальних екологічних проблем. Підтверджується висновок про необхідність розробки нової парадигми взаємодії людини з довкіллям.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: термодинаміка, екологічна проблема, енергія, клімат, біосфера

Як цитувати: Безсонний В. Л. Термодинамічні підходи в дослідженнях екологічних проблем. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2023. Вип. 28. С. 30 - 41. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-03>

In cites: Bezsonnyi, V. L. (2023). Thermodynamic approaches in the study of environmental problems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (28), 30 - 41. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-03> (in Ukrainian)

Вступ

В історії науки застосування термодинаміки і статистичної фізики, а також їх методів дослідження складних систем, особливо біологічних і екологічних не є новим напрямком в міждисциплінарних дослідженнях [1]. Ці галузі фізики привносять в екологічну науку нові методології, нові ідеї і нове розуміння [1, 2]. При своїй появі термодинаміка розглядалася як феноменологічна та експериментальна наука, яка намагається описати макроскопічні стани складних фізичних систем з мінімальними наборами спостережуваних макроскопічних змінних. І тільки з початку минулого століття природа термодинамічних процесів і властивостей

була усвідомлена і пояснена з точок зору кінетичної теорії і статистики, піонерами яких були роботи Гіббса і Больцмана. Застосування основних принципів термодинаміки до таких систем, як біологічні, екологічні, соціальні – викликало багато дискусій. Незважаючи на це, спроби пошуку нових застосувань термодинаміки в дослідженнях складних систем завжди привертають увагу багатьох дослідників у багатьох аспектах, від теорії до практики.

Виникнення глобальних екологічних проблем та сталість розвитку біосфери можуть аналізуватися та якісно інтерпретуватися з погляду основних законів термодина-

міки. Цей розділ фізики не обмежується вивченням термічних процесів тільки для опису та оптимізації роботи теплових машин, як це було на початковому етапі його становлення, а аналізує загальні закономірності трансформації енергії на різних рівнях організації матерії, включаючи живі системи. Термодинаміка необхідна для розуміння існування та функціонування живих клітин, клітинних популяцій, організмів, популяцій тварин, екосистем і біосфери загалом. Будь-яка з перелічених систем знаходиться в термодинамічній нерівновазі з навколишнім середовищем, і її існування з точки зору термодинаміки – малоймовірна подія. Необхідність потоку енергії через будь-яку організовану систему в біосфері, чи це окремих індивідів, популяція тварин чи екосистема, є основним висновком термодинаміки, який регламентує принципи та критерії існування таких систем [3]. Термодинаміка нерівноважних процесів є теоретичною

основою для дослідження відкритих систем, включаючи клітину, живі організми, їх популяції, екосистеми та біосферу загалом.

Такий біофізичний підхід до проблем екології є актуальним у зв'язку з необхідністю узагальнення накопичених до теперішнього часу експериментальних та теоретичних даних у галузі забруднення довкілля та розробки основних принципів та концепцій підтримки стабільності та рівноваги у біосфері. Очевидно, що для забезпечення сталості біосфери людині доведеться змінити деякі стандарти індивідуальної та соціальної поведінки, етику і навіть цілі економічного розвитку [4]. Саме тому екологія здатна об'єднати людей із різними політичними та релігійними поглядами, будучи своєрідним світоглядом та нормою поведінки людей.

Мета – аналіз з термодинамічних позицій причини виникнення глобальних екологічних проблем та можливості їх подолання.

Зв'язок термодинаміки з екологією та біологією

Життя з погляду термодинаміки – абсолютно неймовірна подія [1 – 3]. Справді, з термодинамічних позицій існування нерівноважних з навколишнім середовищем систем неможливе. Відповідно до другого закону термодинаміки у цій системі має зростати ентропія, тобто невизначеність та хаос, а не впорядкованість високоорганізованих структур у часі та просторі. Проте життя існує. Сучасні термодинамічні уявлення пояснюють існування життя необхідністю безперервного потоку енергії через живі системи, що використовується для підтримки сталої нерівноваги між живими організмами і довкіллям. Для живої матерії характерна величезна потужність енергетичних процесів. Навіть у спокої 1 г тіла людини трансформує високоякісну енергію в менш якісну (в основному тепло) у тисячі разів більше, ніж 1 г Сонця. Потужність енергетичних процесів на одиницю ваги у тисячі-мільйони разів перевищують аналогічну потужність енергетичних процесів, що відбуваються на Сонці. Отже, трансформація якісної енергії у менш якісну відбувається у живих об'єктах та екосистемах не тільки безперервно, але й з високою швидкістю.

Для ілюстрації необхідності безперервного потоку енергії можна навести такий приклад: без їжі людина може прожити 15-30 днів, без води – 5-10 днів, а без кисню, що бере участь у трансформації енергії у живих системах, – 5 хвилин [5]. Варто зауважити, що навіть за повного спокою серце людини перекачує за годину близько 250 літрів крові, за добу це становитиме 6 тон. А енергетичні витрати, пов'язані з механічною роботою серця та легень, становлять лише 10-15 % енергетичних витрат людини в умовах основного обміну (за повного спокою). При виконанні роботи середньої тяжкості ці цифри зростають ще вдвічі. Життя – це найважлива фізична робота, яка потребує великих енергетичних витрат.

Проаналізуємо закономірності трансформації енергії, загальні для живої та неживої природи та визначені першим та другим початком термодинаміки.

Суть першого закону термодинаміки зводиться до того, що енергія не виникає і не зникає знову, вона лише переходить із однієї форми до іншої. Фактично цей початок є законом збереження енергії. Природний напрямок трансформації енергії полягає у перетворенні високоякісної енергії на енергію

нижчої якості. Зворотний перехід можливий за витрати набагато більшої додаткової енергії. Застосування цього правила дає зрозуміння деяких явищ навколишньої природи, зокрема, що на продуктивність екосистем накладаються енергетичні обмеження. З першого закону термодинаміки випливає, що кількість енергії, що надходить в екосистему, дорівнює сумі енергії, що залишає цю систему, і енергії, що залишається в екосистемі. Головний висновок, що з цього закону і має значення для біосфери, полягає в необхідності рівності вхідної та вихідної енергії для стійкості біосфери. Отже, потік енергії, що надходить від Сонця, а також запасений у викопному паливі, що використовується людиною як додаткова енергія, повинен дорівнювати потоку деградованої енергії, що відводиться в космос.

Другий закон термодинаміки полягає в тому, що при будь-яких перетвореннях енергії якась частина її деградує в менш якісну енергію, в тому числі тепло, яке розсіюється в більш холодне навколишнє середовище. Це надзвичайно важливе положення, що визначає багато закономірностей потоків енергії в різних живих системах та біосфері в цілому. У цьому втрати часто перевищують 50%. Це означає, що ефективність трансформації енергії, або коефіцієнт корисної дії (ККД) більшості енергетичних перетворень менше 50%. В багатьох біологічних процесах ККД становить лише 1-10 %, інші 90-99% енергії втрачаються у вигляді деградованої енергії, що забруднює біосферу.

Принципи сталості біосфери

Багато авторів [2, 3, 5] аналізували принципи сталого функціонування природних екосистем з погляду екології та термодинаміки. Коротко ці положення можна підсумувати таким чином.

Перший принцип постулює необхідність використання ресурсів та позбавлення відходів без порушення циклічного круговороту біогенних елементів. Відомі численні приклади порушення цього. Наприклад [8], використання фосфатів і нітратів для підвищення врожайності призводить, в кінцевому рахунку, до збагачення та забруднення ними ґрунту та водойм. Людина створила свою власну екосистему, коли врожай разом із

Ситуація ускладнюється тим, що у відкритих системах одночасно з деградацією енергії до форм, які важко використовувати, відбувається деградація речовини, що забруднює біосферу [6, 7].

Об'єктивність забруднення довкілля впливає і з теоретичних уявлень термодинаміки. Відповідно до другого початку термодинаміки, ентропія в ізольованій системі (зокрема, у Сонячній системі) має зростати, тобто хаос і безлад у ній повинні збільшуватися. Водночас, живі системи – високоупорядковані утворення, які зменшують ентропію. Це протиріччя пояснюється лише тим, що ентропія (міра безладу і хаосу) у відкритій системі зменшується, а ентропія довкілля у цілому Сонячної системі зростає. Необхідність зростання ентропії довкілля і означає її деградацію. Отже, закони термодинаміки є об'єктивними доказами деградації та забруднення довкілля. Деградація означає поступове погіршення, зниження чи втрату позитивних якостей. Саме деградовані в процесі функціонування екосистем енергія та маса є головними об'єктивними причинами та джерелом забруднення навколишнього середовища. Існують і суб'єктивні причини, що посилюють забруднення та деградацію навколишнього середовища. Людство нераціонально використовує харчові та природні ресурси, виробляючи величезну кількість відходів та сміття, забруднюючи ґрунт, воду та повітря, а також неекономно споживаючи енергію та викидаючи у біосферу надлишки тепла.

використаними для його вирощування біогенними елементами перевозиться на великі відстані, а людські «відходи» скидаються у водойми. На відміну від кругообігу вуглецю, в якому є газоподібна фаза (CO_2), у фосфату такої газоподібної форми немає, тому його повернення з водного середовища в кругообіг ускладнено. Цілком очевидно, що така система нестала, оскільки родовища зрештою виснажуються. Це справедливо як для біогенних, так і техногенних елементів. За відсутності замкненого круговороту речовин відбувається виснаження їх ресурсів, і навіть забруднення ними довкілля.

Другий принцип. Екосистеми повинні існувати за рахунок сонячної енергії, що не забруднює біосферу [9]. Так і відбувається у

всіх природних екосистемах, крім людського суспільства. Приблизно 250 років тому, а найінтенсивніше останнє століття, люди почали використовувати невідновлюване викопне паливо – «сліди колишніх біосфер». Його спалювання призвело до численних проблем забруднення навколишнього середовища, включаючи зростання вмісту CO₂ в атмосфері, яке вже зараз впливає на кліматичні зміни.

Третій принцип. Чим більше біомаса популяцій, тим нижче має бути займаний нею трофічний рівень [10]. І знову людське населення порушує цей принцип. Розведення худоби та птиці призвело до того, що людина займає третій трофічний рівень. Щоб усі люди могли використовувати м'ясний раціон, треба вже зараз посівні площі розширити удесятеро. Це призвело б до подальшої ерозії ґрунту. Зростання чисельності населення змушує інтенсивно використовувати добрива, що також призводить до додаткових забруднень, по-перше, від змиву самих добрив у водоймища і, по-друге, за рахунок відходів, що утворюються при виробництві додаткової енергії, необхідної для їх виробництва, транспортування та застосування.

Четвертий принцип стійкості екосистем зводиться до необхідності різноманітності тваринного та рослинного світу [8], що забезпечує рівновагу екосистем через механізм «хижак-жертва», більшу ефективність використання потоків енергії, найбільш ефективний кругообіг маси біогенних речовин у біосфері тощо. Але задоволення потреб людства у їжі призводить до зменшення видового розмаїття біосфери.

Ще В.І. Вернадський відзначав величезну роль біосфери у формуванні умов життя Землі. Біота була і залишається найважливішим фактором формування довкілля

та його стабілізації. Біота сформувала гігантські відкладення гірських порід, кисневу атмосферу Землі, брала участь в утворенні океанів, а також обумовлює кругообіг багатьох біогенних речовин, включаючи воду. Ефективність випаровування води зеленими рослинами можна порівняти з ефективністю випаровування з поверхні океанів [11]. Біота відповідальна за формування ґрунту на поверхні Землі. Запаси та круговороти кисню, вуглецю, фосфору та інших біогенних елементів, а також багатьох інших речовин – заліза, марганцевих руд, фосфоритів, бокситів, карбонатних та крем'янистих порід – також пов'язані з діяльністю біоти.

Контроль біогенних елементів біотою здійснюється через фотосинтез органічної речовини з неорганічної та наступним розкладанням органічної речовини після відмирання на неорганічні компоненти. У разі стабільної біосфери швидкість синтезу органічних речовин має збігатися зі швидкістю їх деструкції редуцентами. Іншими словами, біосфера повинна мати здатність до авторегуляції, що забезпечить динамічну сталість різних показників біосфери та підтримку сталості навколишнього середовища. Вивчення природи та механізмів цих авторегуляцій є актуальною проблемою, яка нині практично не досліджується.

Для найбільш повної реалізації кругообігів біогенних елементів всі організми в біосфері характеризуються певною екологічною нішою, у межах якої об'єкт, вид, популяція виконують певне завдання з реалізації кругообігів біогенів, тобто підтримки їх стабільних концентрацій, а тим самим і зі стабілізації довкілля в цілому. Невелике відхилення у стані довкілля має компенсуватися життєдіяльністю біоти. Так було до порівняно недавнього часу.

Енергетичні проблеми людства

В історії людства можна назвати кілька етапів розвитку енергоспоживання [12]. Енергетичні потреби первісної людини близько 1 000 000 років тому становили близько 2000 ккал/день. Пізніше (100 000 років тому) людина навчилася полювати і почала використовувати вогонь для обігріву та приготування їжі, що збільшило споживання енергії у 2,5 рази (5000 ккал/день). Перехід до осілого способу життя та ведення сільськогосподарської діяльності близько 5000 років

тому збільшив споживання енергії людиною ще в 2,5 рази (12500 ккал/день). Пізніше людина починає використовувати енергію вітру та води для різних механізмів, вугілля для опалення та тварин для транспортних потреб, що до XIV в. н.е. ще подвоює кількість споживаної енергії (25 000 ккал/день). Перехід у 1875 р. до використання парових турбін потроєє це значення (75 000 ккал/день), і починається освоєння законсервованої сонячної енергії – вугілля, газу та

нафти. До 1970 р. людина споживала у 115 разів більше енергії (230 000 ккал/день), ніж первісна людина; до 2009 р. ця величина ще збільшилася вдвічі [13, 14].

Найбільший внесок у споживання енергії роблять розвинені країни, незважаючи на помітне зниження витрат енергії на одиницю валового національного продукту. Розвинені країни обганяють відстаючі країни не тільки за абсолютними показниками, а й на одиницю площі своєї території, що принципово важливо для оцінки впливу на довкілля, оскільки використовується людиною енергія, зрештою, використовується для руйнації довкілля. Коефіцієнт тиску на навколишнє середовище визначається використанням додаткової енергії на одиницю території. Якщо середньосвітовий тиск на природне середовище прийняти за одиницю, то для країн Західної Європи, США та Японії цей коефіцієнт в середньому дорівнює 5, для решти світу (без Антарктиди) - 0,6 [4, 8].

Ситуація у світовій енергетиці характеризується загостренням протиріч між багатьма країнами. З урахуванням

продовження економічного зростання азіатських країн, що розвиваються, швидкого збільшення там чисельності населення і високої енергоємності національних економік різко зростають потреби цих країн в енергоресурсах. Випереджаючими темпами зростає споживання енергії в Африці та Латинській Америці, і навіть у країнах Європейського союзу відновилося зростання енергоспоживання на душу населення. Зазначимо, що у 20% найбагатшого населення світу припадає 80% загальної суми споживання. У той же час, 60% світових запасів нафти та 40% запасів газу зосереджені на політично нестабільному Близькому Сході, і роль цих країн у нафтовидобутку лише зростає. Через обмежені можливості додаткового зростання виробництва збільшуються ризики, пов'язані з можливою дестабілізацією ринку та суспільства в цілому [8].

Використовуючи відкриті дані [13], оцінено динаміку зростання загального споживання енергії у світі (у терават-годинах) за період 1800-2021 рр. (Рис. 1). Видно, що з

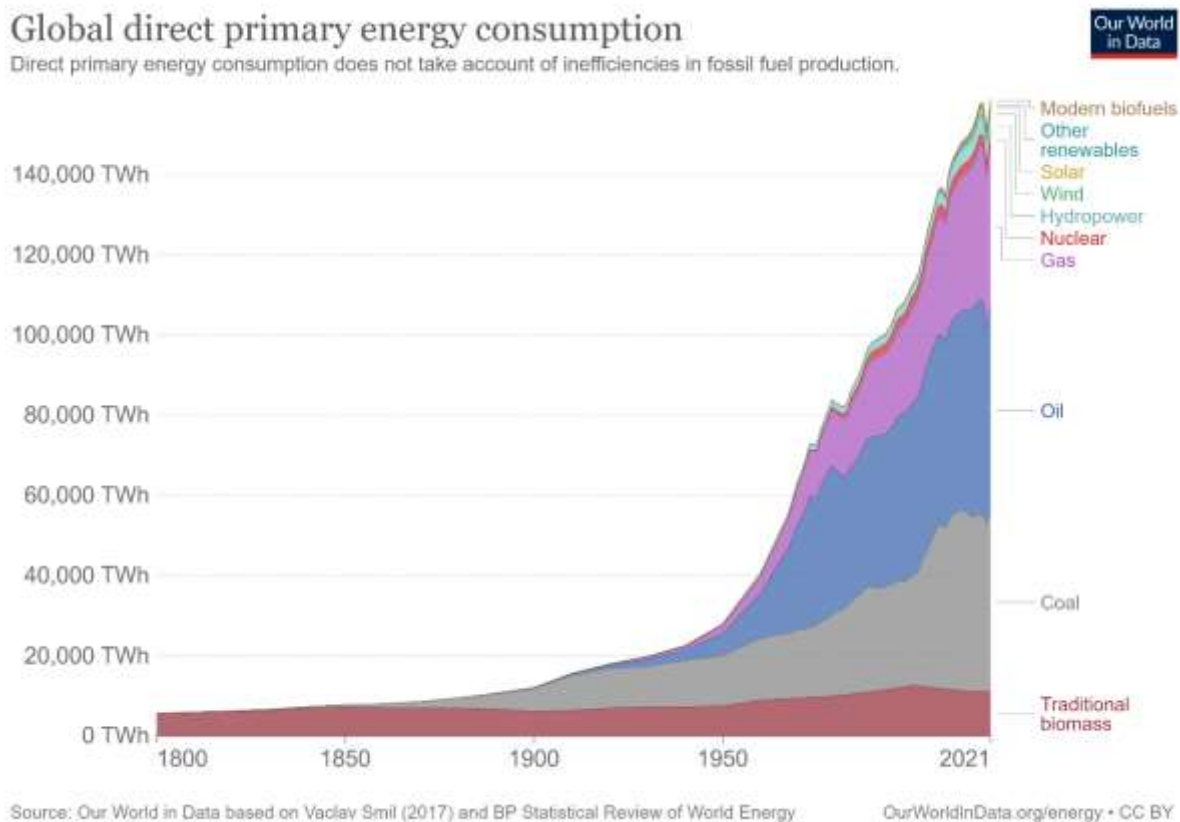


Рис. 1 – Динаміка зміни споживання енергії у світі за період 1800-2021 рр. Дані <https://ourworldindata.org/>

Fig. 1 – Dynamics of changes in energy consumption in the world for the period 1800-2021. Data <https://ourworldindata.org/>

часом відбувається постійне зростання енергоспоживання. До початку ери промислової революції (близько 1900 р.) це зростання було невелике, але починаючи з середини минулого століття використання енергії різко зросло. Оскільки населення планети продовжувало зростати експоненційно, цікавить оцінити споживану енергію, що припадає на одну людину. Вочевидь, що споживання енергії душу населення також зростає

експоненційно, причому швидкість зростання останні десятиліття сповільнилася. Більше того, останніми роками споживання енергії на душу населення залишається приблизно постійним. Це вказує на реальний розрив між темпами приросту чисельності населення та збільшення споживаної енергії, тому цікавим є аналіз динаміки зростання народонаселення.

Зростання населення планети

Реальністю сучасного світу є швидке зростання народонаселення планети, що призводить до дефіциту продуктів харчування, чистої питної води, нестачі енергії, забруднення повітря, води, ґрунту та продуктів харчування. Неприятливі наслідки швидкого зростання населення неминуче впливають на рослинний і тваринний світ Землі. Ряд екологів вважають, що перенаселення планети призвело до виникнення більшості глобальних екологічних проблем.

Багато авторів [15 – 21] використовували різні математичні моделі для опису та прогнозування зростання народонаселення. Один із цікавих прогнозів чисельності населення було дано англійським біологом Джуліаном Хакслі [19]. У 1964 р. на основі обчислень він зробив висновок, що до 2000 р. населення планети досягне цифри 6 млрд осіб. Автори роботи [24] з урахуванням запропонованих ними моделей продемонстрували загальні закономірності демографічних процесів людства. При цьому розглядається співвідношення між мікрорівневим хаосом та високодетермінованою динамікою на макрорівні. У роботі [21] зростання населення Землі було розглянуто на основі уявлень про розвиток людства як динамічної системи, що самоорганізується. Автором було запропоновано математичну модель для опису світового демографічного процесу, засновану на ідеях синергетики. Це моделювання дозволило описати зростання людства та зробити висновки про майбутнє, коли чисельність населення світу стабілізується на рівні 10-12 млрд осіб.

Як відомо, зростання кількісних характеристик багатьох глобальних проблем відбувається за експоненційним законом. Динаміка зміни чисельності населення N визначається виразом:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{0,693t/\tau}, \quad (1)$$

де N_0 - початкове значення населення чи іншого досліджуваного параметра,
 $N(t)$ – чисельність населення у момент часу t ,
 τ – час подвоєння населення.

Звідси час подвоєння популяції можна розрахувати виходячи з виразу:

$$\tau = 0,693 \cdot t / \ln[N(t)/N_0] \quad (2)$$

Позначимо через A частку приросту досліджуваного параметра впродовж року. Тоді:

$$A = e^{0,693/\tau} - 1, \quad (3)$$

Наведені формули дають змогу оцінювати основні параметри експоненційного зростання будь-якого показника, зокрема час подвоєння та щорічний відсоток приросту населення.

Проаналізуємо тенденції зростання населення світу. Етапи зростання чисельності населення на нашій планеті збігаються з етапами розвитку енергоспоживання: використання нового джерела енергії призводило до поліпшення якості життя і, відповідно, до збільшення чисельності населення (рис. 2). До 8 тисячоліття до н. чисельність населення Землі становила трохи більше 5 млн. Приблизно до цього часу люди навчилися приручати тварин, вирощувати та зберігати врожай. З цього моменту чисельність населення почала зростати швидше. У XVII та XVIII ст. чисельність населення земної кулі продовжувала зростати за експоненційним законом і збільшилася приблизно від 500 млн осіб до 1 млрд осіб. Це сталося, головним чином, завдяки збільшенню запасів їжі, а також покращенню систем транспорту та торгівлі, які сприяли ефективному розподілу цих запасів.

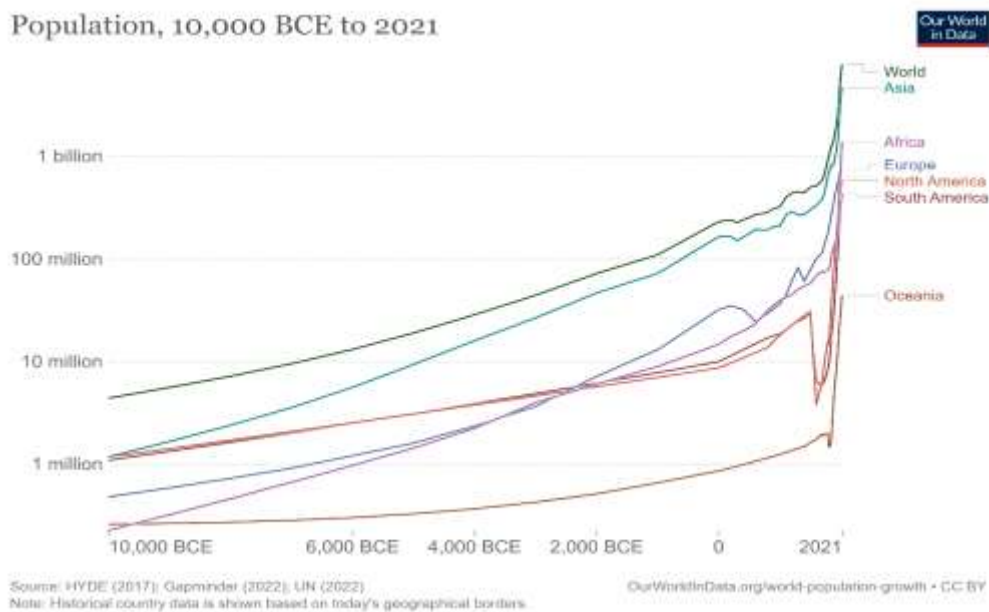


Рис. 2 – Зростання чисельності населення за період 10000 р. до н.е. – 2011 р. Дані <https://ourworldindata.org/>

Fig. 2 – Population growth for the period of 10,000 BC – 2011. Data <https://ourworldindata.org/>

Впродовж XVIII та XIX ст. приріст чисельності населення Землі становив 0,5% на рік. Тільки за 150 років, з 1750 по 1900 рр. населення Землі подвоїлося і досягло 1,6 млрд осіб. У 1930 р. у світі налічувалося 2 млрд осіб, а лише через 30 років, у 1960 р., - вже 3 млрд. За період із 1950 по 1970 р.р. щорічний приріст чисельності населення збільшився до 2% на рік, і кількість людей на земній кулі зросла майже вдвічі - з 2,5 млрд до 4,8 млрд. Після 1985 р. приріст кількості людей, що живуть на планеті, знизився. Нині населення всього світу становить 8 млрд. осіб.

«Право ухвалювати рішення щодо розмірів сім'ї є невід'ємним правом самої сім'ї» – стверджує Загальна декларація прав людини ООН. Останнім часом кілька країн визнали це становище неприйнятним. Так, у Бангладеш, Сінгапурі, Китаї, Індії уряди з метою обмеження чисельності населення почали застосовувати не лише заходи економічного тиску, а

й заохочувальні заходи. Уряди понад 30 країн законодавчо вжили заходів щодо обмеження народжуваності. На сьогодні 80% населення планети проживає у країнах, де фертильність продовжує знижуватися. Однак багато країн Африки вважають, що контроль над народжуваністю – це геноцид з боку білого населення по відношенню до чорного, тому для Африканського регіону характерні як найвища у світі народжуваність, так і найвища смертність у світі [22].

Зростання чисельності населення Землі та перенаселення нашої планети зумовили каскад взаємопов'язаних глобальних екологічних проблем — дефіцит енергетичних запасів, брак питної води та якісних харчових ресурсів, зміна клімату, парниковий ефект, зменшення товщини озонового шару, нестача запасів корисних копалин та ін. Всі ці проблеми впливають на сталий розвиток біосфери.

Зміна клімату та парниковий ефект

Відповідно до першого закону термодинаміки, кількості енергії, що входить у стаціонарну систему і що виходить з неї, повинні бути рівними. Відповідно до другого закону термодинаміки, енергія, що виходить, характеризується низькою якістю в

порівнянні з вхідною. Рівність вхідної та вихідної енергії зберігалася для нашої планети протягом мільйонів років, незважаючи на періоди, зледеніння і потепління. Завдяки маловивченим, але реально існуючим зворотним зв'язкам Земля щоразу поверталася до

стаціонарного стану. Екологи і кліматологи загалом згодні в тому, що в даний час потік енергії, що надходить на Землю від Сонця і Місяця (припливи і відливи), а також формується за рахунок викопного палива (включаючи атомну енергію), перевищує величину енергії, що відводиться [25]. Зайва енергія не може бути повністю видалена в космічний простір інфрачервоним випромінюванням через парникові гази. При підвищенні концентрації парникових газів збільшується непрозорість атмосфери для інфрачервоних променів, що походять від поверхні планети, що призводить до зростання температури та зміни клімату.

Кліматичні та геохімічні дані [26], реконструйовані на основі аналізу проб льоду антарктичної станції «Схід», демонструють характерну тенденцію: протягом останніх 420 тис. років вміст вуглекислого газу в атмосфері помітно коливався. Коливання вмісту CO₂ відбувалися у значному діапазоні (від 180 до 300 мільйонних часток) і мали циклічний характер. Максимальний вміст CO₂ відповідав періодам розігріву

атмосфери, а мінімальний вміст – періодам зледеніння Землі. Це означає, що земна температура коливалася синхронно із вмістом вуглекислого газу атмосфери.

Аналіз величезного числа локальних вимірювань кліматичних параметрів за останні 100 років показує зв'язок між кількістю CO₂ у повітрі та потеплінням. Згідно з прогнозом Міжнародної комісії ООН з проблем клімату, середня температура нашої планети за цей час збільшилася на 0,8°C. До кінця XXI ст. глобальна середня температура може підвищитись на 2-4,5°C.

Більш докладно зростання CO₂ за останні століття представлено на рис. 3. Починаючи з 1960 р. дані про зростання CO₂ в атмосфері Землі фіксуються метеорологічною станцією Мауна Лоа, Гавайські острови [27]. Видно, що з 1750 (початок індустріальної епохи) по сьогодні спостерігається постійне прискорення підвищення CO₂ в атмосфері. У 1920 р. пройдено максимальне значення вуглекислого газу, що існувало за останні 420 тис. років. Це вказує на межу, з якою біосфера могла справлятися за рахунок

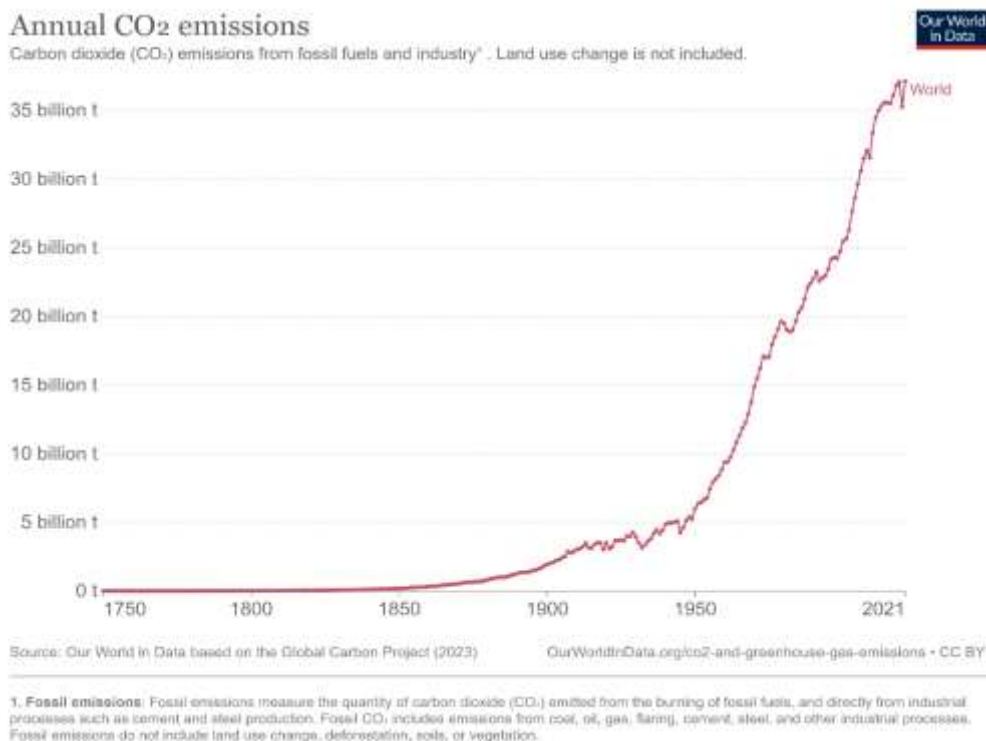


Рис. 3 – Зміна вмісту вуглекислого газу в атмосфері. Дані <https://ourworldindata.org/>

Fig. 3 – Change in the content of carbon dioxide in the atmosphere. Data from <https://ourworldindata.org/>

зворотних зав'язків, що контролюють вміст CO₂. У 1750 р. населення планети становило 0,8 млрд осіб, у 1920 р. - близько 2 млрд. Значить, величина населення земної кулі, при якій концентрація CO₂ не перевищувала б максимальних зафіксованих раніше значень, повинна становити близько 1,8 млрд людей (рис. 2).

Можливі два шляхи вирішення проблеми антропогенного навантаження:

зниження енергоспоживання за абсолютною величиною та доведення його до дозвольного рівня або скорочення населення Землі. Однак жодна держава у світі не розглядає ці конкретні шляхи вирішення глобальних проблем, що стоять перед людством. Слід зазначити, що більшість екологів розуміють необхідність такого рішення, проте їхні думки навіть не помічаються і дискутуються.

Висновки

Проаналізовано застосування законів термодинаміки щодо спроб вирішення екологічних проблем. Існування життя та біосфери в цілому визначається потоком енергії, інтенсивність якого на одиницю ваги живих істот значно перевищує питому інтенсивність трансформації енергії на Сонці. З другого закону термодинаміки слідує факт об'єктивності забруднення довкілля, оскільки ККД трансформації енергії завжди менше 100%, і становить 1-50%. Частина деградованої енергії, що залишилася, і є головною причиною забруднення навколишнього середовища. Виникнення багатьох глобальних екологічних проблем безпосередньо пов'язані з цією частиною енергії. Спостерігається безперервне експоненційне зростання як населення, так і енергоспоживання.

Частка споживання продукції біосфери великими тваринами завжди становила близько 1%. І тут біосфера була здатна відновлювати будь-які порушення і цим підтримувати стабільність довкілля. У роботі [10] показано, що і споживання цивілізації також має перевищувати 1% чистої первинної продукції глобальної біоти. Ця цифра отримана ним на базі незалежних одна від одної кількісних оцінок, заснованих на даних про глобальний кругообіг вуглецю і на законі дифузійного розповсюдження екскретів тварин, що пересуваються. Проте поріг споживання продукції біосфери

було перейдено на початку ХХ ст. в., і сьогодні споживання людиною продукції біосфери становить, за даними різних авторів, 5-10 % [28]. Можна вважати, що таке високе споживання і стало основою для дестабілізації навколишнього середовища. Також дестабілізація довкілля може бути обумовлена використанням людиною додаткової енергії викопного палива. Подальше підвищення використання додаткової енергії порушить стійкість біосфери. Розвинуті країни, використовують велику кількість енергетичних ресурсів, мають 80% світового багатства, але у яких проживає 20% світового населення («золотий» мільярд); частку країн (80% населення) залишається лише 20%. У перспективі це співвідношення може лише погіршуватись. США, маючи 5% населення Землі, споживають 40% світових ресурсів та дають 60% відходів. Це означає, що найрозвинутіші країни найбільше відповідальні за забруднення довкілля. Але і країни, що розвиваються, також прагнуть стати розвиненими країнами. Для цього потік енергії через ці країни має бути збільшений у десять разів, а взяти його ні звідки. Навіть якщо будуть винайдені нові невідновлювані штучні джерела енергії, це призведе до десятикратного підвищення рівня забруднення навколишнього середовища та подальшого підвищення нестабільності існування людської популяції.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Bezsonnyi V., Tretyakov O., Sherstyuk M., Nekos A. Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*. 2022. No 57. P. 268-281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
2. Мирончук Ю. А. Термодинамічні аспекти аналізу екологічних процесів. *Вісник ДААУ*. 1998. № 1. С. 60–68.
3. Ситник К., Багнюк В. Біосфера і клімат: минуле, сьогодні і майбутнє. *Вісник НАН України*. 2006. № 9. С. 3-20.
4. Кравченко К.О. До питання дослідження геоекологічних проблем урбанізаційних процесів у аспекті концепції стійкого розвитку. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2022. Вип. 38. С. 6-19. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-01>
5. Єремєєв В., Єфімов В. Регіональні аспекти глобальної зміни клімату. *Вісник НАН України*. 2003. №2. С. 14—19.
6. Барабаш М., Гребенюк Н., Татарчук О. Зміна клімату при глобальному потеплінні. *Водне господарство України*. 1998. №3. С. 9—12.
7. Рудий Б. Критика еволюціонізму. К.: Четверта хвиля, 2003. 115 с.
8. Дідух Я. П. Оцінка стійкості та ризиків втрати екосистем. *Наукові записки НаУКМА*. 2014. Т. 158: Біологія та екологія. С. 54-60. URI <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/3542>
9. Ситник К., Багнюк В. Глобальне потепління: внесок атомної енергетики. *Вісник НАН України*. 2005. №6. С. 3—16.
10. Ситник К. Ноосфера: міфи і реальність. *Вісник НАН України*. 2003. №5. С. 45—53.
11. Lorinus Calange, Oeschger Hans. Climate change. Paleoperspectives: reducing uncertainties in global change? *AMBIO*. 1994. 23. №1. P. 30—36
12. Череватський Д. Залежність якості життя від енергоспоживання: міждержавні варіації. *Демографія та соціальна економіка*. 2021. 45(3), С. 144–157. <https://ojs.dse.org.ua/index.php/dse/article/view/28>
13. BP Statistical Review of World Energy <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
14. Cook E. The Flow of Energy in an Industrial Society. *Scientific American*. 1971225(3). P. 134–147. <http://www.jstor.org/stable/24923122>
15. Franklin D. Andrews J. Megachange: The World in 2050. *Published March 27-th, 2012 by Wiley*; 320 p. URL: http://homes.ieu.edu.tr/odikkaya/FA313_2013/Project1_Assignment/megachange.pdf
16. 2010 and 2020 World Population and Housing Census Programmes. *Statistical Commission*, Forty-sixth session 3-6 March 2015. http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=E/CN.3/2015/6
17. Demographic statistics. Report of the Secretary-General. *Statistical Commission*. Forty-eighth session, 7-10 March 2017. <http://undocs.org/en/E/CN.3/2017/19>
18. Demographic Yearbook 2015. *Department of Economic and Social Affairs, United Nations*. New York, 2016. <https://unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb/dybsets/2015.pdf>
19. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljavsky A. Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques/ *Boca Raton: Chapman & Hall/CRC*. 2001. 305 p.
20. Standard country or area codes for statistical use. *United Nations*. 2017. <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>
21. World Population Prospects. The 2015 Revision. Methodology of the United Nations Population Estimates and Projections. *United Nations*. New York. 2015. https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2015_Methodology.pdf
22. World Population Prospects. The 2015 Revision. Population Devison. *United Nations*. New York, 2015. <http://esa.un.org/unpd/wpp/DataSources/>
23. World Urbanization Prospects. The 2014 Revision. Highlights. *United Nations*. New York. 2014. <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.Pdf>
24. Lacusic B., Lacusic D., Jancic R., Stevanovic D. Morphoanatomical differentiation of the Balcan populations of the species *Teucrium flavum* L. (Lamiaceae). *Flora*. 2006. Vol. 201. N 1. P. 108—119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2005.05.001>
25. Capman C.R. Impact of lethality and rises in today world: lessons for interpreting earth history. *Catastrophic events and mass extinctions: Impact and beyond* / Ed. C. Koeberl, K.G. Mac-Leod: Boulder, Colorado. Geol. Soc. Amer. P. 356—370. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2356-6.7>
26. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M. et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*. 1999. Vol. 399. P. 429–436. DOI: <https://doi.org/10.1038/20859>

27. Keeling R.F., Piper A.F. Bollenbacher and J.S. Walker. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. *Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2009. DOI: <https://doi.org/10.3334/CDIAC/atg.035>

Стаття надійшла до редакції 19.05.2023

Стаття рекомендована до друку 20.06.2023

V. L. BEZSONNYI, PhD (Technical),
Associate Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Education
e-mail: bezsonny@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>
V. N. Karazin Kharkiv National University,
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022

THERMODYNAMIC APPROACHES IN THE RESEARCH OF ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Purpose. Analysis from the thermodynamic point of view of the causes of global environmental problems and the possibilities of overcoming them.

Results. The application of the laws of thermodynamics to attempts to solve environmental problems is analyzed. The existence of life and the biosphere as a whole is determined by the flow of energy, the intensity of which per unit weight of living beings significantly exceeds the specific intensity of energy transformation in the Sun. From the second law of thermodynamics, a conclusion is made about the objectivity of environmental pollution, since the efficiency of energy transformation is always less than 100%, and is 1-50%. The remaining part of the degraded energy is the main cause of environmental pollution. The emergence of many global environmental problems is directly related to this part of energy. There is continuous exponential growth in both population and energy consumption. A critical overview of the existence and development of global environmental problems is given. The development of population growth is predicted for the current century.

Conclusions. Possible ways to overcome global environmental problems are discussed. The need to develop a new paradigm of human interaction with the environment is confirmed.

KEY WORDS: *thermodynamics, environmental problem, energy, climate, biosphere*

References

1. Bezsonnyi, V., Tretyakov, O., Sherstyuk, M., & Nekos, A. (2022). Thermodynamic aspects of the systems approach in ecology. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*; (57), 268-281. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-20>
2. Myronchuk, Yu. (1998). Thermodynamic aspects of the analysis of ecological processes. *Visnyk of DAAU*, (1), 60-68. (in Ukrainian).
3. Sytnyk, K., & Bagnyuk, V. (2006). Biosphere and climate: past, present and future. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, (9), 3-20. (in Ukrainian).
4. Kravchenko, K. O. (2022). To the question of research of geo-ecological problems of urbanization processes in the aspect of the concept of sustainable development. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, 38, 6-19. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-01>
5. Yermeev, V., & Yefimov, V. (2003). Regional aspects of global climate change. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, (2), 14-19. (in Ukrainian).
6. Barabash, M., Hrebenyuk, N., & Tatarchuk, O. (1998). Climate change under global warming. *Water management of Ukraine*, (3), 9-12. (in Ukrainian).
7. Rudyy, B. (2003). Critique of evolutionism. Kyiv: The Fourth Wave. (in Ukrainian).
8. Didukh, Ya.P. (2014). Assessment of stability and risk of loss of ecosystems. *Scientific notes of National University of Kyiv-Mohyla Academy*, 158, (Biology and ecology), 54-60. [In Ukrainian]
9. Sytnyk, K., & Bagnyuk, V. (2005). Global warming: the contribution of atomic energy. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, (6), 3-16. (in Ukrainian).
10. Sytnyk, K. (2003). Noosphere: myths and reality. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.*, (5), 45-53. (in Ukrainian).
11. Lorinus, Calange, Oeschger, Hans. (1994). Climate change. Paleoperspectives: reducing uncertainties in global change? *AMBIO*. 23, (1), 30-36.

12. Cherevatskyi, D. (2021). Quality of life dependence on energy consumption: intercountry variations. *Demography and Social Economy*, 45(3), 144–157. <https://ojs.dse.org.ua/index.php/dse/article/view/28>
13. BP Statistical Review of World Energy. Retrieved from <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
14. Cook, E. The Flow of Energy in an Industrial Society. *Scientific American*. 1971225(3), 134–147. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/24923122>
15. Franklin, D. & Andrews, J. (2012). Megachange: The World in 2050. *Published March 27-th, 2012 by Wiley*. Retrieved from http://homes.ieu.edu.tr/odikkaya/FA313_2013/Project1_Assignment/megachange.pdf
16. 2010 and 2020 World Population and Housing Census Programmes. (2015). *Statistical Commission*, Forty-sixth session 3-6 March 2015. Retrieved from http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=E/CN.3/2015/6
17. Demographic statistics. (2017). Report of the Secretary-General. *Statistical Commission*. Forty-eighth session, 7-10 March 2017. Retrieved from <http://undocs.org/en/E/CN.3/2017/19>
18. Demographic Yearbook 2015. (2016). *Department of Economic and Social Affairs, United Nations*. New York, Retrieved from <https://unstats.un.org/unsd/demographic/products/dyb/dybsets/2015.pdf>
19. Golyandina N., Nekrutkin V., & Zhigljavsky A. (2001). Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques. *Boca Raton: Chapman & Hall/CRC*.
20. Standard country or area codes for statistical use. *United Nations*. 2017. Retrieved from <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>
21. World Population Prospects. (2015). The 2015 Revision. Methodology of the United Nations Population Estimates and Projections. *United Nations*. New York. Retrieved from https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2015_Methodology.pdf
22. World Population Prospects. (2015). The 2015 Revision. Population Devision. *United Nations*. New York, Retrieved from <http://esa.un.org/unpd/wpp/DataSources/>
23. World Urbanization Prospects. The 2014 Revision. Highlights. *United Nations*. New York. 2014. Retrieved from <https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.Pdf>
24. Lacusic B., Lacusic D., Jancic R., & Stevanovic D. (2006). Morphoanatomical differentiation of the Balcan populations of the species *Teucrium flavum* L. (Lamiaceae). *Flora*. 201(1), 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2005.05.001>
25. Capman, C.R. (2002). Impact of lethality and riscs in today world: lessons for interpreting earth history. In Koeberl C., Mac-Leod K.G. (Eds.). *Catastrophic events and mass extinctions: Impact and beyond*. Boulder, Colorado. Geol. Soc. Amer. P. 356—370. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2356-6.7>
26. Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M. et al. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>
27. Keeling, R.F., Piper, A.F. Bollenbacher, & Walker J.S. (2009). Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. *Carbon Dioxide Information Analysis Center*, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. <https://doi.org/10.3334/CDIAC/atg.035>

The article was received by the editors 19.05.2023

The article is recommended for printing 20.06.2023