

УДК 551.583

КЛІМАТИЧНА БЕЗПЕКА: ОСОБЛИВОСТІ ПОВЕДІНКИ АНОМАЛІЇ ГЛОБАЛЬНОЇ СЕРЕДНЬОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

Халатов А.А.¹, Фіалко Н.М.², Тимченко М.П.³

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

¹академік НАН України, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: Artem.Khalatov1942@gmail.com²член-кореспондент НАН України, зав. відділу, професор, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net³канд. техн. наук, ст. наук. співр., orcid.org/0000-0003-4426-713X, e-mail: tnp_books@ukr.net<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2023.1>

Наведено результати аналізу досліджень, присвячених розробці фізичних основ зміни клімату. Розглянуто особливості поведінки аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі в аспекті дії основних природних кліматоутворюючих факторів. Представлено дані аналізу рівня і темпів зростання атмосферного діоксиду вуглецю як ключового чинника суміші парникових газів.

The results of an analysis of studies devoted to the development of the physical foundations of climate change are presented. The features of the behavior of the anomaly of the global average temperature of the Earth's surface are considered in terms of the action of the main natural climate-forming factors. Data are presented from an analysis of the level and growth rate of atmospheric carbon dioxide as a key factor in the mixture of greenhouse gases.

Бібл. 17, рис. 3.

Ключові слова: кліматична безпека, глобальне потепління, аномалія температури, парникові гази, Південне коливання Ель-Ніньйо, вулканічні виверження.

CO₂ – діоксид вуглецю;c – концентрація CO₂ в атмосфері; Δt_{Earth}^m – аномалія глобальної середньої температури поверхні Землі;

AR – Assessment Report (Оціночний звіт МГЕЗК);

ARs – Assessment Reports (Оціночні звіти МГЕЗК);

AR1, AR2, AR3, AR4, AR5, AR6 – (ARs 1-го ... 6-го циклів впродовж 1988-2022 рр.);

DJF – December, January, February (метеорологічна зима Північної півкулі);

ENSO – El Niño-Southern Oscillation (фаза Ель-Ніньйо Південного коливання);

JJA – June, July, August (метеорологічне літо Північної півкулі, або бореальне літо);

ONI – Oceanic Niño Index (океанічний індекс Ніньйо);

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration;

SR15 – Special Report 15 (Спеціальна доповідь 15, МГЕЗК, 2018 р.);

ВМО – Всесвітня метеорологічна організація;

ГСТП – глобальна середня температура поверхні Землі;

ЕДЗ – енергетичний дисбаланс Землі;

ЗКГП – зміна клімату у форматі глобального потепління;

ІЧ – інфрачервоне випромінювання;

КСЗ – кліматична система Землі;

ЛГМ – лабораторія глобального моделювання;

МГЕЗК – Міжнародна група експертів зі зміни клімату (IPCC);

ОМЛ – обсерваторія Мауна-Лоа, Гаваї;

ПГ – парниковий газ;

Тг – Тераграм.

Вступ

Питання кліматичної безпеки набувають все більшої актуальності з огляду на те, що певні кліматичні зміни наблизилися до передкритичних станів, так званого «помаранчевого рівня небезпеки». Це зумовлює потребу всебічного аналізу даної проблематики. Так, знач-

ний інтерес становить аналіз фізичних основ концепції зміни клімату, початок розробки яких відноситься до часів створення термодинаміки і теорії теплоти.

На особливу увагу заслуговує розгляд основних тенденцій сучасної зміни клімату в форматі глобального потепління [1-5]. Зокрема, важливим є аналіз поведінки

аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі, як одного з важливих індикаторів зміни клімату. При цьому актуальним є проведення даного аналізу в контексті впливу на вказану аномалію температури основних кліматоутворюючих факторів. До таких факторів, насамперед, відноситься явище Південного коливання Ель-Ніньо, вулканічні виверження та викиди парникових газів антропогенного походження.

В період сучасного глобального потепління можуть мати місце деякі нетипові прояви впливу кліматоутворюючих факторів на аномалію середньої температури поверхні Землі. До прикладу, виверження підводних вулканів призводить до викидів серед інших продуктів великої кількості водяної пари, а відтак і до збільшення вказаної температури. Хоча більша частина вивержень, за яких утворюється попіл, пил, сажа, аерозолі тощо, зазвичай, забезпечують її зниження. Це зумовлює потребу у проведенні спеціальних досліджень таких нетипових проявів дії кліматоутворюючих факторів та аналізу масштабів їх наслідків.

Мета роботи

Мета роботи – аналіз розвитку уявлень щодо фізичних аспектів зміни клімату та дослідження поведінки аномалії глобальної середньої приземної температури в контексті дії основних кліматоутворюючих факторів.

Фізичні аспекти зміни клімату

Системні дослідження зміни клімату в форматі глобального потепління розпочалися в 90-х роках 20-го століття. Однак глибокі дослідження фізичних основ зміни клімату нараховують близько 200 років.

Аналіз змісту цих основ є предметом окремої роботи. В даній статті коротко розглядаються результати лише деяких досліджень, що слугували їх розробці.

Пріоритет у дослідженні парникового ефекту належить Ж.-Б. Фур'є. Ним була запропонована перша радіаційна модель даного ефекту і використано поняття «темної теплоти» (1824 р.). В основу моделі покладено гіпотезу про особливу роль атмосфери Землі як своєрідної скляної оболонки в теплиці, що пропускає сонячне випромінювання, затримуючи власне. Слід зазначити, що модель парникового ефекту Фур'є розроблялася задовго до відкриття оптичних властивостей атмосферних газів, а відтак вказана гіпотеза була вельми вдалою здогадкою.

Суттєво пізніше було встановлено здатність деяких газів, зокрема CO_2 , поглинати ІЧ-випромінювання та узагальнено цей ефект у планетарному масштабі (Д. Тіндаль, 1859 р.). Тобто було доведено здатність CO_2 (на відміну від інших відомих на той час компонентів

атмосфери O_2 і N_2 , вміст яких в ній становить 99,3%) затримувати тепло ІЧ-випромінювання з його накопиченням в атмосфері та приповерхневих шарах Землі.

Подальше поглиблення уявлень щодо ролі атмосферного CO_2 у планетарному потеплінні пов'язано з роботами С. Арреніуса (1896 р.) Тут на особливу увагу заслуговує та обставина, що у цих роботах йдеться про атмосферний CO_2 антропогенного походження від спалювання вуглецевмісних палив. При цьому зростання його вмісту розглядається в контексті ефекту потепління.

Заслуга опрацювання великих масивів емпіричних даних щодо змін клімату суші протягом значного періоду (близько 50 років) на тлі зростання рівня атмосферного CO_2 належить Г. Каллендеру (1938 р.) Вказані узагальнення можна вважати початком світового дискурсу щодо наявності відповідного причинно-наслідкового зв'язку впливу CO_2 і глобального потепління.

Важливий етап у дослідженні глобального потепління пов'язаний із систематичними прецизійними безперервними вимірюваннями вмісту атмосферного CO_2 і інших парникових газів, що розпочалися у 1958 р. Засновником даного напряму досліджень і надалі його визнаним лідером був Ч. Кілінг. Успішність цих досліджень значною мірою визначалася застосуванням запропонованого ним підходу, що включав нову методику організації і проведення вимірювань, використання відповідного приладного забезпечення тощо. За результатами виконаних узагальнень було встановлено факт монотонного зростання у часі рівня CO_2 із сезонною і навіть добовою амплітудною модуляцією. Заснований Ч. Кілінгом центр вимірювання вмісту парникових газів при обсерваторії Мауна-Лоа, Гаваї, дотепер залишається провідним науковим осередком за даним напрямом досліджень.

Потреба в оцінках стану кліматичної системи Землі, прогнозах його змін тощо зумовила появу і подальший розвиток відповідних кліматичних моделей. Ці моделі постійно ускладнюються, стають все більш точними і адекватними. Значний внесок у розробку таких моделей здійснено Сюкуро Манабе. Перша побудована ним спрощена модель клімату Землі стала важливим кроком у подальшій розробці відповідних складних фізичних моделей (60-ті роки минулого століття). У запропонованій моделі враховувалась сумісна дія сонячного випромінювання і вертикального перемішування повітряних мас в атмосфері Землі. Розрахунки за моделями, розробленими Манабе, показали, що підвищення рівня діоксиду вуглецю призводить до зростання температури приземної атмосфери.

З ім'ям Клауса Хассельманна пов'язані досягнення у фізичному моделюванні клімату Землі, що стосуються достовірності і надійності кліматичних моделей. Ним, зокрема, було запропоновано метод моделювання кліматичних процесів з врахуванням різних кліматоутворюючих факторів тощо.

С. Манабе і К. Хассельманн за роботи, присвячені моделюванню змін клімату Землі, у 2021 р. отримали Нобелівську премію з фізики.

Про важливість для світової спільноти дослідження різних аспектів кліматичних змін свідчить, зокрема, факт отримання у 2018 р. Нобелівської премії з економіки Вільямом Нордхаусом. Ним розроблена перша інтегрована модель, в якій поєднані економічні і кліматичні показники, що відображають зв'язок економічного зростання з викидами вуглецю та глобальним потеплінням.

Слід відзначити визначний внесок у моделювання клімату Землі та вуглецевого циклу провідних світових експертів зі зміни клімату Дж. Хансена, Т. Уїглі, К. Емануеля та К. Калдейра. Їм належить пріоритет обґрунтованого прогнозу, який отримано на основі моделювання, про початок сучасного глобального потепління (межа 20 – 21 століття).

На сьогодні кліматичні моделі є єдиним надійним інструментом прогнозування змін клімату Землі. Сучасна тенденція їх побудови полягає, насамперед, у врахуванні різних міжсистемних зв'язків. Найсучасніші кліматичні моделі (моделі шостої фази порівняння об'єднаних моделей, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) наводяться в оціночній доповіді (AR6).

Особливості поведінки аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі та рівня діоксиду вуглецю в земній атмосфері в форматі глобального потепління

Значення аномалії ГСТП Землі, як відомо, вважається поряд з енергетичним дисбалансом Землі, одним із основних індикаторів зміни клімату в форматі глобального потепління.

На рис. 1 представлена картина накладених на єдину вісь часу поведінок температурних показників двох основних природних кліматоутворюючих факторів, характерних для 20 – 21 століть. Найбільш помітним природним впливом на світовий клімат вважається феномен Південного коливання Ель-Ніньйо. Наступними за інтенсивністю природного впливу є вулканічні виверження. Трійцю найбільш помітних кліматоутворюючих факторів на разі «очолюють» з великим «відривом» викиди парникових газів антропогенного походження [1, 4-9].

Нижче розглядаються особливості впливу даних факторів на аномалію глобальної середньої температури поверхні Землі. Певна увага приділяється радіаційному форсингу і пов'язаному з ним показнику енергетичного дисбалансу Землі.

Вплив Ель-Ніньйо Південного коливання (ENSO) на зміну клімату

Згідно з сучасними уявленнями ENSO – це природне регіональне явище циклічного характеру з нерегулярним (до 7 років) періодом зміни температури поверхні моря, а також надповерхневих вітрів у східній тропічній частині Тихого океану (рис. 1, лінії 1, 2). ENSO безпосередньо впливає на кліматичні і погодні умови більшої частини тропіків та субтропіків і непрямим чином у цілому на всю КСЗ [1]. Зазвичай виділяються дві фази (епізоди) ENSO, перша (фаза Ель-Ніньйо) відповідає підвищенню температури океану; друга – Ла-Нінья – його охолодженню (рис. 1, лінії 1, 2). Між ними може знаходитися нейтральна фаза, температури якої відповідають умові « $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C} < \text{ONI} < 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ». Звичайно епізоди Ель-Ніньйо та Ла-Нінья трапляються кожні два-сім років і тривають 9 – 12 місяців. Для відстеження поведінки ENSO використовується океанічний Ніньйо індекс (ONI). Він розраховується як ковзна 3-місячна аномалія середньої температури – відхилення від середнього значення температури у поверхневих водах східно-центральної тропічної частини Тихого океану поблизу міжнародної лінії дат (зона виміру ONI). Значення індексу $\text{ONI} \geq 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ вказують на Ель-Ніньйо, значення $\text{ONI} \leq -0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ відповідають Ла-Нінья. ONI є основним кліматичним індексом як при відстеженні океанської частини ENSO, так і дослідженні її кліматичної моделі [6, 7].

За всю історію спостережень Ель-Ніньйо 2015-2016 років було одним з найсильніших, а 2016 рік – найспекотнішим. Саме з цього року відмічаються щорічні рекорди абсолютних максимумів $\Delta t_{\text{Earth}}^{\text{m}}$, амплітуда яких модулюється температурами відповідних фаз ENSO. У 2022 році був зафіксований черговий глобальний річний температурний максимум. Цей рік за оцінками ВМО, став восьмим роком поспіль, коли глобальна температура підвищилася щонайменше на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ вище доіндустріального рівня. При цьому 2022 рік вважається четвертим (за іншими наборами даних п'ятим або навіть шостим) найтеплішим роком за всю історію інструментальних кліматичних спостережень. Тільки через дію охолоджувального ефекту фази Ла-Нінья, яка до того ж непередбачено тривала три роки поспіль (рідкісне явище triple-dip, або потрійного, Ла-Нінья), 2022 рік не став найтеплішим за всю історію спостере-

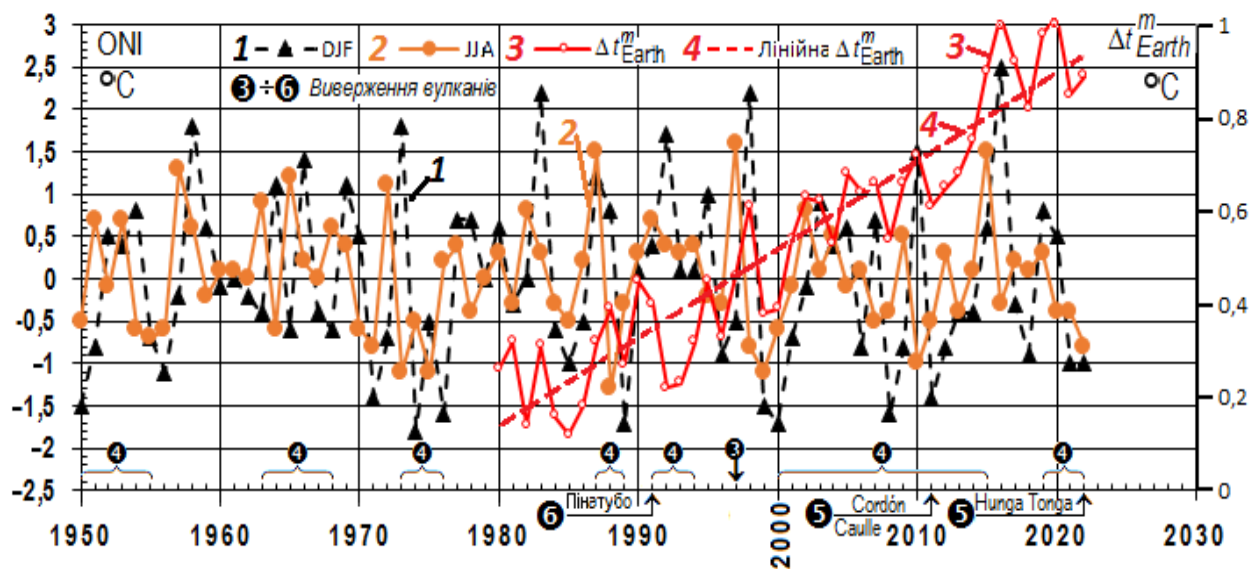


Рис. 1. Зміна в часі інтенсивності океанічного індексу Нін'яо ONI (1 – зима, 2 – літо), аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі Δt_{Earth}^m (3) і лінії її тренду (4) та хронологія вивержень вулканів 3, 4, 5, 6 з індексом вулканічної вибуховості $VEI=3; 4; 5; 6$; стрілки та фігурні дужки вказують на великі вулкани ($VEI \geq 5$) та невеликі ($VEI \leq 4$), але з підвищеною частотою виверження (джерела вихідних даних [6, 8, 9])

жень. ВМО офіційно оголосила, що у червні 2023 року розпочалася фаза Ель-Нін'яо. Взимку 2023-2024 років очікується її повний розвиток. За про-гнозами ВМО на цій фазі Ель-Нін'яо можуть бути перевищені усі минулі температурні рекорди [10].

Щодо кліматичного явища «Ель-Нін'яо Південне коливання» в цілому, то найбільш розповсюдженою думкою про нього є те, що – це феномен внутрішньої мінливості клімату, а не результат зміни клімату на фоні глобального потепління. Поряд з тим є певні підстави щодо досить високої вірогідності наявності позитивного зворотного зв'язку між підвищенням Δt_{Earth}^m через парникові гази антропогенного походження й природним циклічним характером ENSO.

Вулканічна активність і особливості зміни клімату

Енергетичну основу феномена глобальної зміни клімату у форматі потепління складають потоки низькопотенційної енергії. Виключенням є вулкани, їх виверження мають, хоча і високотемпературний, але короткочасний характер і низьку частотність. За даними [8] найбільш потужне за останні $\approx 10,0$ тис. років виверження відбулося близько 200 років тому. Обсяг пірокластичного матеріалу вулкану Тамбора (1815 р.) оцінюється 2800 км^3 . Тоді кліматичні аномалії охопили великі частини Північної півкулі, зокрема, Західну Європу та Північну Америку. Загинули врожаї та худоба, що призвело до найбільшого голоду у 19 столітті. В

Європі 1816 рік одержав назву «рік без літа». Останнє виверження найвищого класу $VEI=8$ відбулося 72 тис. років тому на о. Суматра (вулкан Тоба).

Продуктами вулканічної діяльності, що впливають на зміну клімату, як відомо, є попіл, пил, сажа, гази, дим, аерозолі, у тому числі сульфатні аерозолі. Їх частина, що перебуває в атмосфері у завислому, дуже дрібному стані, блокує сонячне випромінювання. Тому більша частина продуктів вивержень звичайно забезпечує ефект охолодження, теоретично – аж до стану так званої «ядерної зими». Водяна пара та діоксид вуглецю, що також є продуктами вулканічної діяльності, як парникові гази, навпаки, призводять до ефекту потепління. Зазвичай ПГ при виверженні вулканів становлять відносно незначну кількість від глобальних викидів і по інтенсивності впливу на два порядки поступаються сучасному радіаційному антропогенному форсингу. В більшості випадків підсумковим нетто-ефектом викидів вулканів є тимчасове (до кількох років) охолодження. Однак у деяких ситуаціях «вулканічне» охолодження може призвести до нарощування льоду з подальшим запуском позитивного зворотного зв'язку: зростання площі льодової поверхні зменшує поглинання Землею енергії, а відтак спричиняє подальше збільшення зони з великою площею зледеніння і, як наслідок, зниження середньої температури Землі і так далі.

На рис. 1 на осі часу наведені поодинокі та групові виверження вулканів з індексом вулканічної вибуховості $VEI = 3 \dots 6$. У часовому проміжку кінець 20-го – початок 21-го століття виверження великих вулканів (Пінагубо, $VEI=6$, 1991р.; Cordon Caule, $VEI=5$, 2011р.; Hunga Tonga, $VEI=5$, 2022 р.) та вулканів з меншими індексами вулканічної вибуховості ($VEI \leq 4$) корелюють локальні низхідні відрізки ламаної 3 на рис. 1 щорічних аномалій Δt_{Earth}^m . Як видно, тривалість помітного впливу виверження вулканів є відносно невеликою і обмежується одним-двома роками.

Уявлення про можливі впливи вулканічної активності на клімат Землі поглиблюється з огляду на нові дані щодо вулканічних вивержень. Так, виверження відносно великого $VEI \approx 5,8$ підводного вулкану Hunga Tonga- Hunga Ha'apai (далі Хунга) у січні 2022 року привернуло увагу до ефекту значного потепління, що може спричинятися такими вулканами [11, 12].

Виверження Хунгу призвело до викидів у стратосферу серед інших вулканічних продуктів великої кількості водяної пари. Загальна маса випарованої води за даними супутникових і наземних спостережень та результатами моделювання атмосферного переносу вулканічних мас оцінюється у досить широкому діапазоні у 50...146 Тг. Поряд з цим у 5 разів збільшилося аерозольне навантаження в стратосфері, вплив якого тим не менш не змінив характеру підсумкового ефекту вулканічного нагрівання [11, 12]. Для КСЗ виверження Хунгу і утворення водяної пари, за думкою авторів багатьох публікацій, визначає велике збурення з позитивним ЕДЗ. Це виверження ймовірно збільшило нетто-радіаційний форсинг-фактор. У результаті підвищилася ймовірність тимчасового перевищення нормованого Паризькою угодою значення аномалії у $1,5^\circ\text{C}$ протягом найближчих років наступного десятиліття. Відповідна оцінка значимості радіаційного фактору Хунгу непрямым чином підтверджується показником температури літа (JJA) 2023 року. Тобто вказаний факт досягнення цього року рекордної температури може бути свідомством впливу виверження Хунгу як однієї з причин аномально жаркого літа. Слід зазначити, що даний температурний рекорд встановлено попри охолоджувальну дію потрійного Ла-Нінья.

Радіаційний форсинг та зміна клімату

Радіаційний форсинг є головним рушієм ЗКГП [1, 3-5]. Визначення даного виду форсингу зазнає певних змін у часі. В даній статті це поняття використовується відповідно з глосарієм МГЕЗК AR6. Радіаційний форсинг визначається як зміна чистого (нетто) радіаційного потоку (вираженого у Вт/м^2) через зміну зовнішнього чинника зміни клімату, такого як зміна концентрації ву-

глекислого газу (CO_2), концентрації вулканічного аерозолю або сонячного випромінювання.

Радіаційний форсинг безпосередньо пов'язаний з показником енергетичного дисбалансу Землі. Останній є різницею між вхідною енергією (сонячним випромінюванням) і вихідною енергією (сумою сонячного випромінювання, відбитого Землею, довгохвильової радіації, яка випромінюється Землею). У 60-х роках минулого століття більшість кліматологів дотримувалася думки, що тренд $\text{ЕДЗ} < 0$ є вірогіднішим і далі буде реалізовуватися сценарій глобального похолодання. Виходячи з даних інструментальних спостережень, впродовж двох десятиріч (50-і - 60-і роки минулого століття) КСЗ перебувала в стані відносної рівноваги, коли показник $\text{ЕДЗ} \approx 0$ (рис. 1). З 70-х років намітився чіткий тренд зміни енергетичного дисбалансу Землі у бік його позитивних значень ($\text{ЕДЗ} > 0$). Процес підвищення аномалії ГСТП відповідає початку 70-х років і триває останні приблизно 50 років (рис. 1, лінії 3, 4; рис. 2, лінія 1). При цьому в історичних масштабах сучасне потепління характеризується високим темпом. Так, темпи накопичення тепла у період 2006-2020 років помітно вищі, ніж у інтервалі 1971-2020 років [3].

Щодо енергетичного дисбалансу Землі і накопичувачів надлишкової енергії, то головним накопичувачем є Океан, де її зберігається 89%. На сушу припадає 6 %, кріосферу – 4 %, атмосферу – 1 % [3]. При цьому танення льодовиків, крижаних покривів і морського льоду відбувається за петлею позитивного зворотного зв'язку: збільшення площі з великим альбедо приводить до подальшого її збільшення за рахунок додаткового танення, зменшення площі зледеніння, і як наслідок, підвищення середньої температури Землі. Аналіз емпіричних даних показує також, що ці процеси відбуваються з прискоренням.

У відносно невеликому часовому масштабі (кілька сотень років) динамічним впливом низки складових радіаційного форсингу (а саме, зміною надходження сонячного випромінювання, альбедо, астрономічними факторами за циклами М. Міланковича, вмістом аерозолів) можна нехтувати через їх квазістаціонарний, а часто практично сталий характер.

Відносно аерозольного навантаження мають місце деякі застереження. За певних умов вулканічні виверження можуть привести до позитивних ЕДЗ. Про це свідчать наведені вище дані щодо підводного виверження вулкана Хунга. Його наслідком стала поява великої кількості стратосферної водяної пари, в результаті чого відбулося збурення стану КСЗ, так що традиційно негативний ЕДЗ змінився на позитивний.

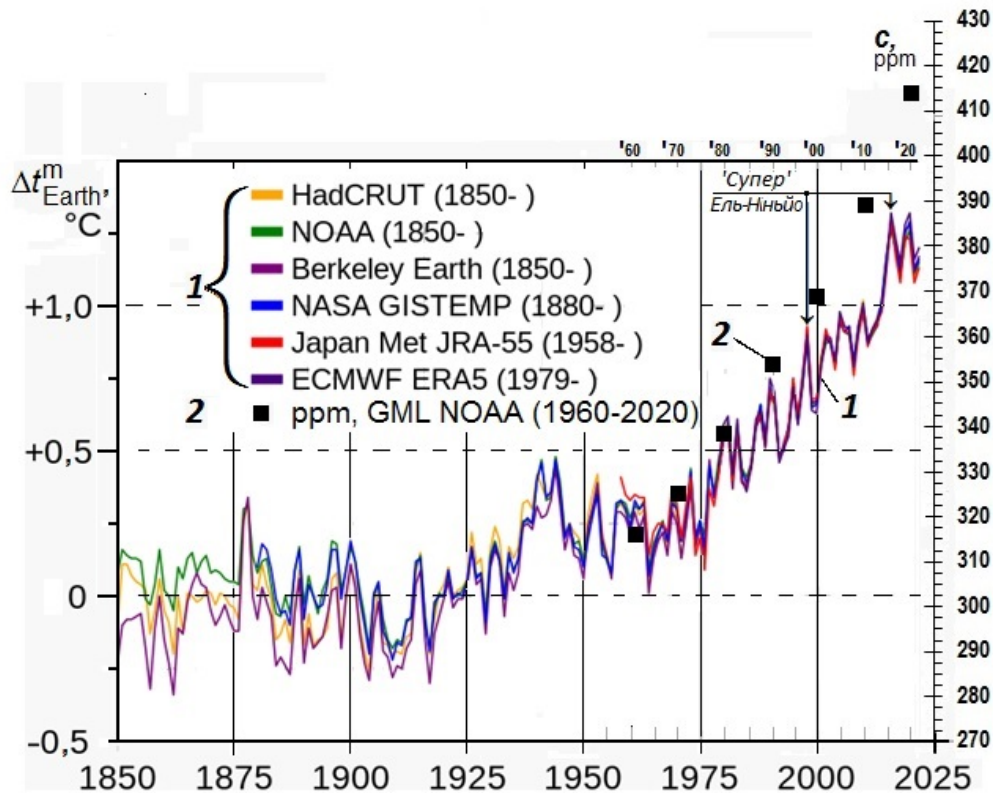


Рис. 2. Зміна в часі аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі Δt^m_{Earth} за даними різних джерел (1) та концентрації с атмосферного діоксиду вуглецю (2); стрілки вказують на роки дії «супер» Ель-Ніньйо, за Дж. Хансеном 1997-1998 та 2015-2016 роки; (джерела вихідних даних [2, 15,16])

На рис. 2 наведено шість наборів даних щодо поведінки аномалії температури Δt^m_{Earth} (кластер 1) від провідних кліматологічних центрів – двох європейських (HadCRUT та ERA5), трьох північно-американських (NOAA GlobalTemp, Berkeley Earth, NASA GISTEMP) і одного японського (Japan Met JRA-55). Чотири набори даних – HadCRUT, NOAA GlobalTemp, Berkeley Earth, NASA GISTEMP – охоплюють повні періоди інструментальних кліматично-погодних спостережень. Два інших набори даних (ERA5 і JRA-55) є продуктами реаналізу. Аномалії набору даних обчислюються відносно базової лінії з 1981 по 2010 рр. і зсуваються на $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є «найкращою оціночною різницею для цього періоду від середнього значення за 1850-1900 рр.», наведеного в МГЕЗК AR6.

Перемежувальна синфазність подій ENSO, вулканічної активності та кривої Кілінга зумовили «рваний» характер поведінки аномалії ГСТП у кінці 20-го – початку 21-го століть (рис. 2). Хоча в цілому має місце чітко виражена тенденція прискореного зро-

стання аномалії температури Δt^m_{Earth} . Вплив фаз охолодження Ла-Нінья, нагріву Ель-Ніньйо, а також затінення прозорості атмосфери чи її збагачення ПГ як продуктами вулканічних вивержень були стабілізуючими та дестабілізуючими імпакт-факторами для ЗКГП.

Щодо рекорду за показником температури літа (JJA), то йому відповідає поточний 2023 рік. За відомостями кліматичного бюлетеня (який публікується у рамках великого європейського проекту Copernicus Climate Change Service, що впроваджується Європейським центром середньострокових прогнозів погоди від імені Європейської Комісії і за фінансової підтримки ЄС), регулярно оновлюється п'ятірка найтепліших бореальних літ (червень-липень-серпень) [13]. Упорядкований авторами календарний ряд узагальнених кліматичних даних має вигляд (після року у дужках у порядку убавання температура літа, її збільшення у порівнянні з попереднім рекордом літа): 2023 р. ($16,77\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2019 р. ($16,48\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2016 р. ($16,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2022 р. ($16,44\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2020 р. ($16,43\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta t = 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$); 2021 р. ($16,39\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Особливості зміни рівня атмосферного діоксиду вуглецю

Згідно з висновками ВМО, МГЕЗК, AR6 основною причиною теплових аномалій ЗКП є антропогенний імпакт-фактор у вигляді неухильно зростаючих глобальних щорічних концентрацій ПГ. Ключовим агентом суміші ПГ є діоксид вуглецю. Має місце висока узгодженість загальної еволюції аномалії глобальної температури поверхні Землі $\Delta t_{\text{Earth}}^m$ і рівня атмосферного діоксиду вуглецю (рис. 2).

На рис. 3 наведено результати аналізу підвищення рівня і темпів зростання атмосферного діоксиду вуглецю. Представлені результати одержано на основі опрацювання первинних даних, отриманих в обсерваторії Мауна-Лоа, Гаваї, у лабораторії глобального моніторингу Національного управління океанічних і атмосферних досліджень [14-15].

З метою надання наочності інформація на рис.3 наведена на сітці сходоподібних горизонтально розташованих ліній, яка відповідає середньорічним вибірковим первинним значенням концентрації с за 1960, 1970 і так далі роки. На графіку (врізка а) нанесено річні темпи зростання с у всьому діапазоні зміни клімату у форматі сучасного глобального потепління (60-ті роки 20 століття... 20-ті роки 21 століття) [16]. Слід зазначити, що в ОМЛ систематичні вимірювання вмісту атмосферного CO_2 розпочалися у березні 1958 року (середньомісячне значення 315,70 ppm) і безперервно тривають вже 65 років, що є найдовшим періодом вимірювань концентрації CO_2 . NOAA розпочало власні паралельні вимірювання CO_2 лише з травня 1974 року.. Дані з березня 1958 року по квітень 1974 року були отримані Чарльзом Девідом Кілінгом (Інститут океанографії Скріппса, США). Відбуваються також виміри

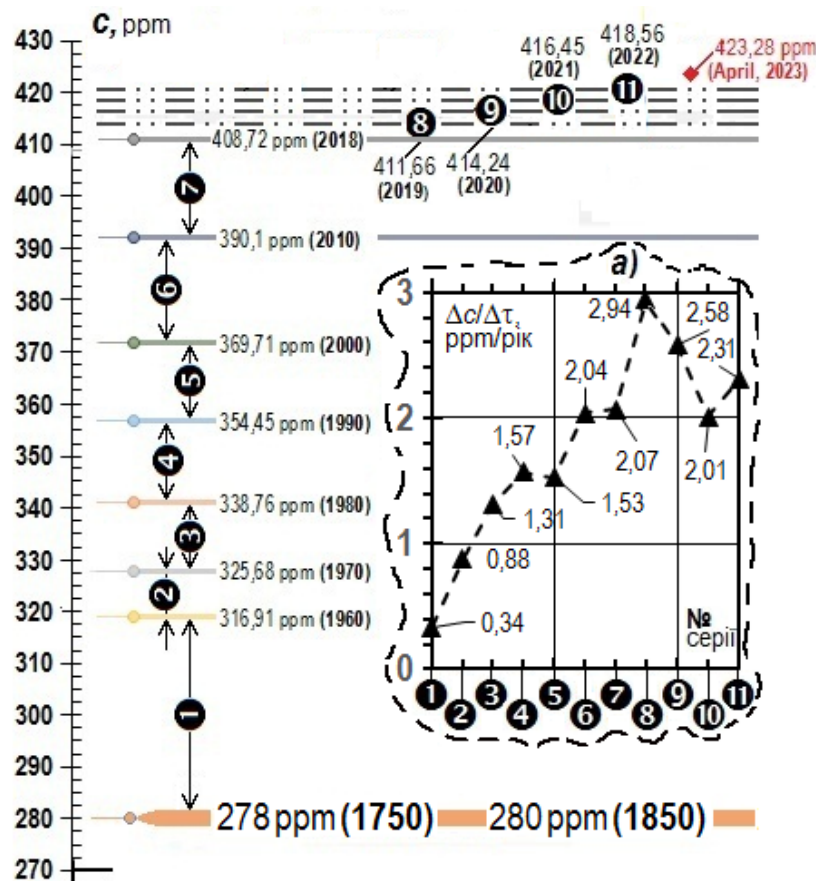


Рис. 3. Середньорічні значення концентрації с атмосферного діоксиду вуглецю на сітці сходоподібних ліній; врізка (а) – зміна швидкості зростання концентрації атмосферного діоксиду вуглецю в часових інтервалах 1...11 : 1 – стодесятирічний інтервал; 2...6 – десятирічні; 7 – восьмирічний; 8...11 – 2019-2022 роки; (джерела вихідних даних [2, 15, 16])

рівнів емісії інших довгоіснуючих, добре змішуваних газів з усього спектру ПГ: метану CH_4 , закису азоту N_2O , галогеновмісних сполук, переважно фреонів тощо.

Наведені на рис. 3 (врізка а) дані щодо швидкості зміни природження рівня CO_2 одержано шляхом ділення значень концентрації CO_2 , що відповідають кінцевим точкам інтервалу часу, на величину даного інтервалу. Хоча має місце багато інших методик оцінки темпів зростання вмісту атмосферного CO_2 впродовж багаторічного періоду вимірювань. Вони удосконалюються, зокрема, з огляду на наявність актуальної проблеми позбавлення артефактів при обробці великих масивів кліматологічних даних. Наприклад, відповідна дискусія відбулася відносно нібито хіатусу в тенденції сучасного потепління клімату [17].

Згідно з результатами, представленими на рис. 3 (врізка а), спостерігається прискорення зростання рівня атмосферного діоксиду вуглецю, починаючи з 60-х років минулого століття до початку пандемії Covid19 включно. Максимальне прискорення було досягнуто у «доковідному» 2018 році (2,94 ppm/рік), у два «ковідні» (2020-2021) роки мала місце деяка редукція цього прискорення. Воно становило 2,58 і 2,01 ppm/рік у 2020 і 2021 роках відповідно. З кінця 2021 року повертається попередня тенденція до підвищення темпу зростання рівня атмосферного CO_2 . Щодо середньої «брутто» - швидкості зростання вмісту CO_2 з березня 1958 року по березень 2023 року, то вона оцінюється у 1,62 ppm/рік (0,51 %/рік).

Висновки

В контексті кліматичної безпеки виконано аналіз розвитку фізичних основ зміни клімату та дослідження особливостей поведінки аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі і рівня діоксиду вуглецю в земній атмосфері. При цьому:

1. Розглянуто результати низки досліджень, що слугували розробці фізичних основ зміни клімату. Виконано аналіз розвитку відповідних уявлень від пріоритетних досліджень парникового ефекту Ж. - Б. Фур'є, встановлення здатності деяких газів, зокрема CO_2 , поглинати ІЧ-випромінювання (Д. Тіндаль, С. Арреніус та ін.), початку світового дискурсу щодо наявності причинно-наслідкового зв'язку впливу викидів CO_2 і глобального потепління (Г. Каллендер) до появи сучасних моделей кліматичної системи Землі (С. Манабе, К. Хассельман, Дж. Хансен, Т. Уїглі та ін.).

2. Виконано аналіз поведінки аномалії глобальної середньої температури поверхні Землі в аспекті дії двох основних природних кліматоутворюючих факторів – феномена Південного коливання Ель-Ніньйо та вулканічних вивержень:

- розглянуто вплив Південного коливання Ель-Ніньйо на зміну клімату; наведено дані щодо зміни океанічного Ніньйо індексу, який відстежує поведінку Ель-Ніньйо; відмічається, що дане явище наразі інтерпретується як результат внутрішньої мінливості клімату, а не результат його зміни;

- проаналізовано особливості вулканічної активності і зміни клімату у форматі сучасного глобального потепління; зазначається, що в межах даної фази зміни клімату у більшості випадків підсумковим нетто-ефектом викидів вулканів є тимчасове зниження середньої температури Землі;

- розглянуто питання щодо поглиблення уявлень про можливості впливу вулканічної активності на клімат Землі; до прикладу наводяться дані про виверження відносно великого підводного вулкану Хунга у січні 2022 року, яке призвело до ефекту тимчасового збільшення середньої температури Землі у 2023 році, що пов'язано з викидами серед інших вулканічних продуктів великої кількості водяної пари.

3. Наведено результати аналізу підвищення рівня і темпів зростання атмосферного діоксиду вуглецю, як ключового агента суміші парникових газів. Згідно з представленими даними спостерігається прискорення зростання його рівня, починаючи з 60-х років минулого століття до початку пандемії COVID 19 включно, з максимальним прискоренням у «доковідному» 2019 році, його редукцією у «ковідні» (2020-2022) роки та поверненням з кінця 2021 року до попередньої тенденції підвищення темпу зростання атмосферного CO_2 .

Автори висловлюють глибоку подяку провідним науковим співробітникам, кандидатам технічних наук Н.О. Мерановій і Ю.В. Шеренковському за участь у роботі над статтею та іншим співробітникам відділу теплофізики енергоефективних теплотехнологій, які сприяли її підготовці.

ЛІТЕРАТУРА

1. IPCC AR6, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
2. Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn et al., 2021: Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC [Masson-Delmotte,

V., P. Zhai, A. Pirani et al, (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.

3. von Schuckmann K., Minière A., Gues F et al. Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 1675–1709, <https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023>, 2023.

4. Hansen J.E, Lacis A.A, 1990: Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change. *Nature*, 346, 713–719, doi:10.1038/346713a0.

5. Халатов А., Фіалко Н., Н., Тимченко М. (2023). Енергокліматична безпека і енергозабезпечення житлового сектору. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 48(1), 20–27.

6. *Cold & Warm Episodes* by Season. In: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php ==El Nino

7. Hansen J., Sato M., Ruedy R., Simons L. El Nino Fizzles. Planet Earth Sizzles. Why? 13 October 2023. <https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2023/ElNinoFizzles.13October2023.pdf>

8. Rafferty, J. P. (2023, June 28). world's major volcanoes. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/topic/worlds-major-volcanoes-2226816>

9. Lenssen N. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 2022-09-09 "The Climate Data Guide: Global surface temperature data: GISTEMP: NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) Surface Temperature Analysis." Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/global-surface-temperature-data-gistemp-nasa-goddard-institute-space-studies-giss> on 2023-10-22.]

10. *WMO Global Annual to Decadal Climate Update-Target Years: 2023 and 2023-2027*. WMO– 24 p, DOI: <https://doi.org/1u>

11. Khaykin S., Podglajen A., Ploeger F. et al. Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption, *Communications Earth & Environment*, 10.1038/s43247-022-00652-x, 3, 1, (2022).

12. Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al. Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. *Nat. Clim. Change*. 13, 127–129 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>

13. *Summer 2023: the hottest on record*. In: [https://climate.copernicus.eu/summer-2023-hottest-record#:~:text=The%20June%2DJuly%2DAugust%20\(warmest%20for%20the%20summer%20season](https://climate.copernicus.eu/summer-2023-hottest-record#:~:text=The%20June%2DJuly%2DAugust%20(warmest%20for%20the%20summer%20season)

14. *NASA Summer 2023 Temperature Media Resources*: <https://svs.gsfc.nasa.gov/14407>

15. *Use of NOAA gml data*. https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt

16. *Trends in CO₂*. In: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html>

17. Rypdal, K., 2018: The life and death of the recent global surface warming hiatus parsimoniously explained. *Climate*, 6(3), doi:10.3390/cli6030064.

CLIMATE SECURITY: BEHAVIORAL FEATURES OF THE ANOMALY OF THE GLOBAL AVERAGE TEMPERATURE OF THE EARTH'S SURFACE

Khalatov A.¹, Fialko N.², Tymchenko M.³

¹*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head Department, professor, orcid.org/0000-0002-7659-4234, e-mail: Artem.Khalatov1942@gmail.com*

²*corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head Department, professor, orcid.org/0000-0003-0116-7673, e-mail: nmfialko@ukr.net*

³*PhD (engin) orcid.org/0000-0003-4426-713X, e-mail: tnp_books@ukr.net*

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2023.1>

The purpose of the work is to analyze the development of the physical foundations of climate change and study the behavior of the global average temperature of the Earth's surface in the context of the action of climate-forming factors.

The results of an analysis of the development of ideas about the physical aspects of climate change are considered. Relevant data, ranging from priority studies of the greenhouse effect of J.-B. Fourier before the advent of modern models of the Earth's climate system by S. Manabe, K. Hasselmann, etc. are presented. An analysis was carried out of the features of changes in the anomaly of the global average temperature of the Earth's surface depending on the action of two main natural climate-forming factors - the El Niño Southern Oscillation phenomenon and volcanic eruptions. It is noted that the El Niño phenomenon is now interpreted as a phenomenon of internal climate variability, and not the result of climate change against the backdrop of global warming.

Issues are being considered to deepen understanding of the possibility of the impact of volcanic activity on the Earth's climate. For example, data is provided on the eruptions of the relatively large underwater volcano Hunga in January 2022, which led to the effect of a temporary increase in the average temperature of the Earth in 2023, which is associated with the release of large amounts of water vapor, among other volcanic products. Data from an analysis of the increase in the level and growth rate of atmospheric carbon dioxide as a key agent in the mixture of

greenhouse gases are presented. It is noted that the growth of its level is accelerating, starting from the 60s of the last century until the start of the COVID 19 pandemic inclusive, with maximum acceleration in the “evidence-based” year of 2019, its reduction in the “current” years (2020-2022) and a return from the end of 2021 to the previous trend of increasing the growth rate of atmospheric CO₂.

Bibl. 17, Figures 3.

Key words: climate security, global warming, temperature anomaly, greenhouse gases, El Niño Southern Oscillation, volcanic eruptions.

1. *IPCC AR6, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

2. *Gulev, S.K., P.W. Thorne, J. Ahn et al., 2021: Changing State of the Climate System. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani et al, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 287–422, doi:10.1017/9781009157896.004.

3. *von Schuckmann K., Minière A., Gues F et al. Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?, Earth Syst. Sci. Data, 15, 1675–1709, https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023, 2023.*

4. *Hansen J.E, Lacis A.A, 1990: Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change. Nature, 346, 713-719, doi:10.1038/346713a0.*

5. *Khalatov A., Fialko N., N., Tymchenko M. (2023). Energy climate security and energy supply to the building stocks. Thermophysics and thermal power engineering, 48(1), 20-27.*

6. *Cold & Warm Episodes by Season. In: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php ==El Nino*

7. *Hansen J., Sato M., Ruedy R., Simons L. El Nino Fizzles. Planet Earth Sizzles. Why? 13 October 2023. https://www.columbia.edu/~jeh1/mailings/2023/ElNino Fizzles.13October2023.pdf*

8. *Rafferty, J. P. (2023, June 28). world's major volcanoes. Encyclopedia Britannica. https://www.britannica.com/topic/worlds-major-volcanoes-2226816]*

9. *Lenssen N. & National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 2022-09-09 "The Climate Data Guide: Global surface temperature data:*

GISTEMP: NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) Surface Temperature Analysis.” Retrieved from <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/global-surface-temperature-data-gistemp-nasa-goddard-institute-space-studies-giss> on 2023-10-22.]

10. *WMO Global Annual to Decadal Climate Update-Target Years: 2023 and 2023-2027*. WMO– 24 p, DOI: <https://doi.org/1u>

11. *Khaykin S., Podglajen A., Ploeger F. et al.* Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption, *Communications Earth & Environment*, 10.1038/s43247-022-00652-x, 3, 1, (2022).

12. *Jenkins, S., Smith, C., Allen, M. et al.* Tonga eruption increases chance of temporary surface temperature anomaly above 1.5 °C. *Nat. Clim. Change*. 13, 127–129 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01568-2>

13. *Summer 2023: the hottest on record*. In: [https://climate.copernicus.eu/summer-2023-hottest-record#:~:text=The%20June%2DJuly%2DAugust%20\(warmest%20for%20the%20summer%20season](https://climate.copernicus.eu/summer-2023-hottest-record#:~:text=The%20June%2DJuly%2DAugust%20(warmest%20for%20the%20summer%20season)

14. *NASA Summer 2023 Temperature Media Resources*: <https://svs.gsfc.nasa.gov/14407>

15. *Use of NOAA gml data*. https://gml.noaa.gov/webdata/ccgg/trends/co2/co2_mm_mlo.txt

16. *Trends in CO₂*. In: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/gr.html>

17. *Rypdal, K.*, 2018: The life and death of the recent global surface warming hiatus parsimoniously explained. *Climate*, 6(3), doi:10.3390/cli6030064.

Отримано 12.10.2023

Received 12.10.2023

Прийнято до друку 23.11.2023

Accepted for publication 23.11.2023