

Гуцуляк Анатолій. Вплив інноваційних технологій на навколишнє середовище та екологічний аспект proof-of-work консенсусу. *Економічний дискурс*. 2024. Випуск 3-4. С. 36-48.
DOI: <https://doi.org/10.36742/2410-0919-2024-2-4>

УДК 330.341.1
JEL Classification O31, O32

Гуцуляк Анатолій
здобувач третього рівня вищої освіти «доктор філософії»
Західноукраїнський національний університет
м. Тернопіль, Україна
E-mail: moip_kaf@wunu.edu.ua
ORCID: 0009-0001-3295-0954

ВПЛИВ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ PROOF-OF-WORK КОНСЕНСУСУ

Анотація

Вступ. Розвиток блокчейн-мереж, що використовують механізм консенсусу Proof-of-Work (PoW), супроводжується значним екологічним впливом через високе енергоспоживання майнінгового обладнання. Це створює серйозні виклики для досягнення цілей сталого розвитку та боротьби зі зміною клімату. Результати дослідження можуть стати основою для розробки енергоефективних рішень та регуляторних підходів, спрямованих на зменшення екологічного сліду блокчейн-технологій.

Методи. При здійсненні дослідження застосовувались загальнонаукові та спеціальні методи дослідження, зокрема: індукції та дедукції – на етапі збору первинних даних та їх аналізу; порівняльний (для порівняння споживання електроенергії блокчейн мережею та окремими країнами); абстрактно-логічний – в процесі формулювання висновків; описово-аналітичний, творчо-критичний, графічний (для аналізу динаміки ціни Bitcoin, хешрейту мережі, кількості активних адрес, економічного аналізу).

Результати. Досліджено динаміку хешрейту блокчейн мережі Bitcoin з 2017 по 2025 рік та ідентифіковано періоди різкого падіння загальної обчислювальної потужності, а також визначено основні чинники, які призвели до цього. Проведено аналіз динаміки енергоспоживання мережею Bitcoin та розраховано викиди CO₂ різними країнами у 2024 році залежно від їх частки в загальному хешрейті мережі. Визначено країни, які в перерахунку на 1% хешрейту мережі продукують менше забруднення, в порівнянні з іншими. Обґрунтована неефективність витрат електроенергії на річне обслуговування активних платіжних адрес та необхідність невідкладного втручання з боку світової спільноти для запобігання значним екологічним наслідкам.

В результаті проведеного аналізу технічних обмежень механізму консенсусу proof-of-work (PoW), розкрито наявну проблему його високої енергозатратності. В результаті зроблених розрахунків згенерованого вуглецевого сліду процесом видобутку нових блокчейн блоків в країнах з найбільшою часткою в загальному хешрейті, визначено та аргументовано невідкладну необхідність створення скоординованої міжурядової політики щодо регулювання та зменшення шкоди навколишньому середовищу майнінговою діяльністю.

Перспективи. Основні положення дослідження сприяють розумінню екологічних ризиків механізму консенсусу Proof-of-Work (PoW) та можуть бути корисними для природоохоронних організацій різних рівнів. Проведені розрахунки щодо енергозатратності блокчейн-системи Bitcoin можуть використовуватися для обґрунтування необхідності прозорішого видобутку блоків і переходу на відновлювані джерела енергії. Враховуючи зростання енергоспоживання та екологічних загроз, дослідження підкреслює важливість узгодженої політики країн з найбільшою часткою в хешрейті задля мінімізації негативного впливу майнінгу. Результати роботи можуть стати підґрунтям для подальших наукових досліджень вуглецевого та водного сліду в результаті майнінгу, як виду економічної діяльності.

Ключові слова: блокчейн, вуглецевий слід, proof-of-work, хешрейт, водний слід, трилема блокчейну,

децентралізація, масштабованість, майнінг.

Вступ.

З моменту виникнення першої блокчейн криптовалюти Bitcoin, в її мережі було проведено понад 1 мільярд транзакцій, а кількість активних гаманців сягає 1 мільйона. З кожним роком популяризація технології серед людей невпинно зростає, Bitcoin почав торгуватись на американській фондовій біржі у вигляді біржового інвестиційного фонду (ETF), а уряди деяких країн планують додавати монети в стратегічний національний резерв.

Але попри значний прогрес в розвитку технології та ріст капіталізації актива вище 2 трильйонів доларів, недостатньо дослідженою є проблема впливу технології на навколишнє середовище та дієві методи її вирішення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Emanuele Pagone, Alexandre Hart, Konstantinos Salonitis (2023) у своєму дослідженні порівнюють вплив на навколишнє середовище Біткоїна та фіатних валют (монети, банкноти, кредитні й дебетові картки). Дослідники Samuel Asumadu Sarkodie, Mohammad Amin Amani, Maruf Yakubu Ahmed та інші (2023) використовуючи машинне навчання та економіметричні методи проаналізували історичні зміни вуглецевого сліду від процесу майнінгу з 18 липня 2010 року по 4 грудня 2021 року. Nuoa Lei, Eric Masanet, Jonathan Koomey (2021) у своїй роботі надають огляд компонентів блокчейн системи для кращого розуміння драйверів попиту на електроенергію у майбутньому. Alex de Vries (2023) у своєму дослідженні детально аналізує зміни динаміки водного сліду від процесу майнінгу [1-4].

Дане дослідження доповнює цю літературу, представляючи нові дані щодо динаміки шкоди довкіллю обчислювальним обладнанням мережі Bitcoin, а також можливими варіантами подолання екологічних викликів.

Мета.

Метою статті є дослідження екологічного впливу proof-of-work (POW) механізму консенсусу, закладеного в основу роботи першої криптовалюти Bitcoin, визначення розміру вуглецевого сліду від діяльності майнінгового обладнання, пошук взаємозв'язків між показниками загального хешрейту мережі, ціною, споживанням електроенергії, а також пошук можливих дієвих методів вирішення глобальних екологічних викликів.

Методологія дослідження.

Дослідження проводилися шляхом використання діалектичного методу пізнання дії економічних законів і системного підходу до вивчення економічних явищ; монографічного методу; економіко-статистичних прийомів: статистичного спостереження, групування, порівняння; системного аналізу; абстрагування; прогнозування тощо.

Результати.

Поява першого генезис-блоку Bitcoin (нульовий блок), добутого третього січня 2009 року ознаменувала початок технологічної революції цифрових активів і транзакцій. З того часу майнери видобули більше 877 900 блоків, які містять інформацію про 1,14 мільярдів транзакцій [5; 6], які назавжди записані в децентралізованій бухгалтерській блокчейн книзі.

Досі людству достеменно не відомі істинні мотиви та цілі створення особою чи групою осіб під псевдонімом Сатоші Накамото першої децентралізованої мережі електронних платежів Bitcoin. Опублікований в жовтні 2008 року фундаментальний документ під назвою: «Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System» [7], так звана «біла книга», де описані процеси транзакцій, перевірка платежів, стимули для комп'ютерних вузлів та інша важлива інформація, також не дає відповіді на

це запитання.

Аналізуючи повідомлення залишене розробниками в першому згенерованому блоці блокчейну – «The Times 03/Jan/2009 Chancellor on brink of second bailout for banks» [8], яке являлось заголовком британської газети The Times, можна дійти до висновку, що мережа виникла як акт протесту та вияв недовіри до існуючої банківської системи, яка стала причиною іпотечної кризи 2008 року, в результаті якої урядам багатьох країн прийшлося рятувати банки шляхом впливання коштів платників податків.

Для реалізації ідеї децентралізованого карбування електронних грошей та захисту мережі від зловмисників, в Білій книзі був запропонований так званий механізм доказу виконання роботи – Proof-of-work (POW). Дана система є частиною алгоритму Hashcash, який був початково розроблений для зменшення кількості спаму на електронні скриньки британським криптографом Адамом Беком в травні 1997 року [9]. І хоча справжня мета, яку закладав винахідник, так і не була досягнута, його концепція надихнула Сатоші Накамото при розробці алгоритму Proof-of-work для мережі Bitcoin, а також стала основою й інших сучасних блокчейнів, які обрали консенсусний механізм POW: Litecoin, Dogecoin, Vertcoin, BitcoinCash, Ravecoin та інші).

Механізм доказу виконання роботи в мережі Bitcoin в широкому розумінні являє собою обчислювальне змагання між учасниками мережі (майнерами), які використовують свої апаратні та програмні потужності задля розв'язання криптографічної головоломки, суть якої полягає в пошуку вірної хеш-суми методом багаторазового перерахунку довільних значень спеціального параметра попси, який є важливою частиною нового блоку мережі поряд із даними новостворених транзакцій і хешем попереднього блоку. Майнер, який першим знайшов вірну хеш-суму додає новий блок до мережі, за що отримує винагороду.

Окрім заздалегідь зафіксованої винагороди за сформований блок, майнер додатково отримує комісійну винагороду з усіх транзакцій, які увійшли в цей блок. Даний механізм є постійний стимулом для майнерів, а вони, своєю чергою, фундаментом безпеки децентралізованої мережі.

Блокчейн, як система, повинен обов'язково мати три основні властивості: децентралізація, безпека, масштабованість. Майнери забезпечують збереження перших двох, а отже є надважливою ланкою життєздатності системи. Розмір фіксованої винагороди за знайдений блок в умовах циклічного росту ціни на першу криптовалюту являється тим фактором, який спонукає долучатись до процесу майнінгу все більшу кількість учасників.

Точну кількість майнерів неможливо визначити ні в один момент часу через децентралізовану природу явища, а також через те, що долучитись до даного процесу може новий учасник в будь-який момент часу. З усім тим, за допомогою інформації про загальний хешрейт мережі (загальна обчислювальна потужність) та грубих припущень можна визначити приблизну кількість пристроїв, які зайняті в обчислювальних змаганнях.

До прикладу середній денний показник хешрейту (hash/s) в грудні 2024 року складав більше 800 EH/s екзахешів за секунду [10], і якщо це значення розділити на потужність сучасного майнингового обладнання Antminer S21 - 200 TH/s, отримаємо показник в розмірі 4 мільйонів пристроїв залучених в процесі видобутку нових блоків. Звісно це дуже неточні розрахунки, які базуються на припущеннях, що всі вузли мережі постійно прагнуть оновлювати обладнання до найновішого для збільшення своєї ефективності, а також, що відвантажені влітку виробником Antminer S21 пройшли весь логістичний шлях і були підключені до мережі. Фактична кількість може бути більшою, оскільки близько 60% майнерів, згідно із дослідженням Кембриджського Центру Альтернативних Фінансів, продовжує використовувати обладнання віком 1-3 роки, яке є менш потужним [11].

Оскільки механізм proof-of-work потребує величезної кількості обчислювальних потужностей, які з ростом ціни першої криптовалюти тільки зростали через все більшу популяризацію процесу майнінгу – це стало екологічною проблемою. Опираючись на дані Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI), який показує річне споживання електроенергії всіма суб'єктами і процесу

майнінгу, ми отримусмо показник споживання електроенергії в діапазоні 150-175 ТВт-год в 2024 році [12], що вдвічі більше ніж річне споживання країни Бельгія (73 ТВт-год за 2023 рік), втричі більше Португалії (50 ТВт-год за 2023 рік), вчетверо Румунії (43 ТВт-год за 2023 рік) та аж в сім раз більше за річне споживання Азербайджану (23 ТВт-год за 2023 рік) [13].

Звісно, що це дуже приблизні цифри, які базуються на методології розрахунку індексу та припущенні, що всі майнери використовують ефективну конфігурацію рентабельного обладнання. У випадку використання обладнання до межі його рентабельності, хоча це малоімовірно, але відкидати таку вірогідність не потрібно — енергоспоживання мережі Bitcoin може сягати 260-290 ТВт-год в рік, а це вже більше ніж половина річного споживання Канади, яка займає сьоме місце у світі по цьому показнику.

Через закладений дефляційний механізм мережі Bitcoin (приблизно кожні чотири роки розмір емісії нових монет зменшується вдвічі) і все більше проникнення криптовалют в життя людей, можемо зробити припущення, що ціна активу неминуче буде зростати, а отже і хешрейт. Щоб в цьому переконатись, а можливо й знайти нові закономірності – ми з допомогою сервісу coinmetrics побудували лінійний графік, на якому відобразили показник загального хешрейту та ціну Bitcoin в період 2017-2025 років (рис. 1). Також ми вирішили застосувати до графіка 14-ти денне середнє значення з двох причин: по перше, складність мережі регулюється приблизно кожні 2 тижні (2016 блоків) і дане середнє значення буде збігатися з цим проміжком та допоможе краще оцінити вплив зміни складності майнінгу на хешрейт, а по друге, середнє значення допоможе згладити різкі коливання показників загальної обчислювальної потужності, спричинені вимкненням обладнання на технічне обслуговування, вимкненням світла та іншими короткостроковими факторами.

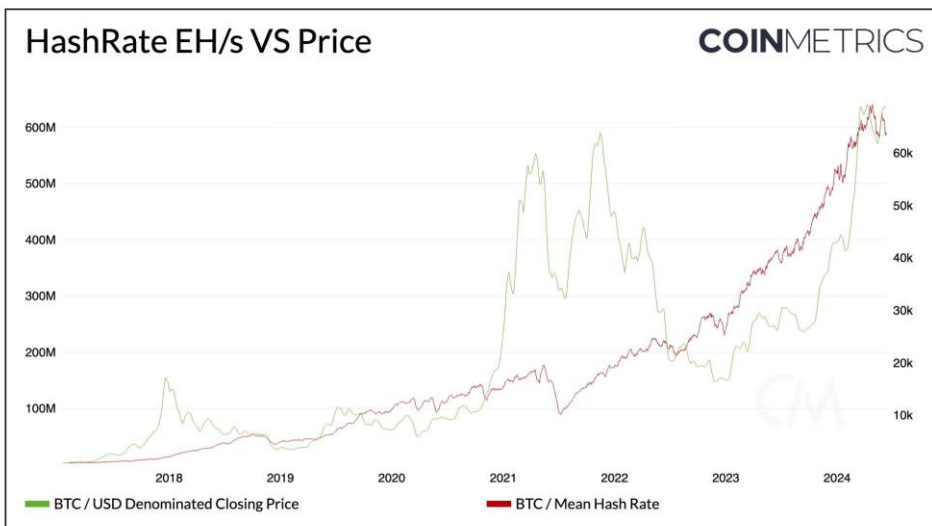


Рис. 1. Показник загального хешрейту та ціна Bitcoin в період 2017-2025 років*

*Джерело: побудовано автором з використанням [14].

Згідно із нашим спостереженням, ріст хешрейту почався невдовзі після різкого збільшення пошукових запитів за словом Bitcoin в Google Trends, починаючи з жовтня 2017 року з піком 17 грудня того ж року [15]. За весь проаналізований період показник хешрейту суттєво знижувався тільки двічі: перший раз – травень-червень 2021 року, а другий раз – травень-червень 2024 року. Перше історичне падіння (з 177 EH/s до 90 EH/s) було спричинено забороною китайським урядом

майнингу, як виду економічної діяльності та наказом енергетичним компаніям перевірити потенційні підприємства на території провінції Сичуань та припинити дану діяльність [16]. В той час в Китаї була зосереджена найбільша частка світового хешрейту і майнери були змушені вимкнути обладнання і шукати інші країни для продовження діяльності.

Друге – менше за розміром падіння (з 640 EH/s до 564 EH/s) в травні 2024 року пов'язане із суттєвим зменшенням винагороди за добутий новий блок. Хоча дана подія є заздалегідь запланованою, вона все одно впливає на частину майнерів, які мають застаріле обладнання, але стараються отримати максимальну вигоду від його роботи й продовжують його підтримувати підключеним до моменту зменшення винагороди. Далі вони будуть змушені оновити обладнання на більш потужне, або ж продовжити діяльність отримуючи набагато менші економічні вигоди, які після оплати вартості електроенергії та обслуговування можуть виявитись економічно недоцільними. Але не дивлячись на епізодичні різкі падіння хешрейту – згодом він доволі швидко відновлюється і через деякий час досягає нових історичних максимумів.

Батько засновник децентралізованої мережі Сатоші Накамото, розв'язуючи проблему недовіри до банківської системи, скоріше за все не міг уявити масштаби майбутньої популярності Bitcoin, а також те, що він породив енергетичного монстра, який буде споживати все більше і більше електроенергії.

Світове виробництво електроенергії згідно з даними міжнародної організації IEA (The International Energy Agency) у 2022 році склало 29 270 ТВт-год, а у 2023 збільшилось на 2,2% та досягло 29 925 ТВт-год [17; 18]. Обсяги виробництва електроенергії в більшості випадків відповідають загальному попиту на неї. Відповідно до цих значень, річне споживання електроенергії мережею Bitcoin у 2023 році становило 0.5% від світового виробництва.

За 2024 рік в мережі Bitcoin було проведено 192,1 мільйона транзакцій. Дані розрахунки зроблені за допомогою аналітичної платформи Ucharts [19]. Отже, середня транзакційна витрата електроенергії в мережі першої криптовалюти потребує приблизно 911 кВт-год (для розрахунку ми використовували річний показник споживання в розмірі 175 ТВт-год на основі даних Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index). Згідно з даними аналітичного ресурсу Statista та Digiconomist для проведення 100 000 транзакцій Visa використовується 148,63 кВт-год електроенергії [20], що становить приблизно 0.0014865 кВт-год/операція. За відповідний обсяг електроенергії, яка витрачається для однієї транзакції в мережі Bitcoin, можна провести 612 848 Visa операцій.

Хоча цифри приголомшливі, ми вважаємо дуже некоректним використання такого порівняння, оскільки перша криптовалюта по своїй структурі, дефляційній моделі, складності видобутку, обмеженості в обігу схожа більше на золото, ніж на звичайний централізований платіжний інструмент, хоча і наділена функцією проведення розрахунків.

В таких країнах, як Шрі-Ланка, Камбоджа, Пакистан середньорічний попит на електроенергію, розрахований на душу населення, менший ніж енергозатрати однієї записаної в блокчейні операції в мережі першої криптовалюти. А проведення чотирьох операцій вимагає більше електроенергії, аніж в середньому витрачає у світі одна людина за рік свого життя. Згідно з даними Our World in Data річна потреба в електроенергії складає 3664 кВт-год/людина, в Африці – 621 кВт-год/людина [21].

За останні декілька років світову спільноту почала серйозно турбувати проблема значної шкоди навколишньому середовищу зі сторони майнингу. Згідно з недавніми дослідженнями опублікованими в робочому документі МВФ – криптомайнінг став причиною 0,33% світових викидів вуглекислого газу у 2022 році, та, згідно з прогнозами стійкого росту, цей показник досягне 0,7% до 2027 року, а отримані результати досліджень Університетом ООН вказують, що вуглецевий слід від результатів роботи майнерів еквівалентний спалюванню 84 мільярдів фунтів вугілля і щоб його компенсувати потрібно висадити 3,9 мільярда дерев [22; 23].

Вуглецевий слід безумовно завдає непоправної шкоди довкіллю, впливаючи на зміну клімату, окислення океанів, зсув кліматичних зон, забруднення довкілля, зменшення урожайності, а

також вимирання тварин та рослин. Бурхливий технологічний розвиток, в авангарді якого знаходиться блокчейн та штучний інтелект, виступає каталізатором екологічних ризиків і потребує ефективного управління світової спільноти для зменшення негативного впливу на екосистему.

Ключовим для визначення шкоди, яку завдає майнінг криптовалют довікллю, є розуміння географічного розташування майнерів, адже кожна країна має власну структуру продукування електроенергії, яка склалась історично чи економічно. Так, згідно з даними платформи The Chain Bulletin за 2024 рік, 37,84% обчислювальних потужностей знаходяться в США, 21,11% – в Китаї, 13,22% – в Казахстані, 6,48% – в Канаді та 4,66% – в Росії та 16,7% – в решта країн світу [24]. З допомогою даних про структуру електрогенерації в п'яти країнах, на які припадає 83,3% загального хешрейту всієї біткоїн мережі, ми провели власні розрахунки розміру викидів, які генерує кожна з цих країн, результати яких відобразили в табл. 1.

Таблиця 1. Розміри викидів за окремими країнами світу*

Країна	Хеш-рейт (%)	Вугілля (%)	Нафта (%)	Газ (%)	Ядерна е-ія. (%)	Гідро-енергія (%)	Вітер (%)	Сонце (%)	Інші віднов. (%)	Витрати (ТВт-год)	Викиди CO ₂ (Мт)
США	37,84	15,89	0,78	42,41	18,25	5,51	10,01	5,6	6,07	66,22	22,77
Китай	21,11	60,7	0,78	3,25	4,6	13,16	9,36	6,18	3,8	36,94	19,19
Казахстан	13,22	66,66	0,06	20,52	0	7,7	3,45	1,61	0	23,14	14,98
Канада	6,48	5,09	0,41	14,36	14	57,55	6	1,18	2,5	11,34	1,31
Росія	4,66	16,66	1,03	46,27	18,47	17,04	0,28	0,17	0,5	8,16	3,02
Решта світу	16,7									29,23	10,23
Всього										175,02	71,5

*Джерело: розраховано автором на основі даних [25; 26].

Для розрахунків вуглецевого сліду від решти країн, які займають 16,7% від всіх обчислювальних потужностей, зроблено грубе припущення, що він має подібну структуру до країн лідерів майнінгу.

Загальні річні викиди CO₂, спричинені економічною діяльністю майнерів, складають орієнтовно 71,5 (Мт). Перше місце по вуглецевому сліду справедливо займає США з показником 22,77 Мт, друге Китай – 19,19 Мт, а третє Казахстан. Цікавим є те, що США, маючи майже в 3 рази більшу за Казахстан частку в загальному хешреїті мережі, продукують тільки на 50% більше шкідливих викидів. Це пояснюється тим, що доля вугілля в генерації електроенергії в США займає всього 15,89%, а в Казахстані – 66,66%. Найбільш чистою енергією в п'ятірці лідерів майнінгу може похвалитись Канада, оскільки вона має високий рівень використання відновлювальних джерел енергії, так гідрогенерація тут складає аж 57,55%.

Результати досліджень ООН, а також деякі інші дослідження, повідомляють про високу частку викопних джерел енергії, залучених до видобутку Bitcoin, в тому числі, вугілля близько 45%. Згідно з нашими розрахунками частка вугілля в загальній генерації складає приблизно 28,38%. Це високий показник, якщо порівнювати із Норвегією, де частка вугілля в енергетиці всього 0,03%, чи навіть США, де вугілля займає 15,89%, але все-таки не такий великий як в Китаї – 60,7%.

Проблема даних розрахунків як і розрахунків інших авторів в тому, що немає достовірних даних про переважний тип електроенергії, який використовують власники обчислювального обладнання в кожній із країн. Децентралізований характер діяльності, а також простота доєднання чи навпаки від'єднання в будь-який момент часу робить складним, а часто навіть неможливим, визначення як приблизної кількості обладнання, так і типів використовуваної енергії. У зв'язку з чим,

всі розрахунку робляться із грубими припущенням, що власники обладнання використовують всі типи електроенергії, які генеруються країною.

Щоб зрозуміти масштаб викидів CO₂ світовим майнинговим обладнанням, можна порівняти його із річними викидами окремих країн. Так, наприклад, Португалія за 2023 рік має показник 37,2 Мт, що вдвічі менше за шкоду від мережі першої криптовалюти. Країни Румунія чи Марокко, де населення 19 та 37 млн людей, відповідно, приносять менше шкоди довкіллю, ніж децентралізована мережа Bitcoin.

Шкода довкіллю не обмежується тільки вуглецевим слідом. Оскільки в процесі емісії нових монет зайняті обчислювальні машини, які постійно змагаються між собою за право зареєструвати в мережі новий блок і отримати за це винагороду, вони неминуче змушені конкурувати між собою. А основний параметр конкуренції – кількість операцій, які машина може зробити використавши 1 кВт-год електроенергії.

В таких умовах неминучі постійні перегони за розробку більш ефективного обладнання. Згідно із законом Мура, можна припустити, що нове більш ефективне обладнання кожні два роки буде витіснити з ринку старе економічно нежиттєздатне. Оскільки дане обладнання було створене спеціально для процесу майнингу і поки не має іншого призначення, воно кожні декілька років буде опиняться на смітнику. Згідно з розрахунками деяких досліджень, річний загальний обсяг електронних відходів сягає 42,22 кт, а середні відходи за 1 транзакцію = 291,3 грама сміття [27].

Не потрібно забувати також і про водний слід та вплив процесу видобутку нових блокчейн блоків на світову водну безпеку. ООН та ЮНЕСКО в своєму звіті щодо розвитку світових водних ресурсів за 2023 рік наголошують на неминучому ризику глобальної водної кризи та потребі термінового створення глобальних інтернаціональних механізмів для запобігання катастрофи [28].

Оскільки процес майнингу дуже енергомісткий процес, обладнання задіяне для нього виділяє велику кількість тепла, а приміщення де воно розміщене потребує великої кількості води для систем охолодження та зволоження повітря. Принципово важливим є джерело забору води: поверхневі води чи підземні, а також, яка частина буде назавжди втрачена через випаровування і недоступність для повторного застосування. Цей прямий спосіб генерування водного сліду дуже важко кількісно оцінити, на відміну від непрямого, який відносно легко підрахувати, оскільки він стосується водного сліду, який з'являється при виробництві електроенергії необхідної для роботи обладнання.

Сіддік та інші підраховували, що у 2021 році майнинг Bitcoin спожив 1572,3 гігалітрів води [29]. Для розуміння стурбованості світової спільноти щодо даного процесу достатньо зазначити, що даний об'єм води становить 628 920 олімпійських басейнів. З огляду на постійний ріст хешрейту мережі та наявний водний дефіцит у багатьох країнах світу або їх частинах, проблема в майбутньому буде тільки поглиблюватись і світовій спільноті потрібно розробляти інструменти, які будуть заохочувати майнерів вибирати географічні місця із більш сприятливими (прохолоднішими) кліматичними умовами для мінімізації прямого споживання води. Використання не прісної води для охолодження, а також акцент на розробці нових типів охолодження обладнання може також частково полегшити екологічний вплив майнингу.

Для відображення неефективності витрати електроенергії мережею Bitcoin ми вирішили побудувати ще один графік, на якому порівняти динаміку зміни загального хешрейту та кількості активних гаманців мережі, адже активність гаманців так чи інакше відображає економічну доцільність та практичну корисність останньої. Додатково додали графік, який відображає динаміку гаманців з балансом понад 1 000 доларів США (рис. 2).

Кількість активних гаманців досить стабільно росла з моменту створення мережі і досягла свого піку на показнику приблизно 1 290 000 рахунків в грудні 2017 року при загальному хешрейті близько 18 EH/s екзахешів за секунду. З того часу енергоспоживання мережею виросло мінімум в 5 разів, проте кількість економічно активних адрес так і не збільшилась.

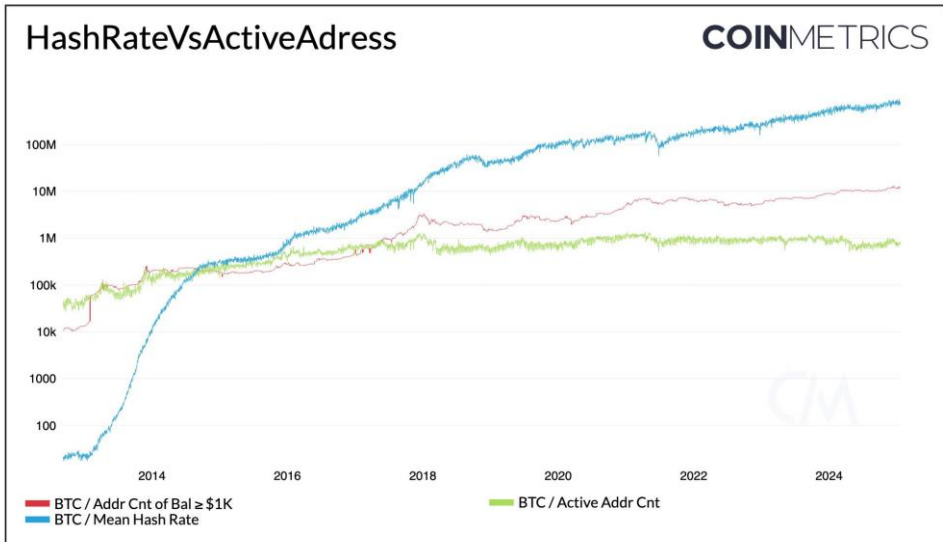


Рис. 2. Динаміка гаманців з балансом понад 1000 доларів США*

*Джерело: побудовано автором з використанням [14].

Варто зазначити, що кількість гаманців з балансом понад 1 000 доларів США виросла з трьох до дванадцяти мільйонів. Скоріше за все це пояснюється ростом вартості першої криптовалюти в майже шість раз в період з грудня 2017 до грудня 2024 року і тим, що залишки на малоактивних гаманцях, які економічно нерационально було використовувати через високі транзакційні витрати, були довгий час без руху, доки не піднялись у вартості.

Станом на кінець грудня 2024 року кількість активних адрес Bitcoin мережі становила приблизно 915 000, а це означає що на річне обслуговування однієї активної адреси в рік витрачається 191 256 кВт-год електроенергії та завдається шкода доквіллю в розмірі 78,14 тонн CO₂ викидів. Це надто велика ціна підтримки діяльності менш як одного мільйона гаманців, за яку повинно розраховуватись понад 8 мільярдів людей світової спільноти.

Найбільшою проблемою Bitcoin мережі являється технічне обмеження розміру даних блокчейн блоку на рівні 1 мегабайт (від 4000 до 7000 транзакцій). Згідно із закладеним в системі алгоритмом новий блок добувається майнерами в середньому кожні 10 хвилин часу, а це, своєю чергою, накладає обмеження у 220 мільйонів транзакцій в рік, або 7 операцій на секунду. Відповідно, щоб обробити один платіж для всього населення планети, мережі потрібно приблизно 35-38 років часу. Водночас глобальна потреба в кількості транзакцій складає 1,65 трильйона операцій в рік, та, згідно з прогнозами, виросте до 2,8 трильйона у 2028 році [29].

Це ще один аргумент який ставить під сумнів доцільність підтримки енергозатратного алгоритму в теперішньому вигляді й вказує на потребу негайного перегляду відношення урядів країн до підходів управління процесами побудови та розміщення майнингових центрів.

Архітектура більшості децентралізованих мереж показує, що неможливо підвищити масштабованість, не послабивши при цьому рівень децентралізації та безпеки. Ця проблема, популяризована співзасновником Ethereum – Віталіком Бутерінім, має назву «трилема блокчейну» і сенс її полягає в тому, що блокчейн не може досягти можливого пікового значення одночасно трьох фундаментальних характеристик мережі: масштабованості, децентралізації та безпеки. При спробах підвищити якусь одну із них обов'язково постраждає інша. Навколо трилеми у блокчейн спільноті ведуться дискусії та постійні пошуки універсального рішення і поки його не знайдено –

технологія має обмежені можливості, а також величезні екологічні наслідки.

Висновки і перспективи.

Розвиток блокчейн та AI технологій знаходиться в епіцентрі бурхливого процесу Четвертої промислової революції, а поява першого генезис-блоку Bitcoin заклала фундамент початку технологічної революції цифрових активів, платежів та фінансових деривативів. Дані технології можуть підвищити продуктивність виробництва, пришвидшити економічне зростання країн, а також поліпшити якість життя людей у всьому світі.

Перша криптовалюта за 16 років існування змогла прокласти собі шлях від експериментального активу, який серйозно не сприймався урядами та учасниками фінансових ринків, до рівня біржового інвестиційного фонду (ETF) з капіталізацією понад 122 мільярдів доларів станом на кінець 2024 року та пропозицій чиновників із реєстрацією відповідних законопроектів про формування національних стратегічних резервів в Bitcoin (США, Бразилія та ін). Однак енергетичні потреби задля емісії нових монет та проведення трансакцій в децентралізованій блокчейн мережі Біткоїн з кожним роком збільшуються й створюють величезні екологічні виклики для світової спільноти.

Мережа блокчейн споживає приблизно 175 ТВт-год електроенергії в рік, що еквівалентно сумарним річним потребам Бельгії, Румунії та Португалії, в яких проживає близько 40 мільйонів людей. В результаті видобутку Біткоїн щорічно в атмосферу попадає за різними оцінками від 71,5 до 94,85 Мт CO₂ викидів, що еквівалентно загальній шкоді довікллю таких країн, як Румунія чи Марокко.

Шкода екології не обмежується викидами CO₂, оскільки енергоспоживчий процес є причиною генерування значного водного сліду та електронних відходів. З огляду на тенденцію постійного росту хешрейту мережі за весь час існування першої криптовалюти та наявні прогнози щодо збільшення частки в світовому енергоспоживанні з боку блокчейн технологій та AI – не важко дійти висновків про посилення впливу на довкілля в наступні роки. МВФ, ООН, ЮНЕСКО та інші організації у своїх останніх річних звітах висловлюють занепокоєння, але цього недостатньо і потрібно прискорити процес переходу від дискусій та прогнозів до невідкладного вирішення екологічних викликів.

Оскільки фундаментальною основою мережі Bitcoin є енергомісткий механізм доказу роботи (POW), який, з одного боку, є основою високої безпеки та децентралізації, а з іншого – прогресуючою загрозою для навколишнього середовища – блокчейн спільноті разом з урядами країн та міжнародними природоохоронними організаціями потрібно знайти універсальне рішення трилеми блокчейну. Однозначно найкращим рішенням з точки зору зменшення споживання електроенергії та генерування шкідливих наслідків для довкілля було б впровадження proof of stake (PoS) механізму консенсусу, який не потребує обчислювальних потужностей для створення нових блоків мережі.

Впровадження у вересні 2022 року PoS механізму другою за величиною блокчейн мережею Ethereum, яка на піку споживала близько 94 ТВт-год, призвело до падіння споживання електроенергії на 99% і показало приклад можливого компромісного вирішення проблеми енергозатратності процесу. Але, на жаль, більшість учасників біткоїн спільноти не бажає вносити такі зміни в програмний код. Причиною цьому є і втрата великої економічної вигоди від інвестованих в обладнання ресурсів, і побоювання щодо зменшення рівня безпеки.

Якщо розглядати варіанти розв'язання проблеми поза межами блокчейн системи, то одним із дієвих методів може стати політика урядів країн спрямована на підвищення прозорості майнінгу криптовалют з розкриттям інформації щодо викидів спричинених діяльністю. Отримана інформація допоможе більш точно оцінити вплив на навколишнє середовище, а також розробити програми переходу майнерів на використання відновлювальних джерел енергії. Дана програма має бути комплексною і включати, з одного боку, податки на генерацію вуглецевого та водного сліду, а з

іншого, стимули в вигляді компенсації витрат на електроенергію майнерам при використанні відновлювальних джерел.

Дана політика повинна впроваджуватись одночасно у всіх країнах, які займають велику частку в загальному хешреїті мережі, оскільки визначальним фактором для географічного розміщення майнерів являється вартість електроенергії та відсутність регулятивних обмежень щодо даної економічної діяльності. За умови відсутності погодженої політики стосовно даного питання між країнами – майнери продовжать мігрувати з обчислювальним обладнанням в інші країни. Додатково з допомогою блокчейн технологій можна популяризувати серед користувачів використання зеленої енергетики, відображаючи частку використаної екологічно чистої енергії для видобутку кожного нового блоку.

Швидкі темпи розвитку блокчейн технологій та їх використання людством потребують всебічної оцінки наслідків впливу на навколишнє середовище, а також певних компромісів у вирішенні цих викликів. Оскільки проблема є міжнародною, потрібен комплексний підхід до її розв'язання та координації зусиль, який може бути організований, наприклад, на базі програми ООН з довкілля ЮНЕП. Світовій науковій спільноті потрібно об'єднатись задля проведення додаткових досліджень даного надважливого питання, а урядам країн почати невідкладно впроваджувати комплексі дії задля зменшення негативних наслідків для світової екології.

Список використаних джерел

1. Pagone Emanuele, Hart Alexandre, Salonitis Konstantinos. Carbon Footprint Comparison of Bitcoin and Conventional Currencies in a Life Cycle Analysis Perspective. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712300094X> (дата звернення: 04.10.2024).
2. Sarkodie Samuel Asumadu, Amani Mohammad Amin, Ahmed Maruf Yakubu, Owusu Phebe Asantewaa. Assessment of Bitcoin carbon footprint. September 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737823000147> (дата звернення: 04.10.2024).
3. Lei N., Masanet E., Koomey J. Best practices for analyzing the direct energy use of blockchain technology systems: Review and policy recommendations. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002925?> (дата звернення: 04.10.2024).
4. Vries de Alex. Bitcoin's growing water footprint. 2023. URL: [https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906\(23\)00004-6?](https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906(23)00004-6?) (дата звернення: 04.10.2024).
5. BitInfoCharts, Cryptocurrency statistics. URL: <https://bitinfocharts.com/bitcoin/> (дата звернення: 04.10.2024).
6. Ycharts, Bitcoin Total Transactions. URL: https://ycharts.com/indicators/bitcoin_total_transactions (дата звернення: 04.10.2024).
7. Nakamoto Satoshi. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (дата звернення: 04.10.2024).
8. Blockchain.com. Bitcoin Block 0. URL: <https://www.blockchain.com/explorer/blocks/btc/00000000019d6689c085ae165831e934ff763ae46a2a6c172b3f1b60a8ce26f> (дата звернення: 04.10.2024).
9. Back Adam. Hashcash – A Denial of Service Counter-Measure. 1st August 2002. URL: <http://www.cypherspace.org/hashcash/hashcash.pdf> (дата звернення: 04.10.2024).
10. BitInfoCharts. Bitcoin Hashrate historical chart. URL: <https://bitinfocharts.com/comparison/bitcoin-hashrate.html#alltime> (дата звернення: 04.10.2024).
11. Neumueller Alexander. Cambridge Centre for Alternative Finance. «Bitcoin electricity consumption: an improved assessment». 31 August 2023. URL: <https://www.jbs.cam.ac.uk/2023/bitcoin-electricity-consumption/> (дата звернення: 04.10.2024).
12. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). URL: <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci> (дата звернення: 04.10.2024).
13. Enerdata, Electricity domestic consumption. Breakdown by country (TWh). URL: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.htm> (дата звернення: 04.10.2024).
14. Coinmetrics. URL: <https://charts.coinmetrics.io/> (дата звернення: 04.10.2024).
15. Coin Dance. Bitcoin Search Volume (Google Trends) Summary. URL: <https://coin.dance/stats/bitcoin>

(дата звернення: 04.10.2024).

16. Global Times. «China to shut down over 90% of its Bitcoin mining capacity after local bans». June 20, 2021. URL: <https://www.globaltimes.cn/page/202106/1226598.shtml> (дата звернення: 04.10.2024).

17. The International Energy Agency (IEA). Sources of electricity generation. URL: <https://www.iea.org/world/electricity> (дата звернення: 04.10.2024).

18. Statista. Electricity generation worldwide from 1990 to 2023 (in terawatt-hours). URL: <https://www.statista.com/statistics/270281/electricity-generation-worldwide/> (дата звернення: 04.10.2024).

19. Ycharts. Bitcoin Total Transactions. URL: https://ycharts.com/indicators/bitcoin_total_transactions (дата звернення: 04.10.2024).

20. Statista. Bitcoin average energy consumption per transaction compared to that of VISA as of May 1, 2023. URL: <https://www.statista.com/statistics/881541/bitcoin-energy-consumption-transaction-comparison-visa/> (дата звернення: 04.10.2024).

21. Our World in Data. Total electricity demand per person. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-demand?tab=table> (дата звернення: 04.10.2024).

22. IMF BLOG. Carbon Emissions from AI and Crypto Are Surging and Tax Policy Can Help. URL: <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2024/08/15/carbon-emissions-from-ai-and-crypto-are-surging-and-tax-policy-can-help> (дата звернення: 04.10.2024).

23. UNU Press Release. UN Study Reveals the Hidden Environmental Impacts of Bitcoin: Carbon is Not the Only Harmful By-product. URL: <https://unu.edu/press-release/un-study-reveals-hidden-environmental-impacts-bitcoin-carbon-not-only-harmful-product> (дата звернення: 04.10.2024).

24. The Chain BulletinBitcoin. Mining Map. URL: <https://chainbulletin.com/bitcoin-mining-map/> (дата звернення: 04.10.2024).

25. Our World in Data. Electricity production by source. URL: <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?stackMode=relative&time=2020..latest&country=USA~CHN~KAZ~CAN~RUS> (дата звернення: 04.10.2024).

26. DigiConomist. Bitcoin Electronic Waste Monitor. URL: <https://digiconomist.net/bitcoin-electronic-waste-monitor/> (дата звернення: 04.10.2024).

27. Md Abu Bakar Siddik, Maria Amaya, Landon T. Marston. The water and carbon footprint of cryptocurrencies and conventional currencies. 20 July 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623014269> (дата звернення: 04.10.2024).

28. UNESCO. Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report 2023. URL: <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023> (дата звернення: 04.10.2024).

29. Statista. Number of cashless digital payment transactions worldwide from 2010 to 2023, with forecasts from 2024 to 2028. URL: <https://www.statista.com/statistics/265766/number-of-cashless-transactions-worldwide/> (дата звернення: 04.10.2024).

Статтю отримано: 12.10.2024 / Рецензування 02.12.2024 / Прийнято до друку: 30.12.2024

Anatolii Gutsuliak

Applicant for Higher Education PhD Degree
West Ukrainian National University
Ternopil, Ukraine

E-mail: moip_kaf@wunu.edu.ua

ORCID: 0009-0001-3295-0954

THE IMPACT OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES ON THE ENVIRONMENT AND THE ENVIRONMENTAL ASPECT OF PROOF-OF-WORK CONSENSUS

Abstract

Introduction. *The development of blockchain networks using the Proof-of-Work (PoW) consensus mechanism is accompanied by a significant environmental impact due to the high energy consumption of mining equipment. This poses serious challenges to achieving the goals of sustainable development and combating climate change. The results of the*

study can serve as a basis for the development of energy-efficient solutions and regulatory approaches aimed at reducing the environmental footprint of blockchain technologies.

Methods. General scientific research methods and special methods were used during the study, in particular: induction and deduction - at the stage of collecting primary data and analysing it, comparative (to compare the electricity consumption of the blockchain network and individual countries), abstract and logical - in the process of formulating conclusions, descriptive and analytical, creative and critical, graphical (to analyse the dynamics of the Bitcoin price, the network hash rate, the number of active addresses, and economic analysis).

Results. The dynamics of the Bitcoin blockchain network hashrate from 2017 to 2025 is studied in detail and periods of a sharp drop in total computing power are identified, as well as the main factors that led to this. The dynamics of energy consumption by the Bitcoin network is analysed and CO₂ emissions by different countries in 2024 are calculated depending on their share in the total hash rate of the network. The countries that produce less pollution per 1% of the network's hash rate are identified in comparison with others. The inefficiency of electricity consumption for the annual maintenance of active payment addresses and the need for urgent intervention by the international community to prevent significant environmental consequences are substantiated.

As a result of the conducted analysis of technical limitations of the proof-of-work (PoW) consensus mechanism, the existing problem of its high energy consumption is revealed. As a result of the made calculations of the carbon footprint generated by the process of mining new blockchain blocks in the countries with the largest share in the total hashrate, the author identifies and argues for the urgent need to create a coordinated intergovernmental policy to regulate and reduce environmental damage caused by mining activities.

Discussion. The main findings of the study contribute to the understanding of environmental risks of the Proof-of-Work (PoW) consensus mechanism and can be useful for environmental organizations at various levels. The calculations made on the energy consumption of the Bitcoin blockchain system can be used to substantiate the need for more transparent block mining and the transition to renewable energy sources. Given the growth in energy consumption and environmental threats, the study emphasizes the importance of a coordinated policy of the countries with the largest share in the hashrate to minimize the negative impact of mining. The results of the work can become the basis for further scientific research on the carbon and water footprint of mining as a type of economic activity.

Keywords: blockchain, carbon footprint, proof-of-work, hashrate, water footprint, blockchain trilemma, decentralization, scalability, mining.

References

1. Pagone, E., Hart, A. & Salonitis K. (2023). Carbon Footprint Comparison of Bitcoin and Conventional Currencies in a Life Cycle Analysis Perspective. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712300094X>.
2. Sarkodie, S.A., Amani, M.A., Ahmed, M.Y. & Owusu P.A. (2023). Assessment of Bitcoin carbon footprint, September. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772737823000147>.
3. Lei, N., Masanet, E., & Koomey, J. Best practices for analyzing the direct energy use of blockchain technology systems: Review and policy recommendations. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421521002925?>
4. Vries, de Alex. (2023). Bitcoin's growing water footprint. Retrieved from [https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906\(23\)00004-6?](https://www.cell.com/cell-reports-sustainability/fulltext/S2949-7906(23)00004-6?)
5. BitInfoCharts, Cryptocurrency statistics. Retrieved from <https://bitinfocharts.com/bitcoin/>.
6. Ycharts, Bitcoin Total Transactions. Retrieved from https://ycharts.com/indicators/bitcoin_total_transactions.
7. Nakamoto Satoshi (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. Retrieved from <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
8. Blockchain.com. Bitcoin Block 0. Retrieved from <https://www.blockchain.com/explorer/blocks/btc/00000000019d6689c085ae165831e934ff763ae46a2a6c172b3f1b60a8ce26f>.
9. Back Adam (2002). Hashcash – A Denial of Service Counter-Measure, 1st August. Retrieved from <http://www.cypherspace.org/hashcash/hashcash.pdf>.
10. BitInfoCharts. Bitcoin Hashrate historical chart. Retrieved from <https://bitinfocharts.com/comparison/bitcoin-hashrate.html#alltime>.
11. Neumueller Alexander (2023). Cambridge Centre for Alternative Finance. «Bitcoin electricity consumption: an improved assessment», 31 August. Retrieved from <https://www.jbs.cam.ac.uk/2023/bitcoin-electricity-consumption/>.
12. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI). Retrieved from <https://ccaf.io/cbnsi/cbeci>.

13. Enerdata, Electricity domestic consumption. Breakdown by country (TWh). Retrieved from <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.htm>.
14. Coinmetrics. Retrieved from <https://charts.coinmetrics.io/>
15. Coin Dance.Bitcoin Search Volume (Google Trends) Summary. Retrieved from <https://coin.dance/stats/bitcoin>.
16. Global Times. «China to shut down over 90% of its Bitcoin mining capacity after local bans». (2021). June 20. Retrieved from <https://www.globaltimes.cn/page/202106/1226598.shtml>.
17. The International Energy Agency (IEA). Sources of electricity generation. Retrieved from <https://www.iea.org/world/electricity>.
18. Statista. Electricity generation worldwide from 1990 to 2023 (in terawatt-hours). Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/270281/electricity-generation-worldwide/>.
19. Ycharts. Bitcoin Total Transactions. Retrieved from https://ycharts.com/indicators/bitcoin_total_transactions.
20. Statista. Bitcoin average energy consumption per transaction compared to that of VISA as of May 1. (2023). Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/881541/bitcoin-energy-consumption-transaction-comparison-visa/>.
21. Our World in Data. Total electricity demand per person. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-electricity-demand?tab=table>.
22. IMF BLOG. Carbon Emissions from AI and Crypto Are Surging and Tax Policy Can Help. Retrieved from <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2024/08/15/carbon-emissions-from-ai-and-crypto-are-surging-and-tax-policy-can-help>.
23. UNU Press Release. UN Study Reveals the Hidden Environmental Impacts of Bitcoin: Carbon is Not the Only Harmful By-product. Retrieved from <https://unu.edu/press-release/un-study-reveals-hidden-environmental-impacts-bitcoin-carbon-not-only-harmful-product>.
24. The Chain BulletinBitcoin. Mining Map. Retrieved from <https://chainbulletin.com/bitcoin-mining-map/>.
25. Our World in Data. Electricity production by source. Retrieved from <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked?stackMode=relative&time=2020..latest&country=USA~CHN~KAZ~CAN~RUS>.
26. DigiConomist. Bitcoin Electronic Waste Monitor. Retrieved from <https://digiconomist.net/bitcoin-electronic-waste-monitor/>.
27. Md, Abu Bakar Siddik, Amaya, M., & Landon, T. Marston. (2023). The water and carbon footprint of cryptocurrencies and conventional currencies, 20 July. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623014269>.
28. UNESCO (2023). Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report. Retrieved from <https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>.
29. Statista. Number of cashless digital payment transactions worldwide from 2010 to 2023, with forecasts from 2024 to 2028. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/265766/number-of-cashless-transactions-worldwide/>.

Received: 10.12.2024 / Review 12.02.2024 / Accepted 12.30.2024

