

ФІНАНСИ, БАНКІВСЬКА СПРАВА ТА СТРАХУВАННЯ

УДК 330.4:316.622:[004:336.74]

DOI: 10.26565/2311-2379-2019-97-07

К.Ю. Кононова, А.О. Дек

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: kateryna.kononova@karazin.ua, dek@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6990-5746>, <https://orcid.org/0000-0002-8336-6336>

ВУГЛЕЦЕВИЙ СЛІД МАЙНІНГУ БІТКОІНА

Теоретичні рамки дослідження охоплюють питання становлення та розвитку криптоекономіки, її впливу на навколишнє середовище. Термін криптоекономіка використовується для позначення нової галузі, що розвивається навколо криптовалют і блокчейна. Майнінг криптовалют споживає багато електроенергії. Станом на вересень 2019 року, оцінка річного споживання електроенергії мережею майнерів біткоїна склала 78,93 ТВт * год (при ціні на електроенергію в 0,05 долара США). Ця модель була використана для створення веб-сервісу Cambridge Bitcoin Electricity Index. Якщо припустити, що електроенергія для майнінгу генерується виключно на вугільних електростанціях, то знаючи споживання електроенергії майнерами біткоїна, можна оцінити викиди діоксиду вуглецю по верхній межі. В цьому випадку, викиди вуглекислого газу становлять 80,43 мільйонів тон CO₂, що відповідає 0,24% загальних викидів в світі. Метою роботи є моделювання викидів діоксиду вуглецю, що спричиняється майнінгом біткоїна з урахуванням регіонального розподілу майнерів та джерел електроенергії, що використовується для видобутку біткоїна. Для її досягнення в роботі було поставлені наступні завдання: 1) формування обґрунтованого списку майнінг-пулів; 2) уточнення географічного розподілу майнерів; 3) оцінка розподілу майнінгових потужностей по регіонах; 4) визначення показників забруднення повітря при електрогенерації по регіонах. Відповідно до запропонованого методу оцінки географічного розподілу майнінгу по трафіку веб-сторінок майнінгових пулів, викиди діоксиду вуглецю складають 44,12 мільйонів тон на рік (0,13% від світових викидів), що в два рази нижче оцінки за верхньою межею. Проблема збільшення споживання електроенергії мережею майнерів біткоїна та інших криптовалют і відповідний вплив на довкілля слід обговорювати з законодавцями, учасниками галузі та широкою громадськістю.

Ключові слова: біткоїн, криптовалюти, майнінг, споживання електроенергії майнінгом біткоїна.

JEL Classification: C13, C82, O33, Q53.

Kateryna Kononova, Anton Dek

V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

E-mail: kateryna.kononova@karazin.ua, dek@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6990-5746>, <https://orcid.org/0000-0002-8336-6336>

BITCOIN MINING CARBON FOOTPRINT

The theoretical framework of the study covers the formation and development of cryptoeconomics, as well as its impact on the environment. The term cryptoeconomics is used to refer to a new industry, which develops around cryptocurrencies and blockchain. Cryptocurrency mining consumes a lot of electricity. As of September 2019, the estimated annual electricity consumption was 78.93 TWh (with an electricity price of 0.05 USD). This model was used to create the Cambridge Bitcoin Electricity Index web service. If we assume that electricity for mining is generated at coal-fired power plants only, then knowing the energy consumption of bitcoin miners, we can estimate carbon dioxide emissions at the upper boundary. In this case, carbon dioxide emissions are about 80.43 million tons of CO₂, which corresponds to 0.24% of the total emissions in the world. The aim of this work is to simulate carbon dioxide emissions caused by bitcoin mining, taking into account the regional distribution of miners and various sources of electricity that are used for mining. To achieve it, the following tasks were set: 1) the formation of a reasonable list of mining pools; 2) clarification of the geographical distribution of miners; 3) assessment of the distribution of mining capacities by region; 4) evaluation of air pollution by regions. The problem of increasing electricity consumption by the network of bitcoin (and other cryptocurrencies) miners and the corresponding environmental impact should be discussed with policymakers, industry participants and the

general public. According to the proposed method for assessing the geographical distribution of mining using the traffic of mining pools web pages, carbon dioxide emissions is about 44.12 million tons per year (0.13% of global emissions), which is two times lower than the upper boundary estimate.

Keywords: bitcoin, cryptocurrencies, mining, carbon footprint of bitcoin mining.

JEL Classification: C13, C82, O33, Q53.

Е.Ю. Кононова, А.О. Дек

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

E-mail: kateryna.kononova@karazin.ua, dek@karazin.ua

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6990-5746>, <https://orcid.org/0000-0002-8336-6336>

УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД МАЙНИНГА БИТКОИНА

Теоретические рамки исследования охватывают вопросы становления и развития криптоэкономики, ее воздействия на окружающую среду. Термин криптоэкономика используется для обозначения новой отрасли, развивающейся вокруг криптовалют и блокчейна. Майнинг криптовалют потребляет много электроэнергии. По состоянию на сентябрь 2019 года, оценка годового потребления электроэнергии составила 78,93 ТВт * ч (при цене на электроэнергию в 0,05 доллара США). Эта модель была использована для создания веб-сервиса Cambridge Bitcoin Electricity Index. Если предположить, что электроэнергия для майнинга генерируется исключительно на угольных электростанциях, то зная потребление электроэнергии майнерами биткоина, можно оценить выбросы диоксида углерода по верхней границе. В этом случае, выбросы углекислого газа составляют 80,43 миллионов тонн CO₂, что соответствует 0,24% общих выбросов в мире. Целью данной работы является моделирование выбросов диоксида углерода, вызванных майнингом биткоина с учетом регионального распределения майнеров и различных источников электроэнергии, которая используется для майнинга. Для ее достижения в работе были поставлены следующие задачи: 1) формирование обоснованного списка майнинг-пулов; 2) уточнение географического распределения майнеров; 3) оценка распределения майнинговых мощностей по регионам; 4) определение показателей загрязнения воздуха при электрогенерации по регионам. Согласно предложенному методу оценки географического распределения майнинга по трафику веб-страниц майнинговых пулов, выбросы диоксида углерода составляют 44,12 миллионов тонн в год (0,13% от мировых выбросов), что в два раза ниже оценки по верхней границе. Проблему увеличения потребления электроэнергии сетью майнеров биткоина и других криптовалют и соответствующее влияние на окружающую среду следует обсуждать с законодателями, участниками отрасли и широкой общественностью.

Ключевые слова: биткоин, криптовалюты, майнинг, потребление электроэнергии майнингом биткоина.

JEL Classification: C13, C82, O33, Q53.

Актуальність дослідження. У 2018 році Кембриджським центром альтернативних фінансів було проведено дослідження показників ефективності майнінгових центрів. Згідно з опитуванням серед майнерів з різних регіонів, в якому взяли участь 22 компанії та 35 індивідуальних гравці, показники розподілилися таким чином (табл. 1).

Таблиця 1

Показники ефективності майнінгових центрів

1 - не важливо взагалі, 2 - не важливо, 3 - нейтрально, 4 - дещо важливо, 5 - дуже важливо		
Показник	Маленькі майнери*	Великі майнери
Легкий доступ до електропостачання	4.37	4.88
Низька вартість електроенергії	4.47	4.88
Дружнє регуляторне середовище	4.37	4.75
Стабільне політичне становище	4.37	4.63
Якісне підключення до інтернету	4.32	4.38
Холодний клімат	3.11	4.25
Спеціальні стимули для майнінгової діяльності	3.95	4.13
Наявність кваліфікованої робочої сили	3.32	3.75
Дешева земля	3.58	3.75
Низький рівень злочинності	3.63	3.38

* маленькі майнери – ті, що мають менше 40 працівників

Джерело: 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Cambridge Centre for Alternative Finance.

Як свідчить табл. 1, найважливішим для майнерів показником є доступність електроенергії та її ціна. Це обумовлено тим, що майнінг споживає дуже багато електроенергії. Якщо припустити, що електроенергія для майнінгу біткоїна генерується виключно на найбільш брудних вугільних електростанціях, то знаючи споживання електроенергії майнінгом біткоїна, можна оцінити викиди діоксиду вуглецю за верхньою межею:

$$m_{CO_2} = \varphi * E_{estimated},$$

де m_{CO_2} – маса викидів діоксиду вуглецю, кг;

φ – показник забруднення повітря при електрогенерації, $кг/кВт*год$;

$E_{estimated}$ – оцінка річного споживання електроенергії, $кВт*год$.

Показники забруднення повітря для вугільних електростанцій різняться від типу вугілля та обладнання, але більшість джерел оцінюють цей коефіцієнт біля 1 кг CO_2 / $кВт*год$ (UK Parliamentary Office of Science and Technology, 2011), (United States Environmental Protection Agency, 2010), (Raghuvanshi et al, 2006). За даними Кембріджського індексу споживання електроенергії біткоїном (Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index, 2019), станом на вересень 2019 енергоспоживання складає $E_{estimated} = 78.93$ ТВт*год на рік.

Згідно з Додатком А до «IEA World Energy Outlook 2017 Annex A Tables for Scenario Projections», середньосвітовий коефіцієнт 1.019 кг CO_2 / $кВт*год$ (табл. 2).

Таблиця 2

Показники забруднення повітря по регіонах та по типах палива, що використовується для електрогенерації

Регіон	Середнє	Вугілля	Нафтопродукти	Природний газ
Світ	0.554	1.019	0.854	0.514
Північна Америка	0.42	0.935	0.774	0.42
США	0.458	0.932	0.751	0.414
Цент. та Півд. Америка	0.245	1.098	0.683	0.487
Бразилія	0.157	1.257	0.685	0.459
Європа	0.361	1.026	0.873	0.491
ЄС	0.351	1.021	0.844	0.461
Африка	0.625	1.077	0.832	0.47
ПАР	0.99	1.068	0.764	-
Середній Схід	0.67	3.653	0.941	0.557
Євразія	0.727	1.479	3.214	0.895
Росія	0.75	1.716	4.061	0.932
Азіат.-Тихоокеан.	0.694	1.018	0.778	0.45
Китай	0.747	1.038	2.468	0.501
Індія	0.77	0.969	1.062	0.47
Японія	0.536	0.918	0.626	0.429
Півд.-Сх. Азія	0.6	1.045	0.789	0.456
ОЕСР	0.417	0.965	0.744	0.425
Non-ОЕСР	0.664	1.047	0.892	0.607

Джерело: Додаток А до «IEA World Energy Outlook 2017»

Отже, загальні викиди вуглекислого газу складають у такому разі 80.43 мільйонів тон CO_2 , що відповідає 0.24% загальних викидів у світі. Це викликає занепокоєння, тому що зростаюче споживання електроенергії може становити загрозу досягненню цілей сталого розвитку ООН.

Але важливо розуміти, що споживання енергії не обов'язково еквівалентно викидам вуглекислого газу та забрудненню навколишнього середовища. Наприклад, одна кіловатгодина ($кВт*год$) електроенергії, вироблена електростанцією, що працює на вугіллі, має істотно інший екологічний слід, ніж одна $кВт*год$ електроенергії, виробленої сонячним парком. Нещодавні дослідження показали, що частка відновлюваної енергії, що використовується майнерами, зростає в загальній структурі енергогенерації. Однак оцінки значно різняться, коливаючись від 20% (Cambridge Centre for Alternative Finance, 2018) від загальної кількості до понад 70% (Coinshares, 2019). Тому виникає актуальне питання щодо уточнення джерел електроенергії, що використовується для видобутку біткоїна. Вирішенню цієї задачі сприяє аналіз регіонального розподілу майнерів.

Огляд існуючих моделей. Оцінку вуглецевого сліду, викликаного майнінгом біткоїну, зроблено в роботах (Foteinis, 2018), (Krause & Tolaymat, 2018), (McCook, 2018), (Mora et al., 2018), (Stoll et al., 2019), (Vires, 2019). З огляду на актуальність географічного розподілу майнерів, (Stoll et al., 2019) пропонує враховувати:

- результати пошуку майнінгового обладнання за допомогою пошукової системи для Інтернету речей shodan.io;
- статистику IP-адрес вузлів, що транслюють останній знайдений блок, що надається оглядачем блоків blockcypher.com;
- статистику використання різних регіональних вузлів майнерами, яку публікують на своїх сайтах 2 майнінгових пули – slushpool та btc.com.

Щодо першого показника, оскільки shodan.io надає інформацію про занадто малу кількість пристроїв (~ 1000), це не є надійним джерелом інформації. Другий показник також не дає достовірної інформації через децентралізований дизайн мережі біткоїна. Крім того, аналіз даних blockcypher показав, що більше 70% IP-адрес надходять із серверів Amazon, що швидше характеризує серверну частину сервісу blockcypher, ніж реальний розподіл майнерів. Аналіз інформації, що публікується на сторінках Slushpool та btc.com, був обраний авторами як найбільш достовірний, але ці сервіси повідомляють лише про узагальнену статистику по регіонах (наприклад, «Китай» та «Північна Америка»). В цілому, хоча метод аналізу географічного розподілу майнерів через дослідження статистики використання майнінг-пулів показав свою ефективність, є необхідність у подальшому вдосконаленні методики.

Метою роботи є моделювання викидів діоксиду вуглецю, що спричиняється майнінгом біткоїна з урахуванням регіонального розподілу майнерів та джерел електроенергії, що використовується для видобутку біткоїна. Для її досягнення в роботі було поставлені наступні завдання: 1) формування обґрунтованого списку майнінг-пулів; 2) уточнення географічного розподілу майнерів; 3) оцінка розподілу майнінгових потужностей по регіонах; 4) визначення показників забруднення повітря при електрогенерації по регіонах.

Основні результати дослідження.

Модель на основі географічного розподілу майнерів. Запропонований підхід ґрунтується на аналізі розподілу трафіку в Інтернеті на сторінках входу до особистих кабінетів майнінг-пулів. Припускається, що майнери з різних регіонів використовують ці сторінки для того, щоб увійти до свого акаунта однаково в різних місцях по всьому світу та що системи вимірювання трафіку в Інтернеті визначають реальне місцезположення тих, хто використовує VPN, проксі-сервери та інші інструменти, які дозволяють приховувати та підробляти місцезнаходження.

Для отримання регіонального розподілу майнерів були використані консенсус-оцінки трьох різних сервісів вимірювання інтернет-трафіку: SimilarWeb², Alexa³, SemRush⁴. Наступні сторінки було проаналізовано (табл. 3).

Таблиця 3

Веб-сторінки майнінг-пулів, що було включено до розгляду

Позначення	Веб-сторінка	Частка у глобальному хешреїті станом на вересень 2019
[btc]	pool.btc.com	19.43%
[ant]	antpool.com	12.47%
[f2p]	f2pool.com	11.81%
[poo]	poolin.com	9.82%
[slu]	slushpool.com	9.36%
[top]	btc.top	7.77%
[via]	pool.viabtc.com	7.61%
[clu]	bitclubpool.com	1.74%
	Всього	80.01%

Джерело: btc.com⁵

² <https://www.similarweb.com>
³ <https://www.alexa.com/siteinfo>
⁴ <https://www.semrush.com>
⁵ <https://btc.com/stats/pool>

В результаті аналізу деякі з топ-10 пулів були виключені, а саме, BitFury через те, що це приватний майнінг, тому трафік веб-сторінки не є репрезентативним та Huobi через маленький трафік сторінки відносно інших топ-10. Пули, що було розглянуто детальніше, разом склали 80% глобального хешрейту у вересні 2019 р. У табл. 4 наведено приклад вихідних даних для slushpool.com.

Таблиця 4

Аналіз трафіку для slushpool.com, 9.36%

Region	За даними Similarweb	За даними Semrush	Консенсус-оцінка по регіонах
C&S America	7.91%	8.76%	10.45%
China		0.37%	0.20%
EU	17.56%	14.92%	20.74%
Eurasia		8.92%	4.83%
Europe	3.54%	8.72%	7.27%
North America	4.48%	3.17%	4.95%
Middle East	4.67%	2.23%	4.58%
Russia	11.65%	11.52%	14.64%
Southeast Asia		0.36%	0.19%
U.S.	19.51%	31.70%	31.23%
other OECD		1.07%	0.58%
South Africa		0.66%	0.36%

Джерела: Semrush⁶, Similarweb⁷, власні розрахунки

Для деяких майнінг-пулів, по яких була додаткова інформація, проводилось корегування оцінок, отриманих запропонованим способом за трафіком, на основі даних, що публікуються пулом. Так slushpool публікує інформацію до яких регіональних серверів підключені ті чи інші клієнти. Крім цього, деяким майнерам недоступна їх країна чи регіон серед множини серверів компанії, тож їм доводиться вирішувати, до якого з найближчих центрів приєднатися. (Stoll et al, 2019) наводить агреговану статистику зі сторінки Slushpool⁸ по чотирьох макрорегіонах: CN (Китай), EU (Європа), US/CA (США та Канада), JP/SG (Японія та Сингапур). Зробивши припущення щодо розподілу отриманих раніше регіонів по макрорегіонах, можна зробити крос-перевірку та скорегувати дані по регіонах (табл. 5).

Таблиця 5

Крос-перевірка результатів географічного розподілу майнерів, отриманих за різними методиками

Region	Частка (за трафіком)	Скоригована частка
Ц. і П. Америка	10.45%	12.73%
Китай	0.20%	0.10%
ЄС	20.74%	16.65%
Євразія	4.83%	3.12%
Європа	7.27%	5.84%
Півн. Америка	4.95%	6.03%
Середній Схід	4.58%	3.67%
Росія	14.64%	11.75%
П.-Сх. Азія	0.19%	0.45%
США	31.23%	38.04%
ОЕСР	0.58%	1.33%
ПАР	0.36%	0.29%

Джерела: Semrush, Similarweb, International Energy Agency, власні розрахунки

⁶ www.semrush.com

⁷ www.similarweb.com

⁸ slushpool.com/stats/?c=btс

З урахуванням скоригованих даних для btc.com та slushpool, результуюча статистика виглядає таким чином (табл. 6).

Таблиця 6

Результуючий розподіл майнінгових потужностей по регіонах

Регіон / пул	[btc]	[ant]	[f2p]	[poo]	[slu]	[top]	[via]	[clu]	Всього
Африка	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.0%	0.0%	0.0%	0.8%
Бразилія	2.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.1%	3.2%	0.0%	0.9%
Ц. і П. Америка	3.8%	7.8%	1.3%	0.0%	12.7%	2.8%	2.2%	0.0%	4.3%
Китай	14.9%	17.7%	31.8%	22.2%	0.1%	35.6%	7.9%	0.0%	18.0%
ЄС	5.6%	11.8%	5.7%	2.5%	16.7%	19.1%	13.4%	51.6%	10.5%
Євразія (інші)	0.0%	3.2%	1.6%	0.0%	3.1%	5.2%	0.0%	0.0%	1.6%
Європа (інші)	7.9%	8.9%	6.6%	6.0%	5.8%	0.0%	9.2%	4.2%	6.7%
Індія	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.4%	0.0%	0.0%	0.2%
Японія	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.2%	0.1%
Середній Схід	23.1%	6.3%	2.1%	22.1%	3.7%	2.1%	7.1%	0.0%	10.9%
Півн. Америка	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.0%	0.9%	0.0%	0.0%	0.8%
ОЕСР (інші)	0.0%	0.0%	1.4%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%	2.8%	0.4%
Росія	40.7%	27.3%	28.9%	18.1%	11.8%	15.2%	29.5%	6.7%	26.4%
ПАР	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.3%	0.0%	0.0%	10.3%	0.3%
П.-Сх. Азія	0.0%	1.5%	4.0%	20.4%	0.4%	1.9%	7.0%	17.7%	4.6%
США	1.9%	15.5%	16.5%	8.7%	38.0%	5.8%	20.6%	1.5%	13.4%

Джерело: власні розрахунки

Отримані статистичні дані про географічний розподіл майнерів було використано для визначення середнього показнику забруднення повітря при електрогенерації (табл. 7) з застосуванням таблиці з Додатку А до «IEA World Energy Outlook 2017» (International Energy Agency, 2017).

Таблиця 7

Показники забруднення повітря при електрогенерації по регіонах

Регіон	Коефіцієнт забруднення, кг CO ₂ /кВт*год	Енергоспоживання майнінгом, кВт*год на рік	Викиди CO ₂ на рік, кг
Африка	0.625	616648925	385405578
Бразилія	0.157	749448315	117663385
Ц. і П. Америка	0.245	3377047232	827376572
Китай	0.55 *	14209298675	7815114271
ЄС	0.351	8318688257	2919859578
Євразія (інші)	0.727	1255237418	912557603
Європа (інші)	0.361	5268628795	1901974995
Індія	0.77	187123877	144085385
Японія	0.536	88999557	47703763
Середній Схід	0.67	8620282467	5775589253
Півн. Америка	0.42	625946053	262897342
ОЕСР (інші)	0.417	336254977	140218325
Росія	0.75	20860389905	15645292429
ПАР	0.99	204038381	201997997
П.-Сх. Азія	0.6	3643652487	2186191492
США	0.458	10568333847	4840296902
		78.93 ТВт*год на рік	44.12 мільйонів тон на рік

* значення для Китаю було скориговано в сторону зменшення через велику частку гідроенергії, що використовується для майнінгу в провінції Сичуань (Stoll et al, 2019).

Джерело: власні розрахунки

Висновки та дискусія. Згідно із запропонованим методом оцінки географічного розподілу майнерів по трафіку веб-сторінок майнінгових пулів, з урахуванням оцінки річного споживання електроенергії на рівні 78.93 ТВт*год на рік, викиди діоксиду вуглецю складають 44.12

мільйонів тонн на рік, що складає 0.13% загальних викидів у світі (British Petroleum, 2018), що значно нижче оцінки за верхньою межею.

Недоліком запропонованого підходу є те, що він завищує частку регіонів з більшою концентрацією майнерів меншого масштабу (які генерують більше трафіку веб-сайтів майнінгових пулів) та недооцінює частку регіонів, де переважає майнінг у більших масштабах.

Отримання даних про географічний розподіл майнерів безпосередньо від майнінг-пулів вирішило б це питання. Наразі робота в цьому напрямку триває.

Отримані в роботі оцінки споживання електроенергії та викидів діоксиду вуглецю приблизно в два рази вищі, ніж результати оцінки (Stoll et al, 2019), що частково пояснюється істотним збільшенням хешрейту мережі біткоїн з моменту публікації їхнього дослідження (більш ніж в два рази з січня 2019 до вересня 2019).

Розглядаючи коефіцієнти забруднення внаслідок генерації електроенергії слід зазначити, що великі майнери знаходяться у постійних пошуках дешевої електроенергії по всьому світові. Такою електроенергією, як правило, є надлишкова гідроенергія, що виникає у деяких регіонах світу під час повеней. Цей факт може означати менший середній коефіцієнт забруднення атмосфери внаслідок генерації електроенергії для майнінгу та, відповідно, меншу кількість викидів вуглекислого газу. Але з іншого боку, до набираючих популярність серед майнерів регіонів належать країни з переважаючим виробництвом електроенергії з викопного палива, такі як Казахстан та Іран.

Проблему збільшення споживання електроенергії мережею біткоїн та інших криптовалют і відповідний вплив на довкілля слід обговорювати з законодавцями, учасниками галузі та широкою громадськістю. Навколо цієї теми багато помилкових суджень та спекуляцій. Щоб зробити можливим масове прийняття криптовалюти, з боку галузі можна очікувати заходів щодо сталого масштабування мережі.

Література

1. Rauchs M., Blandin A., Klein K., Pieters G., Recanatini M., Zhang B. 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Cambridge Centre for Alternative Finance. 2018. URL: https://www.ibs.cam.ac.uk/fileadmin/user_upload/research/centres/alternative-finance/downloads/2018-12-ccaf-2nd-global-cryptoasset-benchmarking.pdf.
2. Carbon Footprint of Electricity Generation. The Houses of Parliament (United Kingdom), Parliamentary Office of Science and Technology. 2011. No. 383. 2011. P. 4. URL : https://www.parliament.uk/documents/post/postpn_383-carbon-footprint-electricity-generation.pdf.
3. Electricity from Coal / United States Environmental Protection Agency. URL : <https://web.archive.org/web/20100511013713/http://www.epa.gov/cleanrgy/energy-and-you/affect/coal.html>.
4. Raghuvanshi S. P., Chandra A., Raghav A.K. Carbon Dioxide Emissions from Coal Based Power Generation in India // *Energy Conversion and Management*. 2006. Vol. 47, Issue 4. P. 427–441. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890405001214>.
5. Rauchs M., Blandin A., Dek A. 2019. Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. URL : <https://cbeeci.org/>.
6. The Bitcoin Mining Network / Coinshares. 2019. URL: <https://coinshares.co.uk/wp-content/uploads/2019/06/MiningWhitepaperJun2019FinalForeword.pdf>.
7. Foteinis S. Bitcoin's Alarming Carbon Footprint. *Nature*. 2018. Vol. 554 (7691), 169. URL : <https://www.nature.com/articles/d41586-018-01625-x>.
8. Krause M. J. Tolaymat T. Quantification of Energy and Carbon Costs for Mining Cryptocurrencies. *Nature Sustainability*. 2018. Vol. 1. P. 711–718. URL : <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0152-7.pdf>.
9. McCook H. The Cost & Sustainability of Bitcoin. URL: https://www.academia.edu/37178295/The_Cost_and_Sustainability_of_Bitcoin_August_2018.
10. Mora C., Rollins R.L., Taladay K., Kantar M.B., Chock M.K., Shimada M., Franklin E.C. Bitcoin Emissions Alone Could Push Global Warming Above 2°C. *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 931–933. URL : <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0321-8.pdf>.
11. British Petroleum Statistical Review of World Energy 2018. British Petroleum Report: 67th edition. 2018. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.

12. Stoll C., Klaaßen L., Gallersdörfer U. The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*. 2019. Vol. 3, Issue 7. P. 1647–1661. URL : <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2542-4351%2819%2930255-7>.
13. Vires A. Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem. *Joule*. 2019. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.007>.
14. Vries A. Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*. 2018. Vol. 2, Issue 5. P. 801–805.
15. World Energy Outlook 2017. International Energy Agency. 2017. URL : <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>.

References

1. Rauchs, M., Blandin, A., Klein, K., Pieters, G., Recanatini, M., Zhang, B. (2018). 2nd Global Cryptoasset Benchmarking Study. Cambridge Centre for Alternative Finance. Retrieved from https://www.jbs.cam.ac.uk/fileadmin/user_upload/research/centres/alternative-finance/downloads/2018-12-ccaf-2nd-global-cryptoasset-benchmarking.pdf.
2. The Houses of Parliament (United Kingdom), Parliamentary Office of Science and Technology (2011). Carbon Footprint of Electricity Generation, 383, 4. Retrieved from https://www.parliament.uk/documents/post/postpn_383-carbon-footprint-electricity-generation.pdf.
3. United States Environmental Protection Agency (2019). Electricity from Coal. Retrieved from <http://www.epa.gov/cleanrgy/energy-and-you/affect/coal.html>.
4. Raghuvanshi, S. P., Chandra, A., Raghav, A.K. (2006). Carbon Dioxide Emissions from Coal Based Power Generation in India. *Energy Conversion and Management*, 47, 4, 427-441. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890405001214>.
5. Rauchs, M., Blandin, A., Dek, A. (2019). Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index. Retrieved from <https://cbeci.org/>.
6. Coinshares. The Bitcoin Mining Network. (2019). Retrieved from <https://coinshares.co.uk/wp-content/uploads/2019/06/MiningWhitepaperJun2019FinalForeword.pdf>.
7. Foteinis, S. (2018). Bitcoin's Alarming Carbon Footprint. *Nature*, 554 (7691), 169. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/d41586-018-01625-x>.
8. Krause, M. J., Tolaymat, T. (2018). Quantification of Energy and Carbon Costs for Mining Cryptocurrencies. *Nature Sustainability*, 1, 711-718. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41893-018-0152-7.pdf>.
9. McCook, H. (2018). The Cost & Sustainability of Bitcoin. Retrieved from https://www.academia.edu/37178295/The_Cost_and_Sustainability_of_Bitcoin_August_2018.
10. Mora, C., Rollins R.L., Taladay, K., Kantar, M.B., Chock, M.K., Shimada, M., Franklin, E.C. (2018). Bitcoin Emissions Alone Could Push Global Warming Above 2°C. *Nature Climate Change*, 8, 931-933. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41558-018-0321-8.pdf>.
11. British Petroleum (2018). Statistical Review of World Energy 2018. British Petroleum Report: 67th edition. Retrieved from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
12. Stoll, C., Klaaßen, L., Gallersdörfer, U. (2019). The Carbon Footprint of Bitcoin. *Joule*, 3, 7, 1647-1661. Retrieved from <https://www.cell.com/action/showPdf?pii=S2542-4351%2819%2930255-7>.
13. Vires, A. (2019). Renewable Energy Will Not Solve Bitcoin's Sustainability Problem *Joule*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.007>.
14. Vries, A. (2018) Bitcoin's Growing Energy Problem. *Joule*, 2, 5, 801-805.
15. International Energy Agency (2017). World Energy Outlook. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>.