

ВУГЛЕЦЕВИЙ ТА ВОДНИЙ СЛІД ПРОВІДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПАНІЙ НА ТЛІ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ*

CARBON AND WATER FOOTPRINT OF LEADING TECHNOLOGY COMPANIES AGAINST THE BACKDROP OF THE DEVELOPMENT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

УДК 338.2:004:658.8

DOI: <https://doi.org/10.32782/dees.19-9>**Мельник Л.Г.¹**

д.е.н., професор,
професор кафедри економіки,
підприємництва
та бізнес-адміністрування,
Сумський державний університет;
директор,
Науково-дослідний інститут
економіки розвитку
МОН України та НАН України
у складі Сумського державного
університету

Дудка М.А.

студентка,
Сумський державний університет

Дегтярьова І.Б.²

кафедра економіки, підприємництва
та бізнес-адміністрування,
Сумський державний університет

Melnyk Leonid

Sumy State University;
Research Institute
for Development Economics (IDE)
at Sumy State University

Dudka Maria

Sumy State University

Dehtyarova Iryna

Sumy State University

Стаття присвячена аналізу вуглецевого та водного сліду провідних технологічних компаній – Meta, Google, Microsoft – на тлі розвитку штучного інтелекту (ШІ) та зростання екологічного сліду центрів обробки даних, спроєктованих для забезпечення його роботи. Розглянуто вуглецевий слід компаній згідно з Протоколом парникових газів (GHG Protocol) і зазначено, які викиди мають найбільшу частку у структурі вуглецевого сліду компаній. Попри численні ініціативи великих технологічних компаній, котрі покликані підтримувати принципи сталого розвитку, екологічній звітності бракує прозорості щодо водного сліду. Мікročіпи невід’ємний та водночас найбільш водозатратний компонент інфраструктури дата-центрів. Проаналізовано показники, які визначають водний слід компаній, та напрямки використання води для забезпечення роботи моделей ШІ. Існує ризик нівелювання позитивного впливу екологічних ініціатив технологічних компаній швидким темпом зростання їхньої інфраструктури, спрямованої на забезпечення роботи моделей ШІ. У статті вуглецевий та водний сліди розглядаються на тлі потреби в будівництві нових і підтримці роботи наявних центрів обробки даних. Обґрунтовано потребу в розробці стандарту оцінки водного сліду та підкреслено важливість комплексного підходу до аналізу екологічного сліду, в якому вуглецевий та водний сліди розглядаються як взаємодоповнюючі, а не взаємозамінні складові.

Ключові слова: штучний інтелект (ШІ), дата-центри, вуглецевий слід, водний слід, технологічні компанії, використання води, екологічні ініціативи.

The article is devoted to the analysis of the carbon and water footprint of leading technology companies – Meta, Google, Microsoft – against the background of the development of artificial intelligence (AI) and the growth of the ecological footprint of data centers designed to support its operation. The carbon footprint of companies according to the Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol) is considered and it is indicated which emissions have the largest share in the structure of the carbon footprint of companies. Despite numerous initiatives of large technology companies, which are designed to support the principles of sustainable development, environmental reporting lacks transparency regarding the water footprint. Microchips are an integral and at the same time the most water-consuming component of the data center infrastructure. The indicators that determine the water footprint of companies and the directions of water use to ensure the operation of AI models are analyzed. There is a risk that the positive impact of technology companies' environmental initiatives will be offset by the rapid growth of their infrastructure to support AI models. This article examines carbon and water footprints against the backdrop of the need to build new and maintain existing data centers. It argues for the need to develop a standard for water footprint assessment and emphasizes the importance of a comprehensive approach to environmental footprint analysis that treats carbon and water footprints as complementary rather than interchangeable components.

Key words: artificial intelligence (AI), data centers, carbon footprint, water footprint, technology companies, water use, environmental initiatives.

Постановка проблеми. Штучний інтелект – інструмент розв’язання екологічних проблем. Наприклад, у 2025 році Google запустила SpeciesNet, ШІ-модель для ідентифікації тварин на основі фотопасток, і супутник FireSat, який за допомогою ШІ може виявляти лісові пожежі [1].

Однак, попри численні ініціативи технологічних компаній, спрямовані на дотримання принципів сталого розвитку, екологічний слід їхньої діяльності викликає занепокоєння наукової спільноти й ставить під загрозу досягнення до 2030 року поставлених екологічних цілей. Одна з причин стрімкого зростання показників у щорічних екологічних звітах – прагнення технологічних компаній досягти першості у сфері штучного інтелекту. Центри обробки даних, які забезпечують роботу

й охолодження серверів ШІ, споживають величезну кількість електроенергії та води.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним із перших досліджень, яке привернуло увагу до проблеми водного сліду ШІ, є робота «Making AI Less «Thirsty»: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models», вперше опублікована навесні 2023 року. Автори дослідження зазначили напрями споживання води центрами обробки даних, спроєктованими для забезпечення роботи ШІ та запропонували метод оцінки водного сліду. Автори також наголосили, що розвиток штучного інтелекту не має посилювати глобальний водний стрес і нівелювати екологічні переваги, які може забезпечити [2]. Робота стала основою численних досліджень і публікацій, які підкреслюють

¹ Публікація містить результати дослідження «Фундаментальні засади переходу України до цифрової економіки на основі реалізації Industries 3.0; 4.0; 5.0» (№ 0124U000576) та «Цифрові трансформації для забезпечення цивільного захисту та повоєнного відновлення економіки в умовах екологічних і соціальних викликів» (№ д/р. 0124U000549).

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7824-0678>

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4615-0437>

необхідності прозорості у звітності щодо використання води дата-центрами для роботи ШІ.

Інші дослідження [3; 4] акцентують увагу на регіональних відмінностях у споживанні води центрами обробки даних. Їхні автори обумовлюють значну різницю в показниках кліматичними умовами й рівнем водного стресу в регіоні. У цих роботах також порівнюються водний та вуглецевий сліди нових моделей, зокрема GPT-4 та LLaMA.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз вуглецевого та водного сліду провідних технологічних компаній – Meta, Google, Microsoft – на тлі розвитку сфери штучного інтелекту та зростанні потреби в будівництві нових і підтримці роботи наявних центрів обробки даних.

Вклад основного матеріалу дослідження. Протокол парникових газів (GHG Protocol) – це загальноприйнятий стандарт обліку парникових газів, опублікований Всесвітнім інститутом ресурсів (WRI) і Всесвітньою діловою радою зі сталого розвитку (WBCSD) [5]. Гістограма на рис. 1 ілюструє структуру викидів парникових газів технологічних компаній: Meta, Google та Microsoft – за категоріями Scope 1, Scope 2, Scope 3 відповідно до протоколу парникових газів (GHG Protocol). Вуглецевий слід за категорією Scope 3 складає від 75% до 99% від загального вуглецевого сліду, тому можна зазначити, що зростання показників викидів парникових газів компаній зумовлене збільшенням обсягів викидів, пов'язаних з виробництвом обладнання, включно з тим, що необхідно для будівництва та забезпечення роботи дата-центрів.

Вуглецевий слід за Scope 1 і Scope 2 мають значно менші частки у структурі вуглецевого сліду компаній – до 1% й 24% відповідно. Низька частка

цих викидів за цими категоріями – наслідок дотримання компаніями стратегії сталого розвитку, зокрема реалізації екологічних ініціатив, спрямованих як на зменшення прямих викидів, наприклад, перехід на енергоефективні системи охолодження дата-центрів, так і на відмову від енергії, виробленої шляхом спалювання викопного палива, й переходу на відновлювальні джерела енергії.

Серед трьох компаній значно вирізняється показники компанії Google, в якій частка вуглецевого сліду за Scope 2 становить майже 24% від загального вуглецевого сліду компанії. Попри політику переходу на відновлювальні джерела енергії, темпи зростання інфраструктури компанії випереджають можливості забезпечення неуглецевої електроенергії. Так, у щорічному екологічному звіті, опублікованому влітку 2024 року, Google повідомила про зростання викидів парникових газів на 48% порівняно з 2019 роком і підкреслила, що оскільки планує і надалі інтегрувати штучний інтелект у свої продукти, то скорочення викидів – складне завдання [7].

Microsoft прагне перевершити Google не лише в розвитку штучного інтелекту, але й у досягненні екологічних цілей: компанія оприлюднила план перетворення на не просто вуглецево-нульову, а вуглецево-негативну компанію до 2030 року. Згідно з річним звітом, опублікованим у травні 2024 року, викиди Microsoft зросли на 29% порівняно з 2020 роком, частково через будівництво нових дата-центрів, спроєктованих й оптимізованих для підтримки навантажень ШІ [9]. Її вуглецевий слід залишається незмінно більшим за вуглецевий слід Google (рис. 2), проте частки Scope 1, Scope 2, Scope 3 у структурі вуглецевого сліду

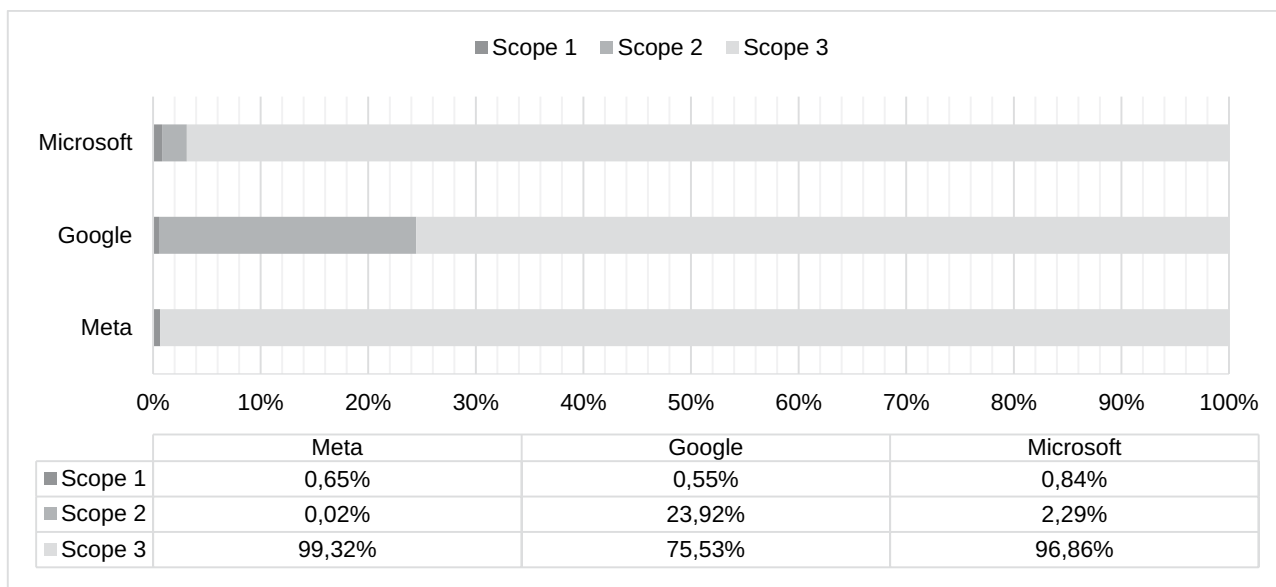


Рис. 1. Структура вуглецевого сліду компаній Meta, Google, Microsoft за категоріями Scope 1, Scope 2, Scope 3 у 2023 р.

Джерело: [6–9]

компанії свідчать про ефективність реалізації екологічних ініціатив порівняно з конкурентом.

Однак частково зменшення вуглецевого сліду досягається збільшенням використання водних ресурсів, наприклад, перехід до гідроелектроенергетики, що сприяє зростанню водного сліду. Оцінюючи екологічний слід великих технологічних компаній варто пам'ятати, що вуглецевий та водний сліди є взаємодоповнюючими, а не взаємозамінними для оцінки екологічного впливу [2] й неможливо вести мову, розглядаючи лише один з них. Попри важливість водного сліду, він не отримує належної уваги в екологічній звітності технологічних компаній. Ймовірно, через те, що його вплив менш помітний у короткостроковому вимірі, ніж вплив вуглецевого сліду, а загальноприйняті стандарти оцінки водного сліду відсутні.

Використання води включає два ключові поняття «вилучення води» («water withdrawn») – обсяг води, забраної з природного середовища, тобто підземних і поверхневих водних джерел, і «споживання води» («water consumption») – обсяг забраної води, яка не повертається у природне середовище. Водний слід визначається показником споживання води [2]. Частина забраної води, що аналітично є різницею між забором і споживанням води повертається у природне середовище. Не зважаючи на систематичне зростання показників забору води з 2019 по 2023 роки (рис. 3), – дані про обсяги вилученої води компанією Microsoft за

2019 рік відсутні, – провідні технологічні компанії вдосконалюють технологічні процеси та впроваджують екологічні ініціативи задля зменшення частки споживання води й відповідно збільшення обсягів її повернення у природне середовище.

Однак цього недостатньо для повної оцінки впливу забору води на регіон забору. Близько третини води, необхідно для діяльності компанії Google у 2023 році, було вилучено з регіонів з середнім або високим вододефіцитом (рис. 4). Водночас досить часто забрана вода повертається не в джерело забору [10], що призводить до виснаження водних ресурсів в уразливих регіонах

Використання води ШІ узагальнене поняття, яке включає вилучення і споживання води. Автори дослідження «Making AI Less «Thirsty»: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models» пропонують класифікацію використання води аналогічну тій, яка застосовується для оцінки викидів парникових газів за Протоколом парникових газів (GHG Protocol): охолодження центрів обробки даних (Scope 1), виробництво електроенергії (Scope 2) та виробництва серверів (Scope 3) [2]. Використання води за Scope 1 і Scope 2 також об'єднують під терміном «операційним водоспоживанням» [11].

Мікročіпи невід'ємний та водночас найбільш водозатратний компонент інфраструктури дата-центрів. Для виробництва одного мікročіпа потрібно приблизно 2200 галонів ультрачистої

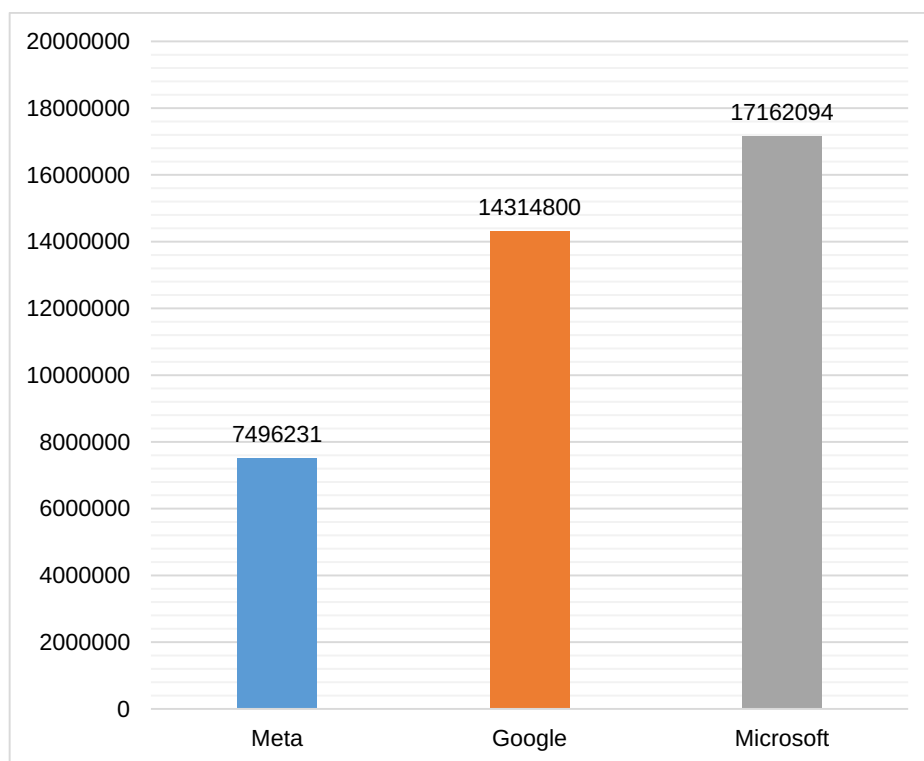


Рис. 2. Вуглецевий слід компаній Meta, Google, Microsoft за 2023 р., т CO₂

Джерело: [6–9]

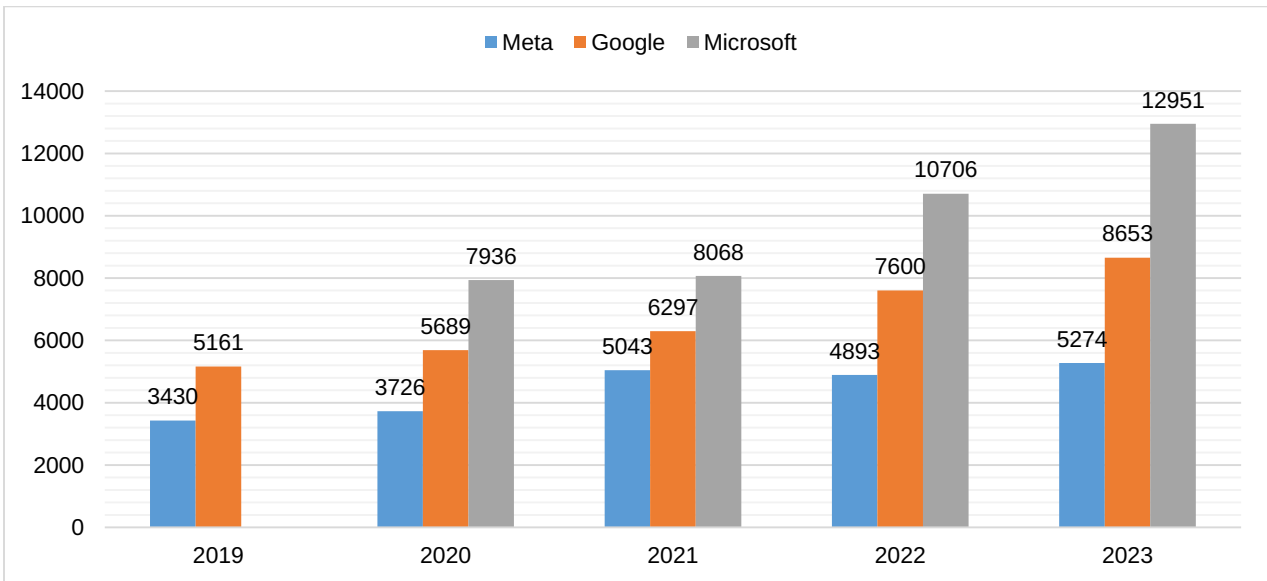


Рис. 3. Показник вилучення води компаній Meta, Google, Microsoft за 2019 – 2023 рр., тис. м³

Джерело: [6–9]

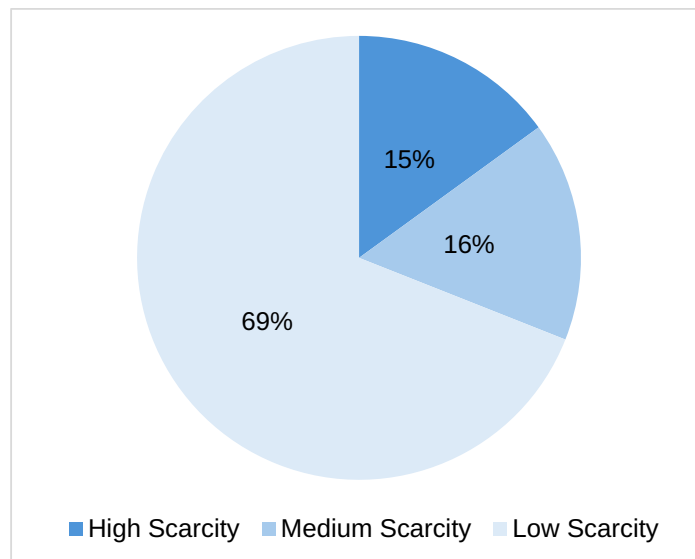


Рис. 4. Структура забору води Google у 2023 році за рівнем вододефіциту регіону

Джерело: [7]

води (Ultra-Pure Water, далі – UPW) [11]. Водночас отримання UPW – це складний процес, який потребує таких процесів очищення звичайної води, як: деіонізація та зворотний осмос – для видалення забруднюючих речовин, мінералів та інших домішок, які можуть пошкодити чіпи. Так, для отримання 1000 галонів ультрачистої води потрібно приблизно від 1400 до 1600 галонів питної води [12]. Крім того, процес очищення потребує значних витрат електроенергії, що виносить на розгляд і питання вуглецевого сліду процесу отримання UPW.

Використання води відрізняється залежно від регіону. Здавалося б, що витрати води на забезпечення роботи дата центрів, які забезпечують роботу ШІ, зокрема на охолодження, мали б бути більшими через спекотний порівняно з Америкою клімат, проте дослідження Ноя Шумба, проведене у співавторстві з авторами дослідження «Making AI Less «Thirsty»: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models», заперечує цю думку. Вісім з одинадцяти досліджених африканських країн мали нижчі показники споживання води дата-центрами ніж середній показник у світі [3].

Виявлена дослідженням відмінність може стати ключовим чинником у розробці рекомендацій та стратегій щодо зменшення водного сліду ШІ. Вона полягає в типі охолодження дата-центру, вибір якого зазвичай залежить саме від географічного розташування потужності [13]. У регіонах, де електроенергія дешевша, а води порівняно мало, для охолодження здебільшого використовується електроенергія. Це означає, що кількість води та електроенергії, необхідна для кожного окремого запиту, може залежати від місця розташування центру обробки даних і сильно відрізнятися [14]. Так, у жарких регіонах суха градирня (а cooling tower) є одним з найбільш поширених і ефективних механізмів відведення тепла для центрів обробки даних [3].

Попри численні ініціативи великих технологічних компаній, котрі покликані підтримувати принципи сталого розвитку, екологічній звітності бракує прозорості щодо водного сліду. Нагальне завдання як наукової спільноти, так і компаній – не тільки розробка і впровадження екологічних ініціатив, а й стандартизація обліку використання водних ресурсів й оцінки водного сліду.

У статті вуглецевий та водний сліди розглядаються на тлі потреби в будівництві нових і підтримці роботи наявних центрів обробки даних. Безумовно, не всі дата-центри спроектовані для забезпечення роботи ШІ, проте розвиток саме цієї сфери технологій значно збільшує потребу в них.

Тому варто звернути увагу на картку моделі (а model card) – коротку характеристику того, як була розроблена й для чого призначена модель ШІ. За визначенням Google, вони покликані забезпечувати підхід компанії до відповідального штучного інтелекту [15]. Так, справді вони надають інформацію щодо потужності й можливостей моделі ШІ, враховують етичну складову використання штучного інтелекту, проте екологічна складова залишається поза увагою. Це правда й щодо карток моделей компанії OpenAI. Користувачі можуть легко знайти інформацію про можливості та навіть ризики використання моделі, проте компанія не тільки не вважає за потрібне проінформувати їх про екологічні наслідки її використання, а й не забезпечує достатньо прозорості в річній звітності.

Висновки. Розвиток штучного інтелекту супроводжується зростанням вуглецевого та водного слідів. У структурі вуглецевих викидів провідних технологічних компаній переважають непрямі вуглецеві викиди (Scope 3). Існує ризик нівелювання позитивного впливу екологічних ініціатив технологічних компаній швидким темпом зростання їхньої інфраструктури, спрямованої на забезпечення роботи моделей ШІ.

Забезпечення роботи моделей ШІ – охолодження дата-центрів, отримання ультрачистої

води (UPW) для виробництва чіпів тощо – вимагає значного обсягу водних ресурсів. Третина води забрана з регіонів з середнім і високим вододефіцитом. Нагальне завдання наукової спільноти та провідних технологічних компаній – стандартизація обліку використання водних ресурсів й оцінки водного сліду. Оцінка екологічного сліду штучного інтелекту потребує комплексного підходу, оскільки вуглецевий та водний сліди – взаємодоповнюючі, а не взаємозамінні.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК:

1. Повний березневий звіт Google щодо AI. UaMaster. URL: <https://blog.uamaster.com/povnyj-bereznevij-zvit-google-shhodo-ai-gemini-2-5-pro-ekosystema-instrumentiv-i-ekologichni-initsiatyvy/> (дата звернення: 30.04.2025)
2. Li P., Yang J., Islam M. A., Ren S. Making AI Less «Thirsty»: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models. arXiv. 2025. 26 March. № arXiv:2304.03271. URL: <https://arxiv.org/abs/2304.03271> (дата звернення: 27.04.2025)
3. Shumba N., Tshekiso O., Li P., Fanti G., Ren S. A Water Efficiency Dataset for African Data Centers. arXiv. 2024. 6 Dec. № arXiv:2412.03716. URL: <https://arxiv.org/abs/2412.03716>
4. Li P., Yang J., Wierman A., Ren S. Towards Environmentally Equitable AI via Geographical Load Balancing. arXiv. 2024. 2 May. № arXiv:2307.05494. URL: <https://arxiv.org/abs/2307.05494> (дата звернення: 27.04.2025)
5. Колесник С. Зміна клімату хвилює й Україну. Охорона праці. 2024. Березень. URL: <https://ohoronapraci.kiev.ua/article/news/zmina-klimatu-hvilue-j-ukrainu> (дата звернення: 14.05.2025)
6. 2024 Environmental Sustainability Report. Data Fact Sheet. 2024.
7. Google 2024 Environmental Report. 2024.
8. Meta 2024 Sustainability Report. 2024.
9. Microsoft 2024 Environmental Sustainability Report. 2024.
10. Sellman M., Vaughan A. «Thirsty» ChatGPT uses four times more water than previously thought. The Sunday Times. 2024. 4 Oct. URL: <https://www.thetimes.com/uk/technology-uk/article/thirsty-chatgpt-uses-four-times-more-water-than-previously-thought-bc0pqswdr> (дата звернення: 26.04.2025)
11. Ren S. How much water does AI consume? The public deserves to know // OECD.AI. 2023. 30 Nov. URL: https://oecd.ai/en/wonk/how-much-water-does-ai-consume?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 27.04.2025)
12. James K. Semiconductor manufacturing and big tech's water challenge // World Economic Forum. 2024. 19 June. URL: https://www.weforum.org/stories/2024/07/the-water-challenge-for-semiconductor-manufacturing-and-big-tech-what-needs-to-be-done/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 09.05.2025)
13. Study Of Data Center Water Consumption In The Middle East And Africa Size. Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/>

study-of-data-center-water-consumption-in-the-middle-east-and-africa (дата звернення: 28.04.2025)

14. Verma P., Tan S. A bottle of water per email: the hidden environmental costs of using AI chatbots. The Washington Post. 2024. 18 Sept. URL: <https://www.washingtonpost.com/technology/2024/09/18/energy-ai-use-electricity-water-data-centers/> (дата звернення: 26.04.2025)

15. Google Model Cards. URL: <https://modelcards.withgoogle.com> (дата звернення: 30.04.2025)

REFERENCES:

1. Povnyi bereznevyyi zvit Google shchodo AI. UaMaster. Available at: <https://blog.uamaster.com/povnyj-bereznevij-zvit-google-shhodo-ai-gemini-2-5-pro-ekosystema-instrumentiv-i-ekologichni-initsiatyvy/> (accessed: 30.04.2025)

2. Li P., Yang J., Islam M. A., Ren S. Making AI Less «Thirsty»: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models/ arXiv. 2025. 26 March. № arXiv:2304.03271. Available at: <https://arxiv.org/abs/2304.03271> (accessed: 27.04.2025)

3. Shumba N., Tshekiso O., Li P., Fanti G., Ren S. A Water Efficiency Dataset for African Data Centers. arXiv. 2024. 6 Dec. № arXiv:2412.03716. Available at: <https://arxiv.org/abs/2412.03716>

4. Li P., Yang J., Wierman A., Ren S. Towards Environmentally Equitable AI via Geographical Load Balancing. arXiv. 2024. 2 May. № arXiv:2307.05494. Available at: <https://arxiv.org/abs/2307.05494> (accessed: 27.04.2025)

5. Kolesnyk S. Zmina klimatu khvyluie y Ukrainu. Okhorona pratsi. 2024. Berezen. Available at: <https://ohoronapraci.kiev.ua/article/news/zmina-klimatu-hvilue-j-ukrainu> (accessed: 14.05.2025)

6. 2024 Environmental Sustainability Report. Data Fact Sheet. 2024.

7. Google 2024 Environmental Report. 2024.

8. Meta 2024 Sustainability Report. 2024.

9. Microsoft 2024 Environmental Sustainability Report. 2024.

10. Sellman M., Vaughan A. «Thirsty» ChatGPT uses four times more water than previously thought. The Sunday Times. 2024. 4 Oct. Available at: <https://www.thetimes.com/uk/technology-uk/article/thirsty-chatgpt-uses-four-times-more-water-than-previously-thought-bc0pqswdr> (accessed: 26.04.2025)

11. Ren S. How much water does AI consume? The public deserves to know. OECD.AI. 2023. 30 Nov. Available at: https://oecd.ai/en/wonk/how-much-water-does-ai-consume?utm_source=chatgpt.com (accessed: 27.04.2025)

12. James K. Semiconductor manufacturing and big tech's water challenge/ World Economic Forum. 2024. 19 June. Available at: https://www.weforum.org/stories/2024/07/the-water-challenge-for-semiconductor-manufacturing-and-big-tech-what-needs-to-be-done/?utm_source=chatgpt.com (accessed: 09.05.2025)

13. Study Of Data Center Water Consumption In The Middle East And Africa Size // Mordor Intelligence. Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/study-of-data-center-water-consumption-in-the-middle-east-and-africa> (accessed: 28.04.2025)

14. Verma P., Tan S. A bottle of water per email: the hidden environmental costs of using AI chatbots, The Washington Post. 2024. 18 Sept. Available at: <https://www.washingtonpost.com/technology/2024/09/18/energy-ai-use-electricity-water-data-centers/> (accessed: 26.04.2025)

15. Google Model Cards. Available at: <https://modelcards.withgoogle.com> (accessed: 30.04.2025)