

Александра Девлін

д-р інженерних наук

e-mail: allidevlin113@hotmail.com,

Факультет інженерних наук

Оксфордський університет, Оксфорд, Великобританія,

Влад Михненко

д-р політекономії, проф.

Академічний директор (Суспільні науки)

ORCID 0000-0001-8944-0608

e-mail: vlad.mykhnenko@conted.ox.ac.uk,

Відділ безперервної освіти

Оксфордський університет, Оксфорд, Великобританія,

Анастасія Загоруйчик

ORCID 0009-0009-3950-2810

e-mail: a.o.zagoruichyk@gmail.com,

Школа підприємництва та навколишнього середовища імені Сміта

Оксфордський університет, Оксфорд, Великобританія,

Ніколас Салмон

д-р інженерних наук

ORCID 0000-0002-1989-3393,

Факультет інженерних наук

Оксфордський університет, Оксфорд, Великобританія,

Мирослава Солдак

канд. екон. наук, с.н.с.

ORCID 0000-0002-4762-3083

e-mail: Soldak@nas.gov.ua,

Інститут економіки промисловості НАН України,

м. Київ, Україна

ЗЕЛЕНА МЕТАЛУРГІЯ ПОВОЄННОЇ УКРАЇНИ¹

Подяка:

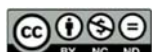
Автори висловлюють подяку Фонду «Меліор» за фінансування цього дослідження. Однак, слід визнати, що відповідальність за інформацію та погляди, викладені в цій статті, лежить виключно на авторах. Фонд «Меліор» не несе відповідальності за будь-яке використання інформації, що міститься або висловлена в цій статті. Автори також щиро дякують усім учасникам семінарів зі зворотного зв'язку з зацікавленими сторонами металургічної галузі, що були проведені в липні 2023 року, особливо Костянтиніві Головку і Володимирові Шатосі, за детальні поради. Також висловлюємо подяку Кетрін Коваль за допомогу, надану на етапі редагування, та фінансову підтримку, надану Александрі Девлін під час її докторського навчання Фондом герала сера Джона Монаша.

1. Вступ

24 лютого 2022 року Росія вторглася в Україну, що стало ескалацією існуючої російсько-української війни, яка почалася в 2014 році з анексії Криму [8; 31].

Металургійна промисловість України серйозно постраждала від російського вторгнення через прицільні атаки по промисловим об'єктам та транспортним шляхам, а також через захоплення мінеральних ресурсів на

¹ Авторизований переклад з англійської мови статті "Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine", яка була надрукована в журналі *Journal of Cleaner Production*, 2024, Vol. 466, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142675>, згідно з ліцензією Creative Commons CC BY 4.0.



Донбасі та Чорноморсько-Азовському регіоні на півдні [70]. Незважаючи на те, що війна досі триває, українська влада розробляє плани післявоєнної відбудови країни з метою відновлення стабільності та стимулювання економічного зростання шляхом залучення інвестицій [54]. Відбудова металургійного сектору країни може включати перехід до майже нульових викидів. Цей шлях відновлення потенційно може бути економічно конкурентоспроможним за умови правильного часу інвестування та вибору технологій.

Експортно-орієнтована металургійна промисловість України має фундаментальне значення для національної економіки. Металургійний сектор залишається другим за величиною роботодавцем у переробній промисловості, а середньомісячна номінальна заробітна плата в цьому секторі на 15% вища за середню по країні [22]. У 2021 році, на металургійний сектор (включаючи галузі «Основні метали» та «Готові металеві вироби») припадало 2,3% валового внутрішнього продукту (ВВП) України та 14,5% усього промислового виробництва України. При цьому, у тому ж році, металургійні компанії експортували товару категорії «основні метали» на суму \$16 млрд, сплативши \$3,5 млрд податків до державного бюджету.

Проте, українська металургія є доволі енергомісткою та значною мірою залежить від викопних видів палива. Через це, металургія в Україні відповідальна за левову частку парникових газів. Виробництво 20,6 млн тонн необробленої сталі у 2020 році спричинило викиди 48 млн тонн діоксиду вуглецю (CO_2), що еквівалентно 15% загальнонаціональних викидів (318 млн тонн CO_2) [66]. У середньому, на тонну сталі в Україні припадає 2,3 тонни CO_2 (CO_2 /т сталі) – найгірший показник серед 17 досліджуваних країн/регіонів [46]. Металургія в значній мірі працює з використанням доменних печей (BF), а також триває використання застарілих мартенівських печей (OHF), які поступово замінюються більш ефективними кисневими конвертерами (BOF). Із загального доведеного виробництва сталі в Україні, 76% припадало на доменну піч з кисневим конвертером (BF-BOF), 19% – на доменну піч з мартенівською піччю (BF-OHF) і 6% – на електродугову піч (EAF) [104]. Середня інтенсивність викидів для комплексу доменна піч – конвертер/мартен склала 2,41 т CO_2 /т сталі [67], а для електросталеплавильного виробництва – 0,77 т CO_2 /т сталі [55].

Перехід до «зеленої» металургії може не тільки допомогти досягненню довгострокової мети кліматичної нейтральності, а й підтримати післявоєнне відновлення економічної безпеки України. Цей перехід може стати каталізатором експорту та інвестицій, адже він потребує цілеспрямованих інвестицій в адаптивні та інноваційні виробничі потужності [44]. Крім того, інвестиції в екологічну модернізацію промисловості сприятимуть покращенню довгострокових економічних та екологічних показників завдяки створенню нових «зелених» робочих місць та зниженню навантажень на довкілля [107], що є особливо важливим, адже рівень безробіття за час війни зріс до 25% [71]. Економічна доцільність використання Україною відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у виробництві сталі також підкріплюється вимогами членства в Європейському Союзі (ЄС). Набуття членства в ЄС сприятиме економічній стійкості та цілісності торгівлі, оскільки ланцюги поставок між Україною та ЄС синхронізуються.

Абревіатури

BF – доменна піч
BOF – кисневий конвертер
CBAM – механізм прикордонного вуглецевого коригування
 CO_2 – вуглекислий газ
DRI – виробництво заліза прямим відновленням
EAF – електродугова піч
ETS – система торгівлі викидами
EU – Європейський Союз
GDP – валовий внутрішній продукт (ВВП)
GVA – валова додана вартість (ВДВ)
 H_2 – водень
HBI – гаряче брикетоване залізо
LCOA – усереднена вартість аміаку
LCOE – усереднена вартість електроенергії
LCOH – усереднена вартість водню
LCOS – усереднена вартість сталі
NG – природний газ
 NH_3 – аміак
NPV – чиста поточна вартість
OHF – мартенівська піч
OSBF – піч з відкритою шлаковою ванною
SI – додаткова інформація
ВДЕ – відновлювані джерела енергії

У разі вступу України до ЄС, на країну поширюватиметься нормативно-правова база Схеми торгівлі квотами на викиди (СТВ), згідно з якою ціна на вуглець станом на серпень 2023 року встановлена на рівні близько \$100/т CO_2 [26] і, за прогнозами, зростає до \$250/т до 2050 року [53]. Європейський зелений курс має на меті комерціалізацію «зеленої» сталі до 2030 року та повну декарбонізацію сектору до 2050 року [24]. Україна також має підготуватися до цього переходу. Це дослідження всебічно розглядає прогалину в знаннях про те, як стратегічно планувати розвиток ефективних і конкурентоспроможних ланцюгів поставок «зеленої» сталі, підкріплених стратегічним регіональним торговельним партнерством.

Після короткого огляду існуючої літератури про технології виробництва декарбонізованої сталі та конфігурацій ланцюгів поставок, у цій статті представлено модель оптимізації ланцюга поставок сталі та модель оптимізації використання ВДЕ, а також інші ключові компоненти методології. Усі потенційні переходи залежать від ходу війни – тому, це новаторське дослідження побудоване в рамках двох сценаріїв з різними геополітичними та природно-ресурсними обмеженнями. Далі представлені та обговорені результати, а також зроблені відповідні висновки для політиків, інвесторів і металургів, які можуть підтримати відповідний «зелений» промисловий перехід.

2. Огляд літератури

2.1. Варіанти декарбонізації сталі

Це дослідження ґрунтується на концепції глибокої декарбонізації для оцінки економічної доцільності переходу до «зеленої» металургії. Виплавка чавуну, де відбувається перетворення залізної руди на залізо і, отже, відбувається більшість викидів – передують виробництву сталі, де до сплаву додаються легуючі елементи, а вуглець та шкідливі домішки видаляються.

Процес виплавки чавуну може бути виключений при виробництві електросталі з використанням металобрухту. Однак, оскільки запаси металобрухту в усьому світі обмежені, особливо в країнах, що розвиваються [96], підвищення рівня вторинної переробки матеріалів підтримує, але не вирішить проблему декарбонізації сталеливарного сектору. Тому, для переходу галузі на траєкторію нульових викидів, необхідна трансформаційна технологія глибокої декарбонізації виробництва на основі руди. Якщо викопне паливо буде повністю вилучено як елемент відновлення руди та джерело теплової енергії, все одно необхідно буде додавати незначну кількість вуглецю під час виплавки сталі, адже сталь є сплавом заліза та вуглецю, що може призвести до утворення CO_2 . Крім того, CO_2 також утворюється від графітових електродів під час операцій з дуговою сталеплавильною піччю. Проте, ці викиди становлять менше 5% від викидів, притаманних BF-BOF [95]. Хоча універсального визначення «зеленої» сталі не існує [47], Міжнародне енергетичне агентство запропонувало кількісний поріг для виробництва сталі з майже нульовими викидами на рівні менше 0,4 т еквівалента CO_2 (CO_2 е) на тону (CO_2 е/т) сталі для 100% виробництва на основі руди, що лінійно зменшується до 0,05 т CO_2 е/т сталі для 100% виробництва на основі брухту [51]. Надалі в цій роботі «зелена сталь» визначається як сталь, вироблена за (майже повної) відсутності викопного палива, і використовується як взаємозамінний термін зі словосполученням «сталь з майже нульовими викидами». Це визначення поширюється на «зелене» гаряче брикетоване залізо (HBI), проміжний продукт між виробництвом заліза прямого відновлення (DRI) і виробництвом сталі.

Різноманітні технології в процесі виробництва сталі можуть призвести до скорочення промислових викидів. Три ключові шляхи глибокої декарбонізації ведуть до галузевих інновацій у виробництві на основі залізної руди: (а) пряме відновлення заліза на основі водню (H_2) з подальшим переплавом сталі в електродуговій печі; також відомий як H_2 -DRI-EAF, (б) прямий електроліз заліза (з подальшим переплавом сталі в електродуговій печі) та (в) технології уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS), інтегровані на об'єктах BF-BOF [35]. Враховуючи домінування в Україні доменних печей, також можуть бути корисними вдування водню, рециклінг колошникового газу та використання біо-вуглецю. Хоча, ці варіанти забезпечують лише часткове скорочення викидів. Комп'ютерне моделювання показало, що максимальна витрата H_2 при вдуванні до фурм доменної печі становить 28 кг/т при 12-відсотковому збагаченні киснем, що може скоротити викиди CO_2 на 18% [86]. Технологія CCUS має обмежену ефективність через велику кількість димових газів в комплексі BF-BOF і ще не доведена в промислових масштабах. Одночасне уловлювання CO_2 з газів доменної печі, електростанції та повітрянагрівачів може зменшити загальні викиди заводу на 80%; однак, витрати та споживання енергії на регенерацію адсорбенту також зростають [76; 90]. Повністю електрифіковане виробництво заліза стане проривною інновацією: дослідження та розробки інтенсивно ведуться як у сфері електролізу розплавлених

оксидів (MOE), що працює при температурі 1600°C, так і в галузі електровідновлення (що працює при температурі близько 100°C) [13]. Проте, ці технології ще знаходяться на стадії розробки, і комерціалізація очікується не раніше 2035 року [68].

Наразі, найперспективнішим шляхом є виробництво DRI на основі водню (H_2) – модифікація існуючого процесу на основі природного газу (NG), який швидко наближається до комерціалізації. Хоча технологія DRI ще не розвивається в Україні, у 2021 році на частку DRI припадало 8% світового виробництва заліза [105]. Шведські компанії HYBRIT та H₂GS, серед інших, беруть участь у перегонах за перший у світі комерційний 100% «зелений» завод DRI на базі H_2 – перша з яких успішно завершила пілотний проект H_2 -DRI у 2020 році та підземне сховище H_2 у 2022 році [89], а друга працює над створенням заводу комерційного масштабу до 2025 року [45]. Український уряд також розглядає створення «зеленого» ланцюжка постачання сталі на основі H_2 як частину стратегії відновлення країни [72]. Таким чином, «зелене» виробництво сталі на основі H_2 є технологією, яка трансформує металургійний сектор, і в цьому дослідженні розглядається як для виробництва «зеленої» сталі, так і для виробництва «зеленого» гарячого брикетованого заліза.

Ця робота досліджує поступову відмову від використання традиційного виробництва сталі на основі викопного палива та впровадження новітніх методів виробництва сталі з низькими та майже нульовими викидами. Було розглянуто дві основні перехідні технології: по-перше, схема DRI-EAF, яка використовує різні суміші природного газу (NG) та водню (H_2) для відновлення заліза. Технологія виробництва DRI на основі природного газу є зрілою та може працювати із заміщенням воднем до 30% без будь-яких змін інфраструктури [4], тоді як модернізація інфраструктури може призвести до 100% заміщення воднем [95].

По-друге, оскільки шахтні печі для DRI не підтримують залізну руду доменного класу¹, а якісні ресурси залізної руди класу DRI обмежені [56], нами було досліджено схему DRI-плавильна піч-доменна піч, де в якості плавильного агрегату використовується піч з відкритою шлаковою ванною (OSBF). Ця схема забезпечує можливість використання залізної руди нижчої якості, з нижчим вмістом заліза (Fe), та використовує переваги існуючих киснево-конверторних активів. Також було досліджено виробництво та торгівлю HBI як форму переміщення заліза та сталі.

Що стосується джерел енергії, український металургійний сектор може спиратися на існуючу енергетичну інфраструктуру, яка є залежною від атомної енергетики, а також на зростаючі потужності сонячної та вітрової енергетики. До війни, у 2021 році, країна виробляла 155 терават-годин (ТВт-год), з яких 55% – з атомної енергії, 24% – з вугілля, 7% – з гідроенергії, 7% – з газу, 4% – з сонця, 3% – з вітру і 1% – з геотермальної енергії/біомаси [12]. Отже, на додаток до безвуглецевих ядерних і гідроенергетичних ресурсів, це дослідження розглядає варіанти масштабування наземних гібридних сонячних і вітрових електростанцій, а також офшорних вітрових електростанцій.

¹ Власне, проблема не в самій шахтній печі, а в тому що EAF не пристосована для переплавки DRI, виготовленої з руди з високим вмістом пустої породи. *Автори дякують проф. В. Шатосі за це уточнення.*

Високоякісна дешева сонячна та вітрова електроенергія, здатна виробляти водень без викидів CO₂, лежить в основі економічного обґрунтування виробництва «зеленої» сталі на основі H₂ [17]. «Зелений» водень виробляється шляхом електролізу – розщеплення молекул води (H₂O) на її складові елементи – з використанням відновлюваної електроенергії. H₂ є відновником залізної руди, що забезпечує хімічні степеневі процеси, які зазвичай виконує вуглець коксівного вугілля. Через низьку щільність, транспортування газоподібного водню є дуже дорогим за відсутності трубопроводу. Для зменшення витрат на транспортування, багато проектів розглядають використання похідних водню, які мають вищу щільність, і тому можуть транспортуватися та зберігатися дешевше. Існує кілька похідних, які викликають суперечки: зріджений водень, «зелений» метанол, синтетичний «зелений» природний газ і «зелений» аміак – усі ці складові елементи розглядаються в літературі як потенційні варіанти. Однак, у літературі досі немає чіткого консенсусу щодо найоптимальнішого носія водню.

У цій роботі ми зосереджуємося на «зеленому» аміаку (NH₃) як потенційній формі водню через його численні переваги. По-перше, аміак можна утримувати в рідкому стані без потреби у дуже низьких температурах. По-друге, його можна виробляти лише з води, енергії та повітря, без потреби у джерелі вуг-

лецю. По-третє, він вже синтезується та транспортується по всьому світу у доволі великих обсягах. Після доставки на металургійний завод, «зелений» аміак може бути знову перетворений на водень, необхідний для DRI [83]. «Зелений» аміак може стати ключовим елементом для мобілізації ланцюгів постачання необхідних для виробництва «зеленої» сталі.

2.2. Техніко-економічні оцінки «зеленого» виробництва сталі на основі H₂

Це дослідження доповнює напрацювання літератури з декарбонізації, що охоплює техніко-економічні оцінки місцезнаходження для «зеленого» виробництва сталі на основі H₂, ключові внески якої детально викладені в табл. 1. На даний момент, більшість досліджень вивчали найоптимальніші місця розташування та конфігурації ланцюгів постачання з урахуванням наявності місцевих ресурсів та можливості імпорту «зеленої» сировини. Деякі дослідження розглядають виробництво на основі електромережі, інші моделюють автономні енергосистеми. До цього часу, географічний фокус був зосереджений на Європі. Література щодо декарбонізації металургійного сектору України є обмеженою: хоча існує бачення сталого майбутнього сталевих промисловості України [85], єдиним технологічним акцентом було використання найкращих доступних технологій у існуючих доменних печах [87].

Таблиця 1

Резюме ключової літератури щодо техніко-економічних оцінок низьковуглецевого виробництва сталі на основі водню. Усереднена вартість виробництва сталі (LCOS) використовується як ключовий економічний показник (наведений нижче в еквіваленті доларів США)

Джерело	Країна	Метод	Відкриття
1	2	3	4
Бхаскар А. та ін. [7]	Норвегія	Оптимізаційна модель виробництва H ₂ -DRI-EAF зі сховищем H ₂ та HBI, і змінними за часом цінами на електроенергію	Норвегія ідеально розташована поблизу необхідних сировинних матеріалів і європейських «зелених» ринків, з LCOS, оціненим від \$622 до \$722 за тону сталі. Закупівля електроенергії на основі «на день вперед», порівняно з фіксованою ціною, може знизити LCOS на 15%
Девлін А., Янг А. [16]	Австралія та Японія	Симуляційна модель заснована на сценаріях, які варіюються в конфігурації ланцюга поставок та енергетичного носія H ₂ (LH ₂ , NH ₃), та прогнозуються до 2030 та 2050 років	Розташування виробничих процесів поряд з джерелами ресурсів та енергії зменшить споживання енергії на 31% і LCOS на 24% (середні результати з 2030 по 2050 рік), порівняно з експортом H ₂ та залізної руди до міжконтинентальних виробників сталі. Австралія ідеально розташована для зеленого виробництва заліза та/або сталі
Девлін А. та ін. [17]	Глобальне	Оптимізаційна модель виробництва H ₂ -DRI-EAF з використанням змінної вітрової та/або сонячної енергії, прогнозована до 2030, 2040 і 2050 років, при цьому кожен випадок повторюється 5 разів для різних історичних факторів потужності ВДЕ (2015–2019 роки)	Дешева зелена сталь на основі водню розташовувалася поруч з тропіками Рака і Козерога, що відрізняються сонячним потенціалом з додатковою підтримкою вітру на суходолі. До 2050 року найбільш вигідні місця мали LCOS у розмірі \$535/т, і якщо ціни на коксுவальне вугілля залишаться високими, сталь на основі відновлюваних джерел може досягти конкурентоспроможності на ринку вже з 2030 року
Лопес Г. та ін. [64]	Німеччина, Іспанія та Фінляндія	Симуляційна модель, заснована на сценаріях, які варіюються в конфігурації ланцюга поставок і прогнозуються до 2020, 2030, 2040 і 2050 років	Імпорт HBI (морським транспортом) є більш вигідним з економічної точки зору, ніж імпорт H ₂ (через трубопровід) з Марокко. Виробництво сталі з використанням імпортованого HBI з Марокко конкурентоспроможне в рамках місцевих європейських ланцюгів постачання. Найнижчі витрати на виробництво H ₂ -DRI-EAF спостерігаються в сонячній Іспанії, де LCOS зменшується

1	2	3	4
			з \$512 за тонну сталі в 2030 році до \$386 за тонну сталі в 2050 році. Особливо великий потенціал для виробництва зеленої сталі існує в Австралії та Бразилії завдяки величезним рудним ресурсам
Отто А. та ін. [79]	Німеччина	Симуляційна модель, заснована на сценаріях, які відрізнялися технологічною залежністю	Для переходу на виробництво зеленої сталі на основі водню потрібно інтегрувати 237 терават-годин ВДЕ на всій території країни, що дозволить зменшити викиди вуглецю до 5% від рівня 1990 року
Пімм Е. та ін. [81]	Великобританія	Оптимізаційна модель виробництва H_2 -DRI-EAF з використанням змінної вітрової та/або сонячної енергії базується на історичних показниках потужності ВДЕ (дані за 2000–2019 роки, агреговані по чотири часових вікна на місяць)	Оптимальна енергетична система включає (збільшені) електролізери, сонячну та вітрову енергію, комбінований цикл з уловлюванням вуглецю, зберігання водню та зжате повітряне сховище енергії. Частина (наприклад, 20%) розподільчої потужності сприяє зменшенню вимог до зберігання водню. До 2030 року витрати на перехід до виробництва сталі на основі водню можуть бути меншими за сплату ціни на вуглець
Токтарьова А. та ін. [92]	Північна Європа	Оптимізаційна модель на основі сценаріїв, які варіюються за економічними параметрами, гнучкістю печі для прямого відновлення воднем (H-DR) та джерелом попиту на сталь	Низька собівартість електроенергії є основним фактором витрат для вибору місця для електрифікованих металургійних заводів і може відрізнятися від локації поточних об'єктів. Збільшення сонячної та вітрової потужності найкраще задовольнить підвищений попит на електроенергію (у той час як базове навантаження на газ зменшується)
Тролліп Х. та ін. [93]	Південно-Африканська Республіка	Оптимізаційна модель на основі сценарію для виробництва DRI на основі H_2 з використанням сонячних ресурсів у Південній Африці та ринкових цін на електроенергію ЄС	ПАР могла б виробляти «зелений» НВІ за ціною \$395/т. Щоб виробництво сталі в ЄС було конкурентоспроможним з імпортом НВІ з ПАР, ціни на електроенергію повинні впасти нижче \$38 за МВт-год
Вонг С. та ін. [97]	Австралія	Геопросторовий аналіз з подальшою оптимізаційною моделлю виробництва H_2 -DRI-EAF з використанням змінної енергії вітру та/або сонця (за фіксованими співвідношеннями 100% сонця/вітру або 50% кожного)	Існує кореляція між розташуванням родовищ залізної руди та ВДЕ, наприклад, у регіоні Пілбара в Західній Австралії та на півострові Ейр у Південній Австралії. Крім того, нова сталеплавильна діяльність може виграти від існуючої енергетичної та транспортної інфраструктури від гірничих робіт. LCOS оцінюється в \$500/т сталі в 2050 році

2.3. Прогалини в дослідженнях

З огляду літератури, що існує, можна визначити кілька прогалин у сучасних дослідженнях. По-перше, відсутність охоплення країн, що розвиваються (країн з низьким та середнім рівнем доходу) або з нестабільним соціально-політичним контекстом. По-друге, хоча було досліджено оптимізацію на рівні заводів і моделювання ланцюгів постачання, оптимізацію ланцюгів постачання ще не вивчено. Наскільки нам відомо, в літературі про декарбонізацію сталі відсутня оптимізація ланцюгів постачання, де оцінюється переміщення енергії та сировини до виробничих майданчиків заліза та сталі, а потім до ринків попиту. Це дослідження заповнює прогалини в літературі, застосовуючи геопросторовий підхід до моделювання оптимізації ланцюга поставок та обираючи повоєнну Україну як об'єкт дослідження — країну зі значними запасами залізної руди та можливостями для виробництва сталі, а також нагальною потребою в промисловому зростанні з огляду на зруйновану економіку, високе безробіття та знищені активи металургійної промисловості.

Ця робота ґрунтується на попередніх дослідженнях авторів [16–17] у трьох основних аспектах: (i) розширення просторового охоплення до національного рівня з регіональними експортними зв'язками,

(ii) врахування існуючого інерційного потенціалу активів та широкого спектру перехідних технологій та варіантів палива, (iii) вихід за межі лише техно-економічних аспектів теорії індустріального розташування шляхом включення аналізу геополітичних аспектів та державної політики щодо зміни клімату. Обрана методика дозволила провести ретельну оцінку мереж постачання сталі на шляху до майже нульових викидів до 2050 року.

3. Методологія

3.1. Оптимізація переходу металургійної галузі до майже нульових викидів

Оптимізаційна модель ланцюга поставок використовує просторово деталізовані дані, щоб визначити, де, коли та які інвестиції у технологію виробництва чавуну та сталі мають відбутися, як показано на рис. 1. Модель розроблено за допомогою загальної системи алгебраїчного моделювання (GAMS — General Algebraic Modelling System) для вирішення задач змішаного цілочисельного лінійного програмування (MILP — Mixed Integer Linear Programming). Модель оптимізована для найнижчої чистої поточної вартості

(NPV) протягом 20-річного життєвого циклу проєкту зі ставкою дисконтування 8% за допомогою модуля CPLEX у мові програмування Python. Рух матеріалів та енергії містить обрахунки обмежень природних ресурсів (наприклад, наявність територій для встановлення інфраструктури ВДЕ, запаси залізної руди та вугілля), обмеження в ресурсах (як-от доступність металобрухту), попит на сталь (внутрішній та зовнішній) та механізми вуглецевого ціноутворення. Модель

включає можливі вузли ланцюгів поставок, такі як виробничі майданчики, порти, залізничні прикордонні пункти, рудні та вугільні шахти, родовища природного газу, офшорні вітрові станції, атомні та гідроелектро-станції. Важливо, що розглянуто як існуючі, так і нові об'єкти по всій країні. Детальний опис моделі та рівнянь наведено в розділі S2.3 додаткової інформації (IS), що знаходиться у вільному доступі онлайн¹.

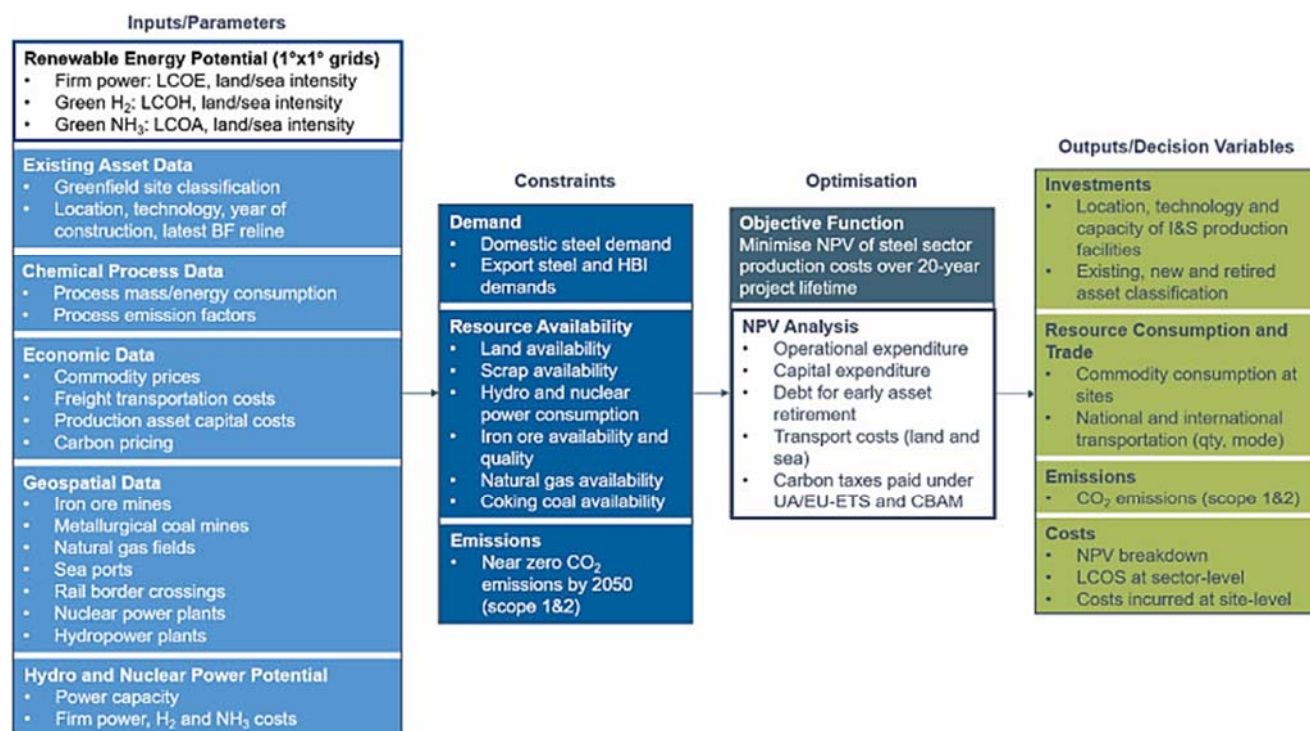


Рис. 1. Схематична модель переходу до виробництва «зеленої» сталі

Було розглянуто 73 потенційні локації для розміщення металургійних заводів і понад 100 можливих місць для виробництва відновлюваної енергії в Україні, з просторовою роздільною здатністю 1 x 1 (приблизно 111 км широти x 73 км довготи). Наші обрахунки ґрунтуються на припущенні, що виробництво електроенергії в країні є децентралізоване – кожна мережа може генерувати власну відновлювану енергію або імпортувати електроенергію, водень чи аміак з інших мереж. Чисту електроенергію, водень та аміак можна отримувати з наземних гібридних сонячно-вітрових станцій, морських вітрових станцій, а також атомних і гідроелектростанцій.

Це дослідження базується на попередньому моделюванні [17], що було спрямоване на повну декарбонізацію виробництва сталі за технологією H₂-DRI-EAF на рівні підприємств. Дане дослідження було значно розширено, включивши різноманітні джерела енергії та технології, інтеграцію ланцюгів поставок, економічну політику щодо вуглецю, а також використання існуючих активів. Відповідне моделювання була проведено аж по 2030, 2040 та 2050 роки з урахуванням фізичної амортизації активів (тобто перехідний запас вже встановлених потужностей) і кумулятивного спо-

живання природних ресурсів (наявність землі, запаси руди та коксівного вугілля). Такий підхід до моделювання дозволяє досліджувати взаємозв'язок між експлуатаційними витратами, капітальними витратами, втратами через дострокове виведення доменних печей з експлуатації та цінами на вуглець. Явна невизначеність, пов'язана з моделюванням майбутньої енергетичної системи, особливо в умовах нестабільної соціально-політичної ситуації, була зменшена завдяки використанню детальних даних про місцеві ресурси та економіку (табл. 2).

Основним механізмом ціноутворення на викиди вуглецю, який у майбутньому впливатиме на Україну, є Система торгівлі викидами ЄС (EU-ETS), ринковий механізм «обмеження та торгівлі» (cap and trade), а також додатковий механізм прикордонного вуглецевого коригування (CBAM), який встановлює ціну на викиди вуглецю для товарів, імпортованих до ЄС. Згідно з очікуваним вступом України до ЄС, все українське виробництво сталі підлягатиме EU-ETS, і на шляху до вступу в ЄС, ймовірно, буде діяти подібна, але більш поміркована, українська система торгівлі викидами (UA-ETS, табл. 3), з експортом, що підлягатиме європейському CBAM.

¹ За додатковою інформацією, див. URL: <https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0959652624021231-mmcl.pdf>.

Таблиця 2

Ключові вхідні дані для моделі оптимізації ланцюга постачання

Тип даних	Опис та джерело
1	2
Існуючі залізородні та металургійні активи	19 доменних печей, 13 кисневих конверторів, 8 мартенівських печей та 3 електродугові печі України, які знаходяться в експлуатації або на консервації [41], були змодельовані як існуючі активи, за винятком маріупольських «Азовсталі» та Металургійного Комбінату ім. Ілліча, оскільки вони принаймні частково зруйновані, а ступінь пошкоджень та потреби у відновленні залишаються невизначеними [101]. Для визначення амортизації активів використовувались поточні оцінки віку активів та тривалість робіт з ремонту доменних печей [38]
Вартість виробництва електроенергії, водню та аміаку на основі відновлюваних джерел, а також інтенсивність використання земельних/морських ресурсів	Рівень усередненої вартості електроенергії (LCOE), водню (LCOH) та аміаку (LCOA) є результатами окремої моделі оптимізації ВДЕ, яка виробляє зелену продукцію для безперервного постачання промисловим споживачам. Також визначаються показники використання морських і/або земельних ресурсів (див. Розділ 3.2)
Вартість виробництва електроенергії на основі ядерної/гідроенергетики, а також виробництва H_2 та аміаку NH_3	Базову ціну електроенергії з ядерної та гідроенергетики було прийнято на рівні \$20/МВт·год, виходячи з історичного діапазону в останні роки: \$18–22/МВт·год для гідроенергетики [74] та \$18–29/МВт·год для ядерної енергії [1]. Вартість виробництва водню (H_2) за допомогою безперервного постачання електроенергії була визначена за допомогою спрощеного розрахунку собівартості, заснованого на низькотемпературних електролізерах (див. Додаткову інформацію, табл. S2.3 для одиничних витрат). Відповідно, вартість NH_3 було визначено шляхом додавання енергоспоживання та витрат на процес Габера-Боша (див. Додаткову інформацію, табл. S2.5 для одиничних витрат)
Потужності ядерної та гідроенергетики	Щодо ядерної потужності, лише два з нинішніх 15 ядерних реакторів в Україні [40] залишаться в експлуатації після 2050 року, враховуючи очікуваний термін служби нових одиниць у 60 років [103]. Модель передбачає, що ці два реактори будуть модернізовані до 150% від нинішньої потужності, що складе загалом 3000 МВт (22% від поточної потужності), і будуть працювати з коефіцієнтом використання потужності 71% (на основі 86 ТВт·год ядерної енергії, виробленої у 2021 році [12]). Щодо гідроенергетичної потужності, десять діючих гідроелектростанцій мають сумарну потужність 6247 МВт (виключаючи зруйновану Каховську дамбу та гідроелектростанцію) [39]. Модель передбачає коефіцієнт використання потужності 30% для існуючого парку ГЕС і те, що металургійна галузь може споживати 20% від виробленої електроенергії
Геопросторові дані	Окрім даних про потенціал відновлювальних джерел енергії на рівні мережі та даних на рівні координат для металургійних активів, ядерних електростанцій і гідроелектростанцій, були інтегровані геопросторові дані для родовищ природного газу [25], залізородних шахт [43], шахт з видобутку металургійного вугілля [2] та морських портів [88]
Ціни на товари	Найважливіші енергетичні та матеріальні ресурси для виробництва сталі є товарами, які торгуються на глобальних спотових ринках, тому їхні ціни значно коливаються з часом. Через велику кількість змінних, які вже враховані в моделі, на основі історичних середніх значень нами було прийнято постійні ціни: залізна руда марки DR оцінюється в \$100/т [9], залізна руда для доменних печей в \$80/т [100], брухт в \$300/т [42], природний газ в \$25/МВт·год [34], а коксівне вугілля в \$200/т [18]. Для повного списку цін на сировину див. Додаткову інформацію, табл. S2.13. Також, було проведено аналіз чутливості до цих економічних змінних, як показано в Додатковій інформації, табл. S1.1–S1.4
Витрати на перевезення вантажів: залізничний вантажний транспорт (сухі насипні вантажі), трубопроводи (рідкий аміак, природний газ) та електромережі (електроенергія)	Одинична вартість залізничного вантажного транспорту для сухих насипних вантажів становила \$0,025/т/км [36], з урахуванням зниження споживання пального на 30% на зворотному шляху. Вартість транспортування рідкого аміаку трубопроводом становила \$0,05/т/км [73], а природного газу – \$0,08/т/км [15]. Тариф на транспортування електроенергії для «зелених» металургійних підприємств становив \$5,67/МВт·год/км, як встановлено Національною комісією з державного регулювання енергетики та комунальних послуг України [75]. Для відповідних рівнянь див. Розділ S2.3.10 Додаткової інформації

Закінчення табл. 2

1	2
Дані про хімічні процеси	Для обраних процесів виробництва заліза та сталі (перелічених у Розділі S2.3.2) та крекінгу NH_3 (необхідного для перетворення NH_3 назад в H_2 для використання в DR-печі) дані були зібрані з різних джерел, як детально зазначено в табл. S2.11
Капітальні витрати на виробничі активи	Капітальні витрати печі для виробництва залізної руди та сталі, а також на одиницю крекера NH_3 , були зібрані з різних джерел, як зазначено в табл. S2.14
Граничні показники викидів та коефіцієнти викидів	Викиди визначалися як сума викидів Score 1 і Score 2 (хоча оскільки вся електроенергія була безвуглецевою, викиди Score 2 були нульовими). Викиди Score 3 з постачання сировини, підготовки та транспортування були виключені. Для факторів викидів Score 1 див. табл. S2.11, а для відповідних рівнянь див. Розділ S2.3.9

Таблиця 3

Прогнозовані особливості політики EU-ETS та UA-ETS. Бенчмарки за інтенсивністю викидів з 2021 по 2025 рік базуються на 10% найбільш ефективних підприємств, з річним лінійним коефіцієнтом зниження бенчмарків на 4,5% з 2026 року до 4,6% з 2029 року. Безкоштовні квоти зникають у 2035 році. Класи сталі були дешево модифіковані, з прийняттям класифікацій «первинної» та «вторинної» сталі як розширення фактичних класифікацій «гарячий метал» та «електродугова сталь»

		Одиниця	2025	2030	2040	2050	Джерело
СТВ – ЄС та СВМ	Поріг інтенсивності викидів (первинна сталь)	т CO_2 /т сталі (Score 1 і 2)	1,288	1,021	0,638	0,398	Дослідницька Служба Європейського Парламенту [27; 29]
	Поріг інтенсивності викидів (вторинна сталь)	т CO_2 /т сталі (Score 1 і 2)	0,215	0,170	0,106	0,066	
	Коефіцієнт зменшення безкоштовних квот на викиди	—	100%	50%	0%	0%	
	Ціна на вуглець	\$/т CO_2	70	100	200	250	[71; 51]
СТВ – Україна	Коефіцієнт зменшення безкоштовних квот на викиди	—	-	75%	0%	0%	Київська школа економіки, середній сценарій [57]
	Ціна на вуглець	\$/т CO_2	-	75	150	188	

3.2. Оптимізація виробництва електроенергії, водню та аміаку на основі ВДЕ

У цьому дослідженні використовувалася інтегрована система виробництва енергії для оптимізації виробництва трьох окремих продуктів, отриманих з відновлюваної енергії: електроенергії, водню та аміаку (як показано на рис. S2.1 у Додатковій інформації). У кожному випадку модель враховувала як потенціал та наявність ВДЕ в регіоні, так і капітальні витрати на обладнання, щоб визначити конструкцію системи, яка мінімізує NPV і водночас задовольняє попит на продукцію. Оптимізація MILP була реалізована в Python з використанням модуля PuPSA та вирішувача Gurobi. Ця модель була застосована для кожного виробу з метою забезпечення постійної подачі електроенергії/водню/аміаку, тобто безперервного постачання для задоволення постійних виробничих потреб сталеливарної промисловості. Виробництво «зеленої» елект-

роенергії з сонячних панелей/вітрових турбін або безпосередньо використовувалося, або зберігалось (в літій-іонних батареях, у балонах зі стисненим воднем, або в резервуарах з рідким аміаком), або обмежувалося щогодини протягом 8760 годин у змодельованому році.

Після визначення мінімальної вартості системи для виробництва енергії, була оцінена максимальна потужність виробництва енергії для конкретної системи в кожній локації для кожної мережі 1 x 1. Застосовувалися коефіцієнти зменшення використання суші/моря, визнаючи, що (а) не всі території підходять для встановлення інфраструктури відновлюваної енергії, а також (б) весь потенціал відновлюваної енергії певної території не може бути повністю присвячений виробництву «зеленої» сталі. Ці коефіцієнти описані в табл. 4 і використовуються в рівняннях, наведених у розділі S2.1 Додаткової інформації.

Таблиця 4

Основні вхідні дані для моделі оптимізації ВДЕ

Тип даних	Опис та джерела
1	2
Потенціал сонячної та вітрової енергії	Дані про погодні умови за 2019 рік були отримані з набору даних ERA5 [48] та перетворені у профілі відновлюваної енергії за допомогою стандартної кривої вітрової турбіни (з урахуванням турбін на висоті 100 м та моделі Vestas 3 MW) і бібліотеки Python PVLib (використовуючи загальний дизайн панелі Sandia National Labs [49])

1	2
Витрати на виробництво та зберігання одиниці відновлюваної електроенергії, водню та аміаку	Для прогнозування витрат на одиницю новітньої технології ВДЕ та електролізерів до 2050 року були вивчені поточні витрати на вітрові та сонячні проекти в Україні (див. Додаткову інформацію SI табл. S2.2) і застосовані криві здатності навчатися розроблені Оксфордським інститутом новітніх економічних досліджень [98]. Оскільки в Україні немає існуючих офшорних вітрових проектів, що будуються, були використані середньо-світові витрати на плавучі та стаціонарні установки [84]. У океанах на глибинах менше 50 м можуть бути встановлені вітрові турбіни з фіксованим дном; для більших глибин, до 1000 м, потрібні дорожчі плавучі турбіни; для глибин понад 1000 м встановлення вітрових турбін не розглядалося. Виробництво водню базується на водному електролізі з використанням електролізерів низької температури. Для повного списку змінних витрат за часом див. SI табл. S2.3 та S2.5. Для ефективності електролізерів та паливних елементів див. SI табл. S2.4
Класифікація типів земель	Дані про класифікацію земель MODIS5 [37], які використовують супутникові зображення для визначення поточного використання землі, включають 17 можливих класифікацій використання землі
Максимальне споживання землі для інфраструктури ВДЕ як частка від загальної доступної площі землі	Для кожної класифікації були застосовані оцінки з літератури [84], які визначили максимальну частку землі, яку можна ймовірно використовувати для виробництва відновлювальної енергії. Також була виключена територія, яка була позначена як заповідна зона [82], або якщо нахил місцевості перевищував 15°. Див. SI табл. S2.1
Максимальне споживання морської території для інфраструктури відновлювальної енергії як частка від загальної доступної морської площі	Для Чорного та Азовського морів було припущено використання 50% площі сітки в межах української ексклюзивної економічної зони, враховуючи високу щільність морського трафіку та морські заповідні території [6]
Максимальна частка споживання інфраструктури відновлювальної енергії сектором сталі	Було зроблено припущення, що 20% від максимальної споживаної площі для інфраструктури відновлювальної енергії буде відведено для металургійної галузі, оскільки до війни український металургія споживала близько 20% кінцевого енергоспоживання. Це розрахунок базується на національному споживанні 2,156 мільйона TJ [50] та енергоспоживанні 23,0 GJ/т для процесу BF-BOF/OHF [67] і 9,4 GJ/т для процесу EAF [55]

3.3. Розробка сценаріїв і прогнозування попиту на сталь

Було розроблено два окремі сценарії, які відображають наслідки війни та невизначеність післявоєнної ситуації, які детально описані в табл. 5. В обох сцена-

ріях передбачається, що Україна стане членом ЄС, будуть впроваджені механізми ціноутворення на вуглець, а збройний конфлікт завершиться, що знизить інвестиційні ризики та створить основні економічні умови для ринково-конкурентного виробництва «зеленої» сталі.

Таблиця 5

Визначення сценаріїв

Параметр	Суттєве відновлення	Повільне відновлення
1	2	3
Окупація території	Звільнення усіх територій, включаючи Донбас та Крим	Часткова деокупація; території, які зараз контролюються Росією, залишаються під окупацією
Внутрішній попит	Значний внутрішній попит, зумовлений поверненням 90% біженців в Україну після війни [60] та повною відбудовою після війни протягом 20 років. Споживання сталі на душу населення досягає 165 кг/особу до 2050 року (проти 60 кг/особу під час війни)	Слабкий внутрішній попит, зумовлений поверненням 10% біженців в Україну після війни [60] та частковою (80%) відбудовою після війни протягом 20 років. Споживання сталі на душу населення досягає 150 кг/особу до 2050 року (проти 60 кг/особу під час війни)
Експорт	Сильний експортний ринок ЄС для «зеленої» сталі та «зеленого» HBI, враховуючи членство України в ЄС та імплементацію СВМ для конкурентів з-за меж регіону. Експорт досягає 16 млн т/рік до 2050 року	Поміркований експортний ринок ЄС для «зеленої» сталі та «зеленого» HBI, враховуючи можливе членство України в ЄС та імплементацію СВМ для конкурентів з-за меж регіону. Експорт досягає 11 млн т/рік до 2050 року
Вступ в ЄС	Стрімка євроінтеграція (до 2030 року)	Повільна євроінтеграція (до 2040 року)
Державна політика щодо вуглецю	Європейська СТВ прийнята	Середній сценарій UA-ETS впроваджено в 2030 році, і СВМ застосовується до експортерів в ЄС/Велику Британію. Європейська СТВ впроваджена до 2040 року

1	2	3
Доступність руди DR-марки	Розширення постачання руди DR-марки (внаслідок наукових досліджень і розробок (R&D), а також інвестицій у збагачення та грануляцію), досягаючи 23,7 млн т/рік до 2050 року (34% від загальної кількості рудних продуктів, що задовольняє 80% загального попиту на виробництво)	Стагнація постачання руди DR-марки (з мінімальними R&D та інвестиціями в збагачення та грануляцію), досягаючи 11,9 млн т/рік до 2050 року (17% від загальної кількості рудних продуктів, що задовольняє 64% загального попиту на виробництво)

Для аналізу історичного обігу та запасів сталі в Україні було використано динамічний аналіз матеріальних потоків (MFA), що дозволило зробити прогнози щодо попиту на сталь та постачання металобрухту до 2050 року. Історичний розподіл споживання сталі між основними категоріями продукції (транспорт, машинобудування, будівництво, побутова техніка/упаковка) оцінювався за допомогою таблиць витрат-випуску (I–O) за доступні роки: 1972 [94], 1990–1995 [3], і 2013–2020 [19]. Відповідно до роботи Паулюка та ін. [80], рівні насичення запасами сталі були визначені на рівні 13 ± 2 тонни на душу населення, а припущення щодо терміну служби оцінювалося із стандартним відхиленням 0,3 від середнього. Доступність металобрухту була визначена з використанням коефіцієнта переробки 90% сталі після споживання [106]. Формули та дані щодо терміну служби наведені в розділі S2.2 Додаткової інформації.

Внутрішній попит на сталь було розраховано як суму споживання на основі чисельності населення та потреб, пов'язаних з відбудовою. Для розрахунку споживання сталі на основі чисельності населення, річні показники споживання на душу населення було помножено на прогнозовану чисельність населення, як зазначено в табл. 5 для кожного сценарію. Що стосується потреб, пов'язаних з реконструкцією, прямі збитки будівлям та інфраструктурі України протягом перших 12 місяців війни оцінено в \$134,7 млрд [101], що призведе до загального збільшення попиту на \$12,63 млрд на рік для будівельної галузі України протягом 10 років відбудови. Детальніше дивіться в Додатковій інформації (SI), табл. S1.12 та Розділ SI 2.4.3. Це створить додатковий річний попит на сталь у розмірі \$2,77 млрд, що еквівалентно 15,5% річного виробництва 2021 року, або 3,32 млн тонн на рік. Можна припустити, що збитки збільшаться щонайменше вдвічі в результаті подальших бойових дій з лютого 2023 року, що складе 66,4 млн тонн сталі для потреб післявоєнної відбудови протягом 20 років. Післявоєнна відбудова суттєво підвищить попит на сталеву продукцію, охоплюючи ремонт інфраструктури, задоволення потреб оборони та економічне відновлення. І задовольнити зростання попиту на сталь за рахунок внутрішнього виробництва – це в економічних інтересах України.

Розрахунки попиту на експорт HBI та продукції «зеленої» сталі з України були здебільшого зроблені на основі історичних торговельних маршрутів та існуючих технологій виробництва сталі в країнах-імпортерах. Експорт розподілявся між 13 державами-членами ЄС та Великою Британією. Для забезпечення різноманітності постачальників, експорт не міг перевищувати 35% від прогнозованого попиту будь-якої країни [5], враховуючи поточний прогноз попиту на сталь у 2050 році, що становить 2,2 млрд тонн. Ми допускаємо, що HBI виробляється або із залізної руди для доменних печей або із залізної руди марки DR, а попит на кожен субпродукт залежить від існуючих потужностей заводів BF-BOF (підтримка BF-класу HBI через схему DRI-плавильна піч-BOF) та EAF (підтримка DR-класу HBI

через схему DRI-EAF) у кожній країні, яка імпортує український товар. Основним припущенням було підтримання експорт орієнтованої промисловості в Україні. Протягом останнього десятиліття, приблизно 65% виробленої сталі було експортовано за кордон (див. Додаткову інформацію, табл. S1.11); металургійна галузь генерувала близько 25% товарного експорту країни, загалом на суму \$16 млрд лише у 2021 році [21]. До вторгнення, Україна займала 14-е місце серед країн-виробників сталі з загальним обсягом виробництва 21,4 млн тонн необробленої сталі, з яких 15,7 млн тонн було експортовано [104]. Варто зазначити, що українська сталева продукція історично піддавалася широкому спектру антидемпінгових заходів з боку численних іноземних торговельних партнерів (див. Додаткову інформацію, табл. S3.3). Отже, перехід на «зелену» сталь є життєво важливим для виживання цієї галузі в умовах зростаючого тиску декарбонізації та торговельних бар'єрів на ключових експортних ринках країни.

3.4. Визначення економічних мультиплікаторів на основі аналізу «витрати-випуск»

Модель «витрати-випуск» використовує системний підхід до економіки, підкреслюючи взаємозалежність міжгалузевих або секторальних зв'язків, де продукція однієї галузі народного господарства часто є вхідним ресурсом для іншої [61]. Це дослідження застосовує макроекономічний аналіз «витрати-випуск» для (а) дослідження впливу української сталеливарної промисловості на виробництво, дохід та економічне зростання, та (б) моделювання довгострокових наслідків повоєнної реконструкції на внутрішній попит на сталь та на економіку в цілому. Завдяки детальній дезагрегації господарської діяльності було розроблено обернені матриці Леонтьєва, які забезпечують кількісні транзакційні відносини між промисловими компонентами певної економічної системи [62]. Аналіз мультиплікаторів «витрати-випуск» був обраний як найбільш аналітично ретельний підхід до регіонального моделювання порівняно з двома альтернативами – кейнсіанським мультиплікатором доходу та економічними базовими моделями [65]. При моделюванні було прийнято три основні припущення: пропорційність (тобто попит на проміжні ресурси є лінійною функцією випуску), постійна віддача та відсутність заміщення між різними ресурсами або факторами виробництва [69]. Згідно з рекомендаціями ключових практиків аналізу «витрати-випуск» [33; 78] і на основі даних Державної служби статистики України за 1990–2021 роки було проведено економічний аналіз «витрати-випуск» для традиційної металургійної галузі у 2014 та 2021 роках. Крім того, макроекономічний вплив оптимізованого майбутнього «зеленої» металургійної галузі було змодельовано для національного випуску, доходу та структури валової доданої вартості (ВДВ). Для порівняння було оцінено економічний вплив тієї ж величини виробництва сталі в рамках традиційних вугільних сталевих сценаріїв та

змодельовано за допомогою останніх довоєнних мультиплікаторів випуску. Додаткові деталі див. у SI, Розділ S2.4.

4. Результати та обговорення

4.1. Зростання «зеленого» виробництва заліза та сталі базується на високому регіональному попиті та конкурентоспроможності продукції на ринку

Торгові зв'язки з регіонами, де діє жорстка державна політика боротьби проти зміни клімату, сприяють прогресу в декарбонізації експортно-орієнтованої металургійної галузі. Післявоєнна відбудова спочатку стимулюватиме попит на сталь, але він не буде достатнім для забезпечення сталого зростання галузі. У сценарії «Суттєвого відновлення» до 2030 року буде досягнуто вступу до ЄС, що призведе до негайної реалізації попиту на «зелену» сталь і продукцію НВІ: частка експорту сталі, за оцінками, становитиме 58% у 2030 році, а до 2050 року зросте до 77% (що відповідає довоєнному рівню, як показано на рис. 2). Важливо скористатися перевагами двох важливих екс-

портних ринків: «зеленої» сталі та «зеленого» НВІ. Хоча «зелена» сталь пропонує більші перспективи доходу від експорту, НВІ буде надзвичайно цінним інструментом переговорів щодо створення довготривалого торговельного партнерства. Традиційні великі металургійні економіки ЄС, такі як Німеччина та Іспанія, будуть більш відкриті для угод щодо імпорту українського «зеленого» заліза, яке вони використовуватимуть для виробництва продуктів з доданою вартістю на наступних етапах. Такий підхід захищає робочі місця для обох сторін, покращуючи загальну конкурентоспроможність ринку. Україна все одно отримає значні доходи від експорту «зеленого» НВІ: якщо ЕАФ завантажуватиметься на 100% ДРІ, вартість сталі буде складатися приблизно на 75% з вартості НВІ. Максимальна загальна кількість експорту для будь-якого сценарію становить 17 млн тонн еквіваленту сталі на рік, що є обґрунтованим показником - 11% від загального попиту країн ЄС-27 та Великобританії у 2050 році. Крім того, довгострокові торговельні партнерські угоди з багатьма країнами та помірні плани щодо розширення експорту сприяють зниженню інвестиційних ризиків і розвитку «зеленої» металургійної галузі.

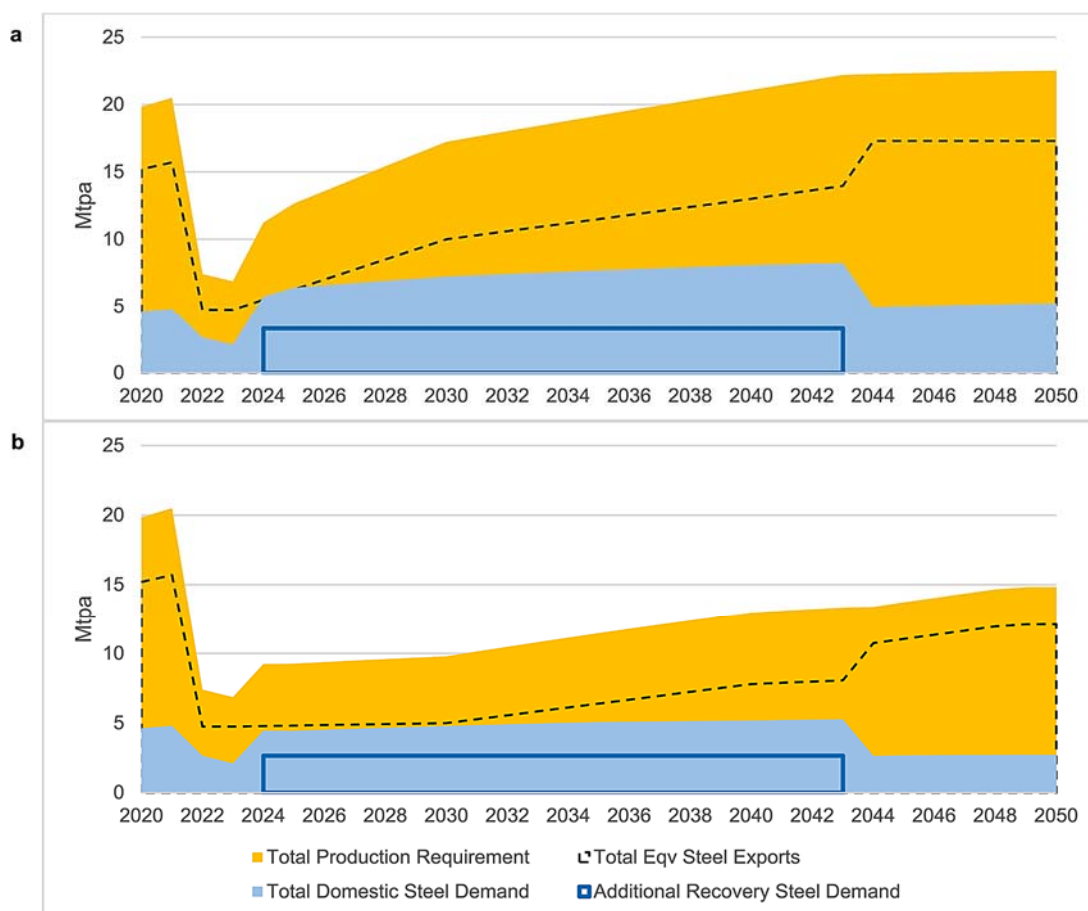


Рис. 2. Прогнози попиту на сталь в Україні, включаючи експорт, внутрішнє споживання та додаткові потреби у відбудові, для (а) сценарію «Суттєвого відновлення» та (б) сценарію «Повільного відновлення». Експорт складається з «зеленого» НВІ та «зеленої» сталі, виражених в еквівалентах сталі (з урахуванням 0,9 т НВІ/т сталі для 14%-го навантаження металобрухтом під час виробництва сталі). (Для інтерпретації посилань на колір у цій легенді до рисунка, читачеві слід звернутися до веб-версії цієї статті)

Для встановлення та підтримки нових угод про торговельне партнерство важливо забезпечити конкурентоспроможність на ринку. У процесі вступу до ЄС екс-

порт сталі та НВІ з України переорієнтується з традиційних ринків Північної Африки та Близького Сходу на ринки ЄС та Великобританії (як показано на

рис. S1.7–S1.9 в Додаткових матеріалах). До війни Україна щорічно експортувала 15 млн тонн сталі, з яких лише 2,5 млн тонн надходило до європейських країн [29]. Після війни очікується, що експорт буде переважно спрямований до країн ЄС та Великобританії, які мають чітку вуглецеву політику декарбонізації та механізми прикордонного вуглецевого регулювання.

Щоб забезпечити конкурентну частку на європейському ринку «зеленої» сталі, LCOS має бути не більше \$500–586 за тону [64]. Позитивно, що в межах цього дослідження розраховано, що в Україні в сприятливих умовах LCOS для «зеленої» сталі може становити від \$440 до \$600 за тону. При цьому, якщо використовувати гідроелектростанції або атомні електростанції, де витрати мінімізовані завдяки амортизованим активам, вартість виробництва сталі за технологією H_2 -DRI-EAF буде на нижчому рівні. У випадку використання нових сонячних та вітрових електростанцій, вартість виробництва зростає до \$587 за тону сталі, з розрахунку на безперервне постачання електроенергії за ціною \$64/МВт·год і «зеленого» водню за \$3,31 за кілограм H_2 (рис. 3).

Близько 75% витрат на виробництво сталі припадає на етап виробництва заліза. Вартість «зеленого» НВІ оцінюється в \$440 за тону, і за умови використання дешевшої електроенергії (\$20/МВт·год), ціна може зменшитися до \$290 за тону. Це робить український НВІ конкурентоспроможним порівняно з іншими регіонами, наприклад, у Південній Африці, де вартість становить \$395 за тону [93]. Використання високоякісних ВДЕ є ключовим для зниження витрат і утримання позицій на експортних ринках.

4.2. Джерела енергії з нульовими викидами, які сприяють зеленому переходу

Потенціал ВДЕ варіюється залежно від пори року, часу та геолокації. Нормована вартість електроенергії для гарантованої потужності від комбінованої наземної сонячної та вітрової енергії є досить високою: варіюється від \$86 до \$161/МВт·год у 2030 році, від \$70 до \$117/МВт·год у 2040 році та від \$58 до \$91/МВт·год у 2050 році (як показано на рис. 3а). Незважаючи на потенціал вітрових ресурсів в Україні (у 2019 році середня годинна потужність вітру становила 0,32, а сонця — 0,14), висока вартість вітрових турбін у порівнянні з сонячними панелями робить останні більш привабливими. Встановлена потужність сонячної енергії як частка загальної потужності відновлюваної енергії, за оцінками, складе в середньому 68% у 2030 році, збільшуючись до 78% у 2050 році. Добові та сезонні спади виробництва сонячної енергії частково компенсуються піками у вітровій енергії у зимовий період, коли спостерігається збільшення швидкості вітру. Рівень витрат на виробництво водню (LCOH) також не є однозначним: результати варіюються від \$3,96 до \$13,76/кг H_2 у 2030 році, від \$3,19 до \$9,45/кг H_2 у 2040 році та від \$2,65 до \$6,91/кг H_2 у 2050 році (як показано на рис. 3б), що не відповідає цілям ЄС щодо вартості водню нижче \$2,2/кг H_2 (€2/кг) [28]. Вартість аміаку (LCOA) варіюється від \$450 до \$1300/т NH_3 у 2030 році, від \$389 до \$1027/т NH_3 у 2040 році та від \$346 до \$829/т NH_3 у 2050 році (як показано на рис. 3в), причому верхній кuartиль у 2040 і 2050 роках є конкурентоспроможним при традиційному методі

виробництва аміаку на основі природного газу з високими викидами, який коштує \$300–\$550/т NH_3 [52]. Ідеальні географічні місця для виробництва зеленої енергії та палива на суші розташовані у південних, східних, північних та північно-західних районах України, де забезпечується баланс між надійністю (тобто мінімальною непостійністю) та інтенсивністю (тобто потужністю виробництва) сонячних та вітрових ресурсів.

Використання гідроенергії та атомної енергії може знизити витрати, але їхня потужність доволі обмежена. Для стабільного електропостачання за ціною \$20/МВт·год, рівень витрат на виробництво водню є надзвичайно привабливим і становить \$1,23, \$1,14 та \$1,06/кг H_2 у 2030, 2040 та 2050 роках відповідно. Ця цінова конкурентоспроможність поширюється і на аміак, вартість якого становить \$321, \$305 та \$291/т NH_3 у 2030, 2040 та 2050 роках відповідно. Однак, з урахуванням обмежень ГЕС, металургійна галузь може споживати 19 ТВт·год електроенергії щорічно, що дозволяє виробляти лише 5 млн тонн сталі на рік на основі «зеленого» водню у процесі H_2 -DRI-EAF, тоді як за умов обмежень АЕС максимальне споживання складає 3,2 ТВт·год на рік, або лише 1 млн тонн сталі на рік шляхом H_2 -DRI-EAF. До того ж, хоча сонячні та вітрові проекти пропонують швидкі строки реалізації та будівництва (наприклад, нещодавно в Україні було збудовано сонячну електростанцію потужністю 240 МВт всього за 8 місяців [22], а вітрову електростанцію потужністю 114 МВт збудували за 1,5 роки, навіть під час війни [23]), проекти атомної енергетики вимагають десятиліть від прийняття остаточного інвестиційного рішення до введення в експлуатацію АЕС, причому тільки період будівництва займає близько 9 років [102]. Тому, хоча розвинена інфраструктура України для виробництва енергії без викидів CO_2 відіграватиме свою роль, розширення енергосистеми має покладатися на сонячну та вітрову енергію.

Відповідно до наших підрахунків, потенціал відновлюваної енергії є високим, що узгоджується з результатами інших досліджень з цього питання. Загальний потенціал наземної сонячної та вітрової енергії в Україні в 2030 році складе 2182 ТВт·год (з яких максимум 436 ТВт·год відведено для металургійної галузі), розрахований за годинною швидкістю вітру для більш ніж 100 локацій. Варто зазначити, що оцінка нашого дослідження на 70% перевищує попередні цифри, отримані Українським інститутом відновлюваної енергетики НАН України [58]. Водночас, оцінений потенціал «зеленого» водню в 40,8 млн тонн на рік (максимум 8,3 млн тонн на рік відведено для сталеливарної галузі) тісно відповідає оцінкам вищезазначеного Інституту щодо можливостей виробництва водню на основі вітрової енергетики [59]. Об'єднана морська потужність для виробництва енергії складає 205 ГВт, виробляючи 288 ТВт·год у 2050 році, що еквівалентно 54% об'єднаної наземної потужності, і приблизно відповідає оцінці Світового банку в 250 ГВт [99]. У цьому дослідженні підраховано, що Україна займає 12,7% території ЄС, яка є доступною та придатною для встановлення інфраструктури відновлюваної енергії, поступаючись лише Іспанії (14,8%) та Франції (13,2%). Таким чином, Україна може мати значний вплив на енергетичну безпеку ЄС завдяки виробництву та експорту енергоресурсів.

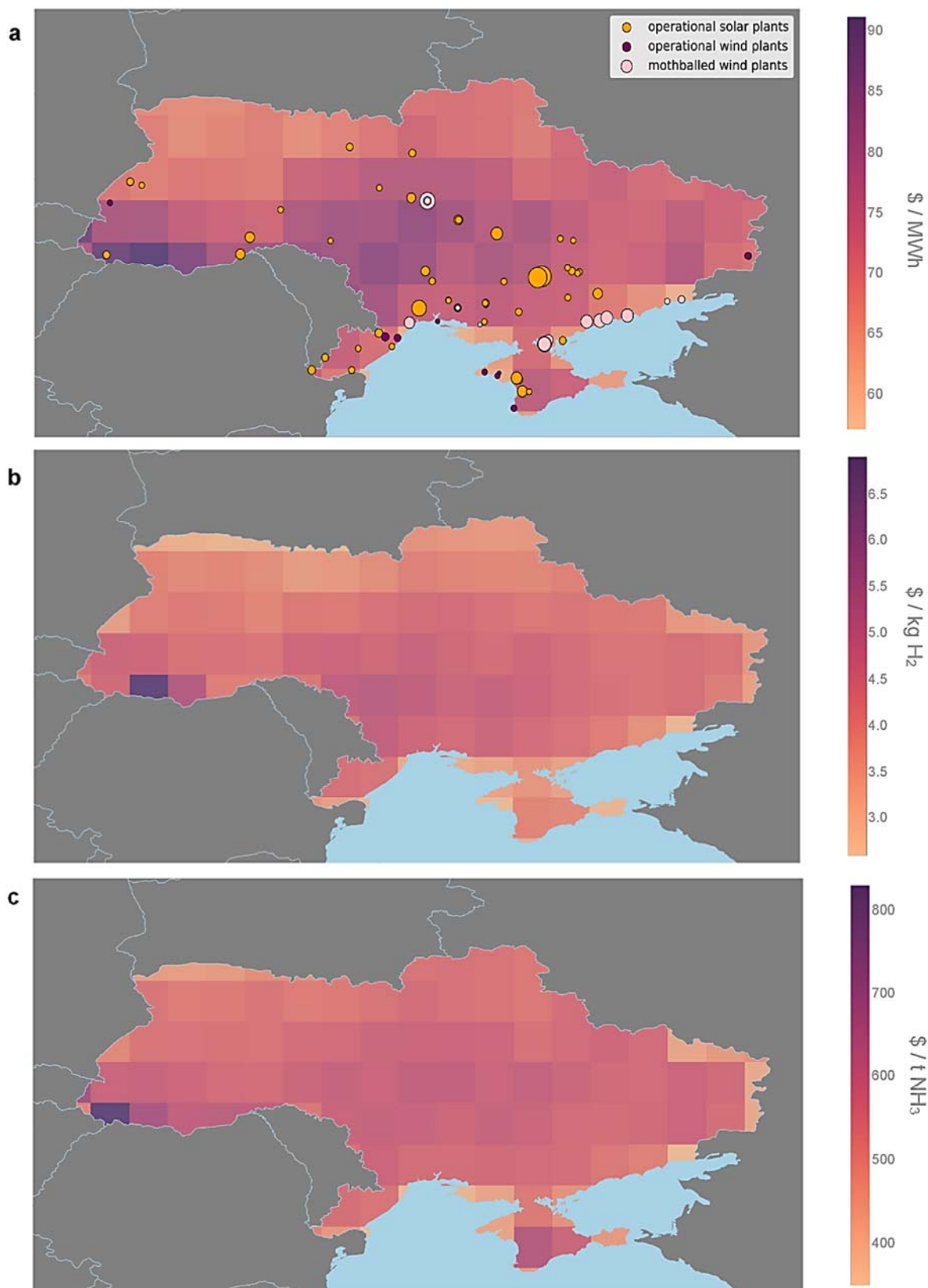


Рис. 3. Результати мінімізації витрат для енергопродуктів гібридних наземних сонячних і вітрових електростанцій, встановлених у 2050 році: (а) Вирівняна вартість гарантованої пропускної потужності електроенергії (у доларах США за МВт·год), нанесена на графік разом із існуючими установками сонячних і вітрових електростанцій (маркери розміром відповідно до потужності); (б) Вирівняна вартість безперервного постачання водню (у доларах США за тону H₂); (в) Вирівняна вартість безперервного постачання аміаку (у доларах США за тону NH₃)

4.3. Зелений перехід, підкріплений своєчасними інвестиціями, географічною та енергетичною диверсифікацією, та вуглецевими податками

Існуючі вугільні металургійні заводи в Україні мають значні потужності; проте активи радянської епохи застаріли та мають невелику життєздатність, що робить інвестиції у «зелену» сталь більш обґрунтованими. До 2030 року, 43 окремі печі, що перебувають в експлуатації або на консервації, вимагатимуть рішення щодо інвестицій для продовження/відновлення роботи або повного виведення з експлуатації (складаються з 19 доменних печей, 13 конвертерів, 8 мартенівських печей і 3 електродугових печей). У 2030 році, середній вік доменних печей становитиме 61 рік, а середній залишковий термін корисного життя після останньої модернізації – 6 років [38]; тому, лише небагато активів стикатимуться із значним борговим навантаженням через ранній вихід з експлуатації. Окрім запровадження вуглецевого податку на експорт сталі до ЄС, Великої Британії та інших країн «Великої сімки» (G7), вік українських доменних печей, який значно перевищує світовий середній показник у 25 років [91], підсилює аргументи на користь «зелених» інвестицій.

За сценарієм «Суттєвого відновлення», лише 12% існуючих потужностей доменних печей залишатимуться в експлуатації до 2030 року, загальною потужністю виробництва 3,5 млн тонн чавуну на рік на трьох заводах. Близько третини конвертерів продовжать експлуатацію для інтегрованого виробництва BF-BOF, з потужністю виробництва 5,1 млн тонн чавуну на рік. Щоб покрити недостачу виробництва, потрібно буде встановити додаткові потужності DRI на рівні 10,8 млн тонн на рік і додаткові EAF на рівні 7,2 млн тонн на рік (окрім наявних 3,8 млн тонн на рік потужностей EAF). До 2050 року (як показано на рис. 4), на п'яти браунфілдах (тобто на місцях вже існуючих традиційних металургійних заводах) і семи зелених майданчиках (тобто нових заводів «під ключ»), мають бути створені нові потужності з виробництва чавуну повністю на основі водню, а сталеливарне виробництво буде розподілені наступним чином: 42% на основі металобрухту-EAF, 37% на основі DRI-EAF і 22% на основі плавильних печей-BOF. Залишилося менше трьох десятиліть до 2050 року, тому завчасні інвестиції в технології виробництва з низькими та майже нульовими викидами є життєво важливими для забезпечення плавного переходу.

Зелені майданчики для будівництва відкривають нові можливості для використання високоякісних відновлюваних джерел енергії. Важливість торгівлі «зеленим» NH_3 та «зеленим» НВІ підвищує географічну диверсифікацію розташування заводів. За нашим аналізом, Кривий Ріг залишатиметься домінуючим містом-регіоном у виробництві сталі, розташованим поряд з найбільшим у країні залізрудним басейном і неподалік від чорноморських портів, з дешевшим NH_3 , який транспортується з північних регіонів. У балансі між оптимальністю та реальністю, заводи з виробництва заліза та сталі зосереджуватимуться в центральних і північно-західних районах. Потреба в нових проектах у західній та центральній частинах країни буде особливо високою для України, якщо території, окуповані Росією, і існуючі на них заводи залишаться недоступними (як показано на рис. 5).

За сценарієм «Повільного відновлення», незважаючи на зменшений попит на сталь, відсутність доступу до наявних активів призведе до необхідності інвестицій у нові печі. До 2030 року потрібно буде встановити 6,9 млн тонн на рік потужностей DRI та 4,9 млн тонн на рік потужностей EAF на шести нових майданчиках і одному браунфілді. До 2040 року подальші інвестиції становитимуть 2,1 млн тонн на рік для DRI, 1,7 млн тонн на рік для OSBF і 2,2 млн тонн на рік для EAF. До 2050 року залишкова потужність доменних печей буде виведена з експлуатації, а недостача у виробництві буде покрито новими DRI та OSBF, які використовуватимуться разом із наявними потужностями BOF для виробництва сталі з НВІ нижчої якості. Будівництво нових заводів у північно-західних регіонах — найвіддаленіших від лінії фронту (станом на квітень 2023 р.) — може бути пріоритетним, де нові заводи отримають вигоду від дешевих місцевих відновлюваних джерел енергії та близькості до прикордонних залізничних переходів.

Перехід на виробництво «зеленої» сталі означає використання низьковуглецевих джерел енергії (атомна та гідроенергетика), а не природний газ. Хоча природний газ вважається перехідним паливом, він все ж є викопним паливом, яке породжує CO_2 , на яке буде введено вуглецевий податок з боку головних імпортерів. До 2050 року внутрішні запаси природного газу, ймовірно, також будуть вичерпані, тому для сектора є логічним уникати залежності від газу, що відповідає нещодавній політиці REPowerEU [32], яка має на меті зменшити залежність від російського газу. Однак у найближчий період, з сьогоднішнього дня до 2030 року, можна виграти від використання сумішей H_2/NG , оскільки зниження цін на нові технології електролізу набирає обертів. Визначальним фактором відмови від природного газу є вартість, а не обмеження постачання: навіть без вуглецевого податку, виробництво сталі за допомогою технології NG-DRI-EAF коштуватиме \$480/т сталі за умови постачання природного газу по ціні \$25/МВт·год, що дорожче за виробництво по схемі H_2 -DRI-EAF із безперервним електропостачанням по ціні \$20/МВт·год, яке коштуватиме \$430/т сталі. За сценарієм «Суттєвого відновлення», у 2030 році, вся електроенергія та більшість (69%) хімічної енергії будуть отримані з наземної сонячної та вітрової енергетики, а дефіцит хімічної енергії буде покритий атомною енергетикою (19%), офшорною вітровою (11%) та гідроенергетикою (3%). У майбутньому, для забезпечення зростаючого попиту на «зелену» сталь, використовуватиметься велика потужність сонячної та вітрової енергетики. Застосовування дешевих відновлюваних джерел енергії, як на місцевому рівні (електроенергія чи постачання H_2), так і на регіональному (постачання NH_3), є критично важливим компонентом для конкурентоспроможного виробництва «зеленої» сталі.

4.4. Економічна ефективність інвестицій у зелену сталь

Багатомільярдні інвестиції в індустрію потребують злагодженої роботи з боку держави та приватних інвесторів. Для відновлення української металургійної промисловості потужністю в 22 млн тонн сталі на рік і переходу на майже нульові викиди до 2050 року, необхідні капітальні інвестиції складають \$45,9 млрд для

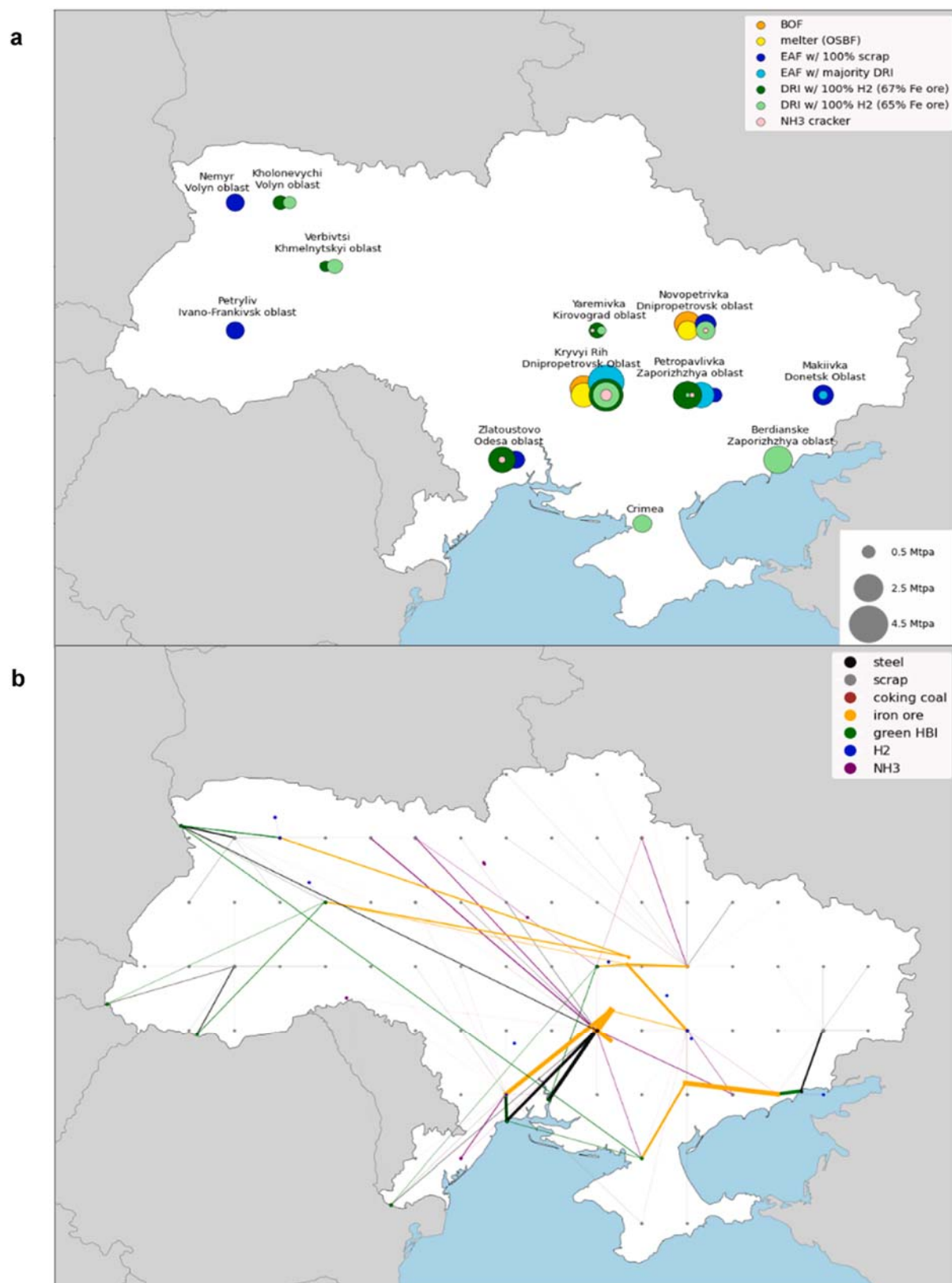


Рис. 4. Оптимізовані ланцюги поставок сталі у 2050 році за сценарієм «Суттєвого відновлення»:
(a) потужності активів з виробництва заліза та сталі (колір вказує на технологію, а діаметр маркера позначає потужність заводу), та (b) внутрішні потоки ланцюга поставок (показано прямі лінійні відстані, товщина ліній вказує на обсяг торгівлі), включно з транспортуванням експорту «зеленої» сталі до портів. Результати за 2030 і 2040 роки дивіться на рис. S1 S1.12 та S1.13 Додаткової інформації, відповідно

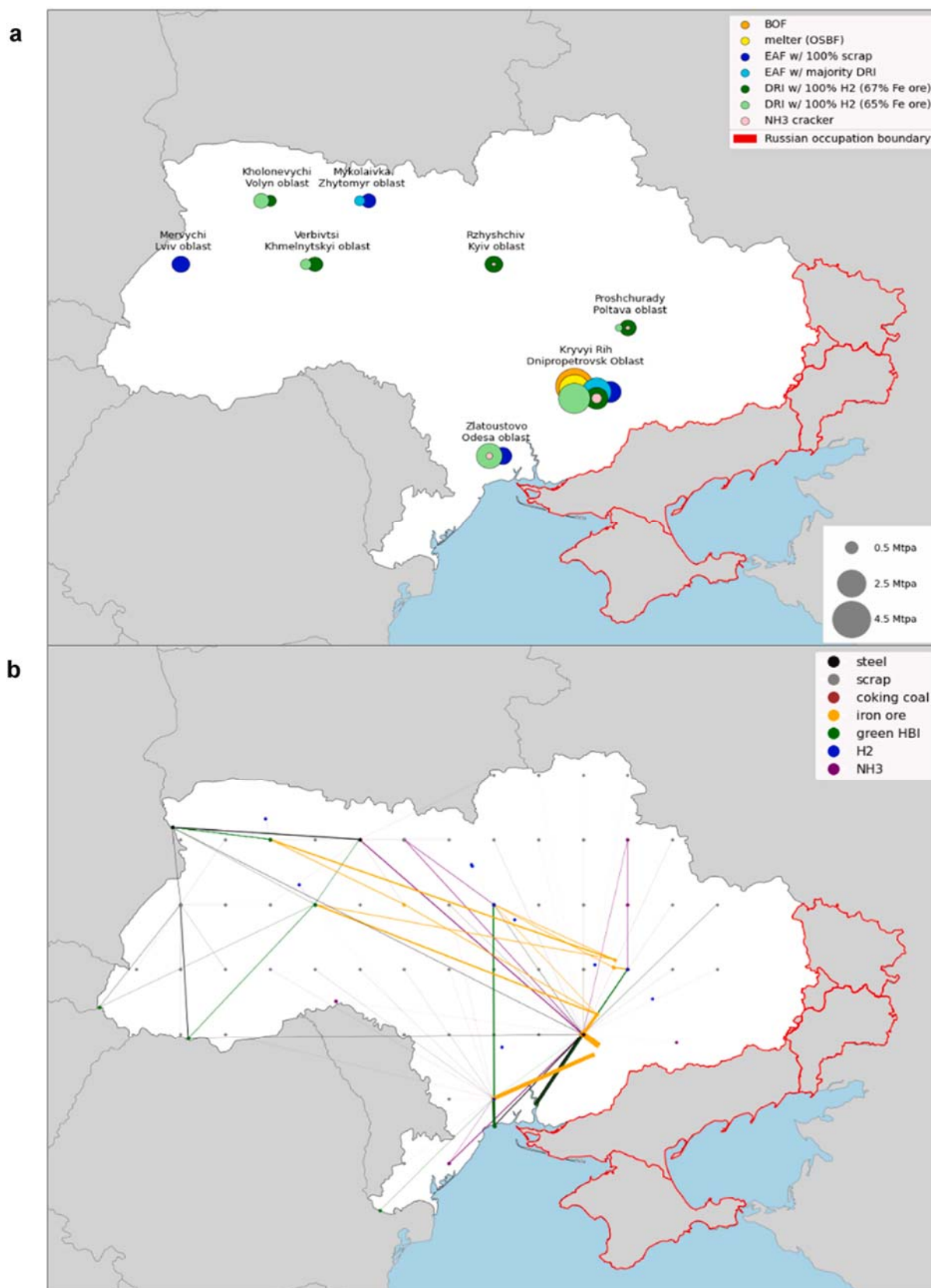


Рис. 5. Оптимізовані ланцюги поставок сталі у 2050 році за сценарієм «Повільне відновлення»: (а) потужності активів з виробництва заліза та сталі (колір вказує на технологію, а діаметр маркера позначає потужність заводу), та (б) внутрішні потоки ланцюга поставок (показано прямі лінійні відстані, товщина ліній вказує на обсяг торгівлі), включно з транспортуванням експорту «зеленої» сталі до портів. Геопросторові дані для територій, окупованих Росією, надано DeepState UA (2023), станом на квітень 2023 року

відновлюваних джерел енергії, \$6,6 млрд для установок зберігання енергії та \$9,5 млрд для печей (загалом \$62 млрд, за умови повної деокупації території України). Крім того, експортно-орієнтована промисловість потребує високоефективних залізничних і морських торгових маршрутів для забезпечення конкурентоспроможності на ринку. Транспортування є більш ефективним за допомогою судноплавства; у той час, як залізнична інфраструктура потребує суттєвої модернізації для досягнення ефективності щодо швидкості та вартості перевезень, включаючи приведення колії України у відповідність до європейських стандартів і підвищення пропускної здатності для підтримки експорту 9,5 млн тонн заліза прямого відновлення (DRI) або сталі. Також, необхідно прокласти трубопроводи для транспортування 2,6 млн тонн зріженого аміаку до 2030 року та модернізувати порти для обробки 6,3 млн тонн експорту «зеленої» сталі/заліза. Слід також налагодити потужності для збагачення руди класу DR та випуску окатишів для постачання 9,6 млн тонн руди, придатної для так званого заліза прямого відновлення (DRI). Системні промислові зміни такого масштабу потребують величезної мобілізації капіталу, для чого необхідна фінансова підтримка і стимули для чистих технологій.

Водночас, інвестиції в металургійну промисловість матимуть потужний мультиплікативний ефект для всієї економіки України. У 2021 році кожен долар, вкладений у металургійне виробництво, додатково приніс \$3,28 в інших секторах економіки завдяки непрямим та індукованим ефектам (на основі розрахунків мультиплікатора типу II, див. SI табл. S1.10). Нами було проведено порівняльну макроекономічну оцінку між: (а) традиційним сталеливарним виробництвом з високими викидами на основі вугілля та (б) переходом до виробництва «зеленої» сталі, з урахуванням трьох часових горизонтів – 2030, 2040 та 2050 років – за сценаріями «Суттєвого відновлення» та «Повільного відновлення». Результати показують, що виробництво «зеленої» сталі позитивно вплине на економіку завдяки зміцненню ланцюгів постачання, зростанню доходів та валової доданої вартості за більшістю сценаріїв. Наприклад, за умов «Суттєвого відновлення», протягом 20 років реалізації переходу до «зеленої» металургії, економіка України може згенерувати \$737 млрд загальної продукції сталеливарного галузі, \$145 млрд доходів та \$415 млрд ВДВ. Водночас, традиційне металургійне виробництво на основі вугілля принесе значно менше доходів (\$106 млрд) та валової доданої вартості (\$251 млрд). Див. SI рис. S1.16.

Аналіз вхідних-вихідних потоків виробництва «зеленої» сталі, проведений у цьому дослідженні, є прогностичним, оскільки він базується на історичній структурі традиційних галузей електроенергетики та хімічної промисловості. Збільшення частки ВДЕ в електроенергетиці та використання електролітичних процесів для виробництва водню та аміаку можуть змінити взаємодію цих галузей з народним господарством в цілому та, можливо, навіть посилити взаємозв'язки між ними. Проте виявлено чіткий зв'язок між переходом металургійної галузі на виробництво «зеленої» сталі та набагато швидшим економічним зростанням. Структурна трансформація гірничодобувної та металургійної галузей у «зелене» сталеливарне виробництво з доданою вартістю сприятиме далекоюсяжним економічним вигодам, стимулюючи зайнятість, ви-

трати в ланцюгах постачання та стійкі експортні доходи. Див. рис. S1.16 та Розділ S2.4.4 в Додатковій інформації щодо детальних розрахунків щодо всіх змодельованих сценаріїв.

5. Висновки

У цьому дослідженні проаналізовано оптимістичний та реалістичний сценарії для оцінки можливостей України з відновлення сталеливарної галузі на засадах зеленої економіки. Відхід металургії від використання вугілля можливий за умови чіткої державної політики боротьби проти зміни клімату, міцних регіональних торговельних зв'язків і суттєвих капіталовкладень. Численні фактори сприяють розкриттю потенціалу України у виробництві «зеленої» сталі: цінні запаси залізної руди, значний рівень сонячного опромінення та швидкість вітру, земельні ресурси, річки зі стрімкими водними потоками для підтримки дешевої гідроенергетики, ресурси урану для розвитку атомної енергетики, низький рівень заробітної плати та близькість до ринків «зеленої» сталі ЄС через порти та залізницю.

Майбутній вступ України до ЄС робить декарбонізацію металургії неминучою, одночасно відкриваючи важливі експортні ринки для безвуглецевої продукції. Хоча основні капіталовкладення для переходу України до виробництва «зеленої» сталі становлять \$62 млрд на 20-річний період, сам сектор «зеленої» сталі згенерує додатково \$164 млрд ВДВ у порівнянні з вугільно-залежною металургією, за інших рівних умов.

Змішаний енергетичний мікс допоможе збалансувати залежність відновлюваних джерел від часу та локації: сонячна енергетика, вітрова (наземна й морська), гідроенергетика та атомна енергія разом із іншими джерелами можуть стати основою інтегрованої системи без вичерпного палива.

Існує кілька шляхів досягнення майже нульових викидів до 2050 року, і жодне технологічне рішення не є ідеальним. Результати цього дослідження охоплюють такі технологічні схеми: H₂-DRI-EAF, H₂-DRI-плавильна піч-BOF та металобрухт-EAF, хоча нові рішення, як-от електроліз залізної руди, можуть відігравати роль у технологічному міксі EAF після досягнення ними достатньої зрілості. Зелені майданчики для будівництва заводів використовуватимуть найдешевші доступні ВДЕ. Хоча браунфілди старих металкомбінатів мають переваги завдяки наявній виробничій інфраструктурі, транспортним зв'язкам і місцевій кваліфікованій робочій силі, ці переваги можуть бути втрачені в контексті повоєнних руйнувань інфраструктури та вимушеного переселення людей і цілих громад. Управління ризиками, пов'язаними з «фіксацією» на наявні активи, що використовують вичерпані види палива і «замороженими активами» (тобто інфраструктура, що стане непотрібною ще до завершення свого економічного терміну служби), є критичним для шляху до декарбонізації сталеливарної галузі, з огляду на її капіталомісткість і тривалий період амортизації.

Отримані результати мають значення не лише для України (з її 21,4 млн тонн виробленої сталі, 15,7 млн тонн, з якої пішло на експорт у 2021 році), але й для інших країн-виробників залізної руди та сталі, орієнтованих на експорт: наприклад, Бразилії (36,2 млн тонн сталі, 11,5 млн тонн експорту) та В'єтнаму (23,0 млн тонн сталі, 11,2 млн тонн експорту) [105]. У

майбутніх дослідженнях, модель оптимізації ланцюгів постачання може бути адаптована до будь-якого географічного контексту та просторового охоплення. В цій праці були зроблені значні зусилля для використання специфічних для України ресурсних обмежень, геопросторових даних, вартості інфраструктури для відновлюваних джерел енергії, цін на сировину, вуглецевих цін, внутрішнього попиту на сталь та прогнозів експорту зеленої сталі, які повинні бути адаптовані для кожного конкретного випадку. Наступні дослідження можуть заглибитися у питання гнучкості інтегрованої енергетичної системи, наприклад, в контексті використання гідроенергії чи атомної енергетики як альтернативи для зберігання енергії у батареях або CGH₂ для відновлюваних джерел. Попередні висновки показують, що гнучке виробництво H₂-DRI-EAF з допустимою межею використання наявної електроенергії до 25% за ціною \$25/МВт-год зменшило рівень собівартості енергії на 27%. Нарешті, це дослідження не розглядало екологічні та соціальні проблеми, окрім зміни клімату; для екологічно чистої сталеливарної промисловості слід розробити цілісну систему оцінки її впливу на сталий розвиток, загалом.

Список використаних джерел

1. Звіт про результати аудиту ефективності отримання та використання коштів державного бюджету, отриманих відповідно до статті 8 Закону України «Про врегулювання питань, пов'язаних із ядерною безпекою». *Рахункова палата України*. 2020. URL: http://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2020/30-4_2020/Zvit_30_-4_2020.pdf.
2. Амоша А. І., Залознова Ю. С., Череватський Д. Ю. Вугільна промисловість і гібридна економіка: монографія. Київ: ІЕП НАН України, 2017. URL: https://www.researchgate.net/profile/Danylo-Cherevatskyi/publication/329522129_Coal_industry_and_hybrid_economy_Ugolnaa_promyslennost_i_gibridnaa_ekonomika/links/5c0d404e4585157ac1b6aeb1/Coal-industry-and-hybrid-economy-Ugolnaa-promyslennost-i-gibridnaa-ekonomika.pdf.
3. Аптекарь С. С., Амоша А. И. Экономические проблемы черной металлургии Украины: монография. Донецк: ДонГУЭТ, 2005. 383 с.
4. Astoria T., Hughes G., Mizutani N. MIDREX NG with H₂ Addition: Moving from natural gas to hydrogen in decarbonizing ironmaking. *Midrex*. 2022. URL: <https://www.midrex.com/tech-article/moving-from-natural-gas-to-hydrogen-in-decarbonizing-ironmaking/>.
5. Bataille C., Stiebert S., Li F. Global facility level net-zero steel pathways: technical report on the first scenarios of the Net-zero Steel Project. *IDDRI*. 2021. URL: https://netzeroindustry.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.
6. Begun T., Velikova V., Muresan M., Zaharia T., Dencheva K., Sezgin M., Bat L. Conservation and Protection of the Black Sea Biodiversity. Review of the existing and planned protected areas in the Black Sea (Bulgaria, Romania and Turkey) with a special focus on possible deficiencies regarding law enforcement and implementation of management plans. EC DG Env. MISIS Project Deliverables, Ed. ExPonto, 2012. 110 p. URL: https://www.rmri.ro/Home/Downloads/Publications.Deliverables/MPA_Conservation.pdf.
7. Bhaskar A., Abhishek R., Assadi M., Somehesaraei H. N. Decarbonizing primary steel production: techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 350. Art. 131339/ DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>.
8. Biersack, J., O'Lear, S. The geopolitics of Russia's annexation of Crimea: narratives, identity, silences, and energy. *Eurasian Geography and Economics*. 2014. Vol. 55 (3). P. 247–269. DOI: <https://doi.org/10.1080/15387216.2014.985241>.
9. Black Iron is a TSX-listed, Canada-based company with a globally top-ranked iron ore project in Ukraine. *Black Iron*. 2023. URL: <https://blackiron.com/project-overview/>.
10. A DFI for the reconstruction of Ukraine – overview. *BlackRock*. 2023. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/64931249dc66515444cf9379_BlackRock_FMA_Ukraine_Development_Fund_DFI_for_the_reconstruction.pdf.
11. Бойко І. Металурги залишаються одними з найбільших платників податків в Україні. *УНІАН*. 2022. URL: <https://www.unian.ua/economics/finance/metalurgi-zalishayutsya-odnimi-z-naybilshih-platnikov-podatkov-v-ukrajini-eksperti-novini-ukrajina-11692747.html>.
12. The statistical review of world energy. 71st edition. *BP*. 2022. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
13. Cavaliere P. Electrolysis of iron ores: most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. In: Cavaliere, P. (Ed.). *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes: Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement*. Springer International Publishing. 2019. P. 555–576. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_10.
14. DeepStateMap. 2023, June. *DeepState, U.A*. URL: <https://deepstatemap.live/en#10/47.2135/34.9901>.
15. DeSantis D., James B. D., Houchins C., Saur G., Lyubovsky M. Cost of long-distance energy transmission by different carriers. *iScience*. 2021. Vol. 24 (12). Art. 103495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103495>.
16. Devlin A., Yang A. Regional supply chains for decarbonising steel: energy efficiency and green premium mitigation. *Energy Convers. Manag.* 2022. Vol. 254. Art. 115268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115268>.
17. Devlin A., Kossen J., Goldie-Jones H., Yang A. Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. *Nature Communications*. 2023. Vol. 14 (1). Art. 2578. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38123-2>.
18. Resources and energy quarterly: march 2023. *Department of Industry, Science and Resources*. 2023. URL: <https://www.industry.gov.au/publications/resources-and-energy-quarterly-march-2023>.
19. Економічна статистика: національні рахунки (різні роки). 1990-2021. *Державна служба статистики України*. URL: https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/nac_r.htm.
20. Статистичний щорічник України. *Державна служба статистики України*. 2021. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/11/Yearbook_21_e.pdf.
21. Виробництво та розподіл валового внутрішнього продукту за видами економічної діяльності (різні роки). *Державна служба статистики України*. 2008. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2008/vvp/vvp_ric/arh_vtr_u.htm.
22. European-scale project: DTEK has launched the 240 MW Pokrovska SPP. *DTEK*. 2019. URL:

<https://dtek.com/en/media-center/news/proekt-evropeyskogo-masshtabu-dtek-zapustiv-pokrovsku-ses-potuzhnistyu-240-mvt/>.

23. DTEK opens wind farm in Ukraine amid war to build back greener after Russian attacks. *DTEK*. 2023. URL: <https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-opens-wind-farm-in-ukraine-amid-war-to-build-back-greener-after-russian-attacks-/>.

24. A green deal industrial plan for the net-zero age. *European Commission*. 2023. URL: https://commission.europa.eu/system/files/2023-02/COM_2023_62_2_EN_ACT_A%20Green%20Deal%20Industrial%20Plan%20for%20the%20Net-Zero%20Age.pdf.

25. National report of Ukraine 2020. *Extractive Industries Transparency Initiative*. 2020. URL: https://eiti.org/sites/default/files/attachments/en_2020_ukraine_eiti_report.pdf.

26. Carbon price Tracker. *Ember*. 2023. URL: <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>.

27. Erbach G., Foukalovar N. Review of the EU ETS 'Fit for 55' package. *European Parliamentary Research Service*. 2023. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS_BRI\(2022\)698890_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS_BRI(2022)698890_EN.pdf).

28. 'Let's reach for the stars': EU aims for green hydrogen below €2/kg by 2030. *EurActiv*. 2021. URL: <https://www.euractiv.com/section/eet/news/lets-reach-for-the-stars-eu-aims-for-green-hydrogen-below-e2-kg-by-2030/>.

29. EU ETS revision: benchmarks and CBAM free allocation phase out Impact assessment on the EU steel industry. *Eurofer: The European Steel Association*. 2021. URL: https://www.eurofer.eu/assets/publications/position-papers/joint-statement-by-energy-intensive-sectors-on-cbam/202111_CBAM_ETS-impact_EU-steel-industry.pdf.

30. European steel in Figures 2022. *Eurofer: The European Steel Association*. 2022. URL: <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/European-Steel-in-Figures-2022-v2.pdf>.

31. EU Statement regarding Russia's unprovoked and unjustified military aggression against Ukraine. *European Union*. 2022. URL: https://www.eeas.europa.eu/eeas/eu-statement-regarding-russia%E2%80%99s-unprovoked-and-unjustified-military-aggression-against-ukraine_en.

32. REPowerEU: joint European action for more affordable, secure and sustainable energy. *European Union*. 2022. URL: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/871871/Factsheet%20-%20REPowerEU.pdf.pdf>.

33. Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables. Office for Official Publications of the European Communities. *Eurostat*. 2008. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902113/KS-RA-07-013-EN.PDF.pdf/b0b3d71e-3930-4442-94be-70b36cea9b39?t=1414781402000>.

34. Gas data for non-household consumers – bi-annual data (from 2007 onwards). *Eurostat*. 2023. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_203custom_6296695/default/table?lang=en.

35. Fan Z., Friedmann S. J. Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. *Joule*. 2021. Vol. 5 (4). P. 829–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.

36. «Укрзалізниця» розраховує отримати 11 млрд грн від підвищення вантажних тарифів. Які наслідки для бізнесу. *Forbes UA*. 2022. 29 червня. URL: <https://forbes.ua/inside/ukrzaliznitsya-rozrachovue-otrimati-11-blrd-grn-vid-pidvischennja-vantazhnyh-tarifiv-jaki-naslidky-dlja-biznesu>.

otrimati-11-blrd-grn-vid-pidnyattya-vantazhnykh-tarifiv-mayzhe-polovinu-zaplatyat-akhmetov-i-agrarii-yaki-naslidki-dlya-biznesu-29062022-6863.

37. Friedl M., Sulla-Menashe D. MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua land cover Type yearly L3 global 500m. SIN grid. *NASA LP DAAC*. 2015. DOI: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.

38. Global blast furnace Tracker. *GEM*. 2023. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-blast-furnace-tracker/>.

39. Global hydropower Tracker. *GEM*. 2023. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/>.

40. Global nuclear power Tracker. *GEM*. 2023. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-nuclear-power-tracker/>.

41. Global steel plant Tracker. *GEM*. 2023. URL: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>.

42. 3 початку року ціни на брут зросли на 1,7 тис. грн – «УкрМет». *GEM*. 2021. URL: <https://gmk.center.ua/news/z-pochatku-roku-cini-na-bruht-zrosli-na-1-7-tis-grn-ukrmet/>.

43. Iron ore. *GMK*. 2023. URL: https://gmk.center/en/product_type/iron-ore/.

44. Gorodnichenko Y., Sologoub I., Weder Di. (Eds.). Rebuilding Ukraine: Principles and policies. Paris Report 1. *CEPR Press*. 2022. 467 p. URL: <https://cepr.org/publications/books-and-reports/rebuilding-ukraine-principles-and-policies>.

45. On course for large-scale production from 2025. *H2 Green Steel*. 2022. URL: <https://www.h2greensteel.com/articles/on-course-for-large-scale-production-from-2025>.

46. Hasanbeigi A. An International benchmarking of energy and CO₂ Intensities. *Steel Climate Impact*. 2022. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>.

47. Hasanbeigi A., Sibal A. (2023). What is Green Steel? Definitions and sScopes from Standards, Initiatives, and Policies around the World. *Global Efficiency Intelligence*. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/63c7a01f9d1a8a63a4b5a1b5/1674027071700/Whats+Green+Steel+-+18Jan2023.pdf>.

48. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horanyi A. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. P. 1998–2049. DOI: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.

49. Holmgren W., Hansen C., Mikofski M. Pvlip python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*. 2018. Vol. 3(29). Art. no. 884. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.

50. Ukraine energy profile. *International Energy Agency*. 2021. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac51678f-5069-4495-9551-87040cb0c99d/UkraineEnergyProfile.pdf>.

51. World Energy Outlook 2022. *International Energy Agency*. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.

52. Simplified levelised cost of competing low-carbon technologies in chemicals production. *International Energy Agency*. 2020. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/simplified-levelised-cost-of-competing-low-carbon-technologies-in-chemicals-production>.

53. Achieving net zero Heavy industry sectors in G7 members. *International Energy Agency*. 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>.

54. Investment Guide Ukraine. *Ministry of Economy of Ukraine*. Kyiv: School of Economics, 2024. 240 p. URL: [https://cdn.prod.website-files.com/621f88db25bf24758792dd8/666b35cf2dc77cc050e252fa_Ukraine%20Investment%20Guide%202024_compressed%20\(1\).pdf](https://cdn.prod.website-files.com/621f88db25bf24758792dd8/666b35cf2dc77cc050e252fa_Ukraine%20Investment%20Guide%202024_compressed%20(1).pdf).
55. Interpipe report for the united nations global Compact on the results achieved and progress in 2021. *Interpipe*. 2021. URL: https://interpipe.biz/uploads/block-files/66ed3e5596976_2022_INTERPIPEreportfortheUnitedNations2021ENG.pdf.
56. Kim W., Sohn I. Critical challenges facing low carbon steelmaking technology using hydrogen direct reduced iron. *Joule*. 2022. Vol. 6 (10). P. 2228–2232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.010>.
57. Research of the impact on the economy of Ukraine from the introduction of CBAM by the European Union. *Kyiv School of Economics*. 2021. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2021/12/ENG_20211115-KSE_CBAM_for-publication.pdf.
58. Kudria S. (Ed.). Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine: History, Today and Prospect. Kyiv: Institute of Renewable Energy of NAS of Ukraine, 2020. 113 p. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/ENG-book_30.11.2020.pdf.
59. Kudria S., Ivanchenko I., Tuchynskiy B., Petrenko K., Karmazin O., Riepin O. Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46 (1). P. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.211>.
60. Kulu H., Christison S., Liu C., Mikolai J. The war, refugees, and the future of Ukraine's population. *Population, Space and Place* 2023. Vol. 29 (4), e2656. DOI: <https://doi.org/10.1002/psp.2656>.
61. Leontief W. Input-output economics. *Oxford University Press*, 1966. URL: https://books.google.co.uk/books/about/Input_output_Economics.html?id=hBDEXbIq6HsC&redir_esc=y.
62. Leontief W. Input-output analysis. *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Macmillan UK, 2008. P. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_1072-2.
63. Lopez G., Farfan J., Breyer C. Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 375. Art. no. 134182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134182>.
64. Lopez G., Galimova T., Fasihi M., Bogdanov D., Breyer C. Towards defossilised steel: supply chain options for a green European steel industry. *Energy*. 2023. Vol. 273. Art. no. 127236. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127236>.
65. McCann P. Modern Urban and Regional Economics. Oxford University Press, 2013.
66. Щорічний національний інвентаризаційний звіт для подання згідно з Рамковою конвенцією ООН зі зміни клімату та Кіотським протоколом. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. 2023. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/03/Kadastr_2023.pdf.
67. Sustainability report 2020. *Metinvest*. 2020. URL: https://metinvestholding.com/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest_2020_SR-Eng-Web.pdf.
68. Steel transition strategies. *Mission Possible Partnership*. URL: <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>.
69. Munroe D. K., Biles J. J. Regional Science. In: Kempf-Leonard, K. (Ed.). *Encyclopedia of Social Measurement*. 2005. Vol. 3. P. 325–335. Elsevier Inc.
70. Mykhnenko V. Causes and consequences of the war in eastern Ukraine: an economic geography perspective. *Europe-Asia Studies*. 2020. Vol. 72 (3). P. 528–560. DOI: <https://doi.org/10.1080/09668136.2019.1684447>.
71. Інфляційний звіт. *Національний банк України*. 2023. URL: https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/IR_2023-Q1.pdf?v=4.
72. Ukraine's national recovery plan. *National recovery Council*. 2022. URL: https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25bf24758792dd8/62c166751fcf41105380a733_NRC%20Ukraine%27s%20Recovery%20Plan%20blueprint_ENG.pdf.
73. Nayak-Luke R., Forbes C., Cesaro Z., Bañares-Alcántara R., Rouwenhorst K. Chapter 8-techno-economic aspects of production, storage and distribution of ammonia. In: Valera-Medina A., Banares-Alcantara R. (Eds.). *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as an Energy Vector*. Academic Press, 2021. P. 191–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00008-4>.
74. Про встановлення тарифів на розподіл електричної енергії та тарифів на постачання електричної енергії ПрАТ «УКРГІДРОЕНЕРГО»: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг України, від 12 грудня 2018 р. №1902. URL: <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-tarifiv-na-vidpusk-elektrichnoi-enerгии-prat-ukrgidroenergo-na-2019-rik>.
75. Про встановлення тарифу на послуги з передачі електричної енергії НЕК «УКРЕНЕРГО»: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг України, від 21.12.2022 р. №1788. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1788874-22?lang=en#Text>.
76. Normann F., Skagestad R., Biermann M., Wolf J., Mathisen A. The CO2stCap Project – Reducing the Cost of Carbon Capture in Process Industry. *Chalmers University of Technology*. 2019. URL: <https://www.sintef.no/contentassets/39f1dfcc7a80403580f5f784e16484a2/final-report-co2stcap.pdf>.
77. Effective carbon rates 2021. *The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)*. 2021. URL: <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-highlights-brochure.pdf>.
78. Input-output analytical tables: guidance for use. *UK Office for National Statistics*. 2022. URL: <https://www.ons.gov.uk/economy/nationalaccounts/supplementaryandusertables/articles/inputoutputanalyticaltables/guidanceforuse>.
79. Otto A., Robinius M., Grube T., Schiebahn S., Praktikno A., Stolten D. Power-to-Steel: reducing CO₂ through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. *Energies*. 2017. Vol. 10 (4). Art. no. 451. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10040451>.
80. Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources Conservation and Recycling*, 71, pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.008>.
81. Pimm, A. J., Cockerill, T. T., Gale, W. F. Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 312. Art. no. 127665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>.
82. World Database on Protected areas (WDPA). *Protected Planet*. 2023. URL: <https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab=WDPA>.

83. Salmon N., Bañares-Alcántara R. Impact of grid connectivity on cost and location of green ammonia production: Australia as a case study. *Energy & Environmental Science*. 2021. Vol. 14 (73). P. 6655–6671. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1EE02582A>.
84. Salmon N., Bañares-Alcántara R. A global, spatially granular techno-economic analysis of offshore green ammonia production. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 367. Art. no. 133045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133045>.
85. Shatokha V. The sustainability of the iron and steel industries in Ukraine: challenges and opportunities. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. Vol. 2 (2). P. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0036-2>.
86. Shatokha V. Modeling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29 (10). P. 1851–1861. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2474-8>.
87. Shatokha V., Matukhno E., Belokon K., Shmatkov G. Potential Means to reduce CO₂ emissions of iron and steel industry in Ukraine using best available technologies. *Journal of Sustainable Metallurgy* 2020. Vol. 6 (3). P. 451–462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00289-0>.
88. Ports. *Shipnext*. 2023. URL: <https://shipnext.com/port/>.
89. HYBRIT: milestone reached – pilot facility for hydrogen storage up and running. *SSAB*. 2022. URL: <https://www.ssab.com/en-gb/news/2022/09/hybrit-milestone-reached-pilot-facility-for-hydrogen-storage-up-and-running>.
90. Sundqvist M., Biermann M., Normann F., Larsson M., Nilsson L. Evaluation of low and high level integration options for carbon capture at an integrated iron and steel mill. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2018. Vol. 77. P. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.07.008>.
91. Swalec C., Grigsby-Schulte A. Pedal to the metal. *Global Energy Monitor*. 2023. URL: https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/07/GEM_Steel_Plants2023.pdf.
92. Toktarova A., Walter V., Göransson L., Johnson F. Interaction between electrified steel production and the north European electricity system. *Applied Energy*. 2022. Vol. 310. Art. no. 118584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118584>.
93. Trollip H., McCall B., Bataille C. How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Climate Policy*. 2022. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>.
94. Gillula J. W. The Reconstructed 1972 Input-Output Tables for Eight Soviet Republics. Foreign Economic Report No. 19. U.S. Department of Commerce, Bureau of the Census, 1982.
95. Vogl V., Ehman M., Nilsson L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, pp. 736–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>.
96. Wang P., Ryberg M., Yang Y., Feng K., Kara S., Hauschild M., Chen W.-Q. Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communication*. 2021. Art. no. 2066. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>.
97. Wang C., Walsh S., Weng Z., Haynes M., Summerfield D., Feitz A. Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48. Issue 83. P. 32277–32293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.041>.
98. Way R., Ives M. C., Mealy P., Farmer J. D. Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Joule*. 2022. Vol. 6 (9). P. 2057–2082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>.
99. Technical potential for offshore wind in Ukraine. *The World Bank Group*. 2020. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/709391586844502062/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Ukraine-Map.pdf>.
100. Commodity price data (the Pink sheet). *The World Bank Group*. 2022. URL: <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>.
101. Ukraine rapid damage and needs assessment : February 2022–February 2023. *The World Bank Group, the Government of Ukraine, the European Union services, and the United Nations*. 2023. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/pdf/P1801740d1177f03c0ab180057556615497.pdf>.
102. Median construction times for reactors since 1981. *World Nuclear Association*. 2020. URL: <https://www.world-nuclear.org/gallery/world-nuclear-performance-report-gallery/median-construction-times-for-reactors-since-1981.aspx>.
103. Decommissioning nuclear facilities. *World Nuclear Association*. 2022. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx#:~:text=Generally%20speaking%2C%20early%20nuclear%20plants,to%2060%20year%20operating%20life>.
104. World steel in Figures. *World Steel Association*. 2021. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2021-World-Steel-in-Figures.pdf>.
105. World steel in Figures. *World Steel Association*. 2022. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>.
106. Fact sheet: steel and raw materials. *World Steel Association*. 2023. URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023.pdf>.
107. Zagoruichyk A., Savytskyi O., Kopytsia I., O’Callaghan B. The Green Phoenix Framework: Climate-positive Plan for Economic Recovery of Ukraine. Smith School Working Paper 23-03. 2023. URL: <https://www.smithschool.ox.ac.uk/sites/default/files/2023-06/The-Green-Phoenix-Framework-a-climate-positive-plan-for-economic-recovery-in-Ukraine.pdf>.

References

1. Zvit pro rezultaty audytu efektyvnosti otrymannia ta vykorystannia koshtiv derzhavnoho biudzhetu, otrymanykh vidpovidno do statti 8 Zakonu Ukrainy «Pro vrehuliuvannia pytan, poviazanykh iz yadernoiu bezpekoiu» [Report on the results of the audit of the efficiency of receiving and using funds from the state budget, obtained in accordance with Article 8 of the Law of Ukraine 'On the Regulation of Issues Related to Nuclear Safety']. (2020). Accounting Chamber of Ukraine. Retrieved from http://rp.gov.ua/upload-files/Activity/Collegium/2020/30-4_2020/Zvit_30-4_2020.pdf [in Ukrainian].
2. Amosha, A. I., Zaloznova, Yu. S., Cherevatskyi, D. Yu. (2017). Vuhilna promyslovisť i hibrydna ekonomika [Coal Industry and the Hybrid Economy]. Kyiv: IIE of NAS of Ukraine. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Danylo-Cherevatskyi/publication/329522129_Coal_industry_and_hybrid_economy_Ugolnaa_promyslennost_i_gibridnaa_ekonomika/links/5c0d404e4585157ac1b6aeb1/Coal-industry-and-hybrid-

economy-Ugolnaa-promyslennost-i-gibridnaa-ekonomika.pdf [in Ukrainian].

3. Aptekar', S. S., Amosha, A. I. (2005). Ekonomicheskiye problemy chernoy metallurgii Ukrainy [Economic problems of ferrous metallurgy of Ukraine]. Donetsk, DonGUET. 383 p. [in Russian].

4. Astoria, T., Hughes, G., Mizutani, N. (2022). MIDREX NG with H₂ Addition: Moving from natural gas to hydrogen in decarbonizing ironmaking. *Midrex*. Retrieved from <https://www.midrex.com/tech-article/moving-from-natural-gas-to-hydrogen-in-decarbonizing-ironmaking/>.

5. Bataille, C., Stiebert, S., Li, F. (2021). Global facility level net-zero steel pathways: technical report on the first scenarios of the Net-zero Steel Project. *IDDRI*. Retrieved from https://netzeroindustry.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf.

6. Begun, T., Velikova, V., Muresan, M., Zaharia, T., Dencheva, K., Sezin, M., Bat, L. (2012). Conservation and Protection of the Black Sea Biodiversity. Review of the existing and planned protected areas in the Black Sea (Bulgaria, Romania and Turkey) with a special focus on possible deficiencies regarding law enforcement and implementation of management plans. EC DG Env. MISIS Project Deliverables, Ed. ExPonto. 110 p. Retrieved from https://www.rmri.ro/Home/Downloads/Publications/Deliverables/MPA_Conservation.pdf.

7. Bhaskar, A., Abhishek, R., Assadi, M., Somehesaraei, H. N. (2022). Decarbonizing primary steel production: techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131339. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339>.

8. Biersack, J., O'Lear, S. (2014). The geopolitics of Russia's annexation of Crimea: narratives, identity, silences, and energy. *Eurasian Geography and Economics*, 55 (3), pp. 247–269. DOI: <https://doi.org/10.1080/15387216.2014.985241>.

9. Black Iron is a TSX-listed, Canada-based company with a globally top-ranked iron ore project in Ukraine. (2023). *Black Iron*. Retrieved from <https://blackiron.com/project-overview/>.

10. A DFI for the reconstruction of Ukraine – overview. (2023). *BlackRock*. Retrieved from https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/64931249dc66515444cf9379_BlackRock_FMA_Ukraine_Development_Fund_DFI_for_the_reconstruction.pdf.

11. Boiko, I. (2022). Metalurhy zalyshaiutsia odnymy z naibilshykh platnykiv podatniv v Ukraini [Metallurgists remain among the largest taxpayers in Ukraine]. *www.unian.ua*. <https://www.unian.ua/economics/finance/metalurgi-zalishayutsya-odnimi-z-naybilshih-platnykiv-podatniv-v-ukrajini-eksperti-novini-ukrajina-11692747.html> [in Ukrainian].

12. The statistical review of world energy. 71st edition. (2022). *BP*. Retrieved from <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.

13. Cavaliere, P. (2019). Electrolysis of iron ores: most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. In: Cavaliere, P. (Ed.). *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes: Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement*. Springer International Publishing, pp. 555–576. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_10.

14. DeepStateMap. (2023, June). *DeepState, U.A.* Retrieved from <https://deepstatemap.live/en#10/47.2135/34.9901>.

15. DeSantis, D., James, B.D., Houchins, C., Saur, G., Lyubovsky, M. (2021). Cost of long-distance energy transmission by different carriers. *iScience*, 24 (12), 103495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103495>.

16. Devlin, A., Yang, A. (2022). Regional supply chains for decarbonising steel: energy efficiency and green premium mitigation. *Energy Convers. Manag.*, 254, 115268. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115268>.

17. Devlin, A., Kossen, J., Goldie-Jones, H., Yang, A. (2023). Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high quality renewable energy and iron ore deposits. *Nature Communications*, 14 (1), 2578. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38123-2>.

18. Resources and energy quarterly: march 2023. (2023). *Department of Industry, Science and Resources*. Retrieved from <https://www.industry.gov.au/publications/resources-and-energy-quarterly-march-2023>.

19. Ekonomichna statystyka: natsionalni rakhunky (rizni roky). 1990–2021 [Economic statistics: National Accounts (Various Years). 1990–2021]. *State Statistics Service of Ukraine*. Retrieved from https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/nac_r.htm [in Ukrainian].

20. Statystychnyi shchorichnyk Ukrainy [Statistical Yearbook of Ukraine]. (2021). *State Statistics Service of Ukraine*. Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2022/zb/11/Yearbook_21_e.pdf [in Ukrainian].

21. Vyrobnystvo ta rozpodil valovoho vnutrishnoho produktu za vydamy ekonomichnoi diialnosti (rizni roky) [Production and distribution of gross domestic product by types of economic activity (Various Years)]. (2008). *State Statistics Service of Ukraine*. Retrieved from https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2008/vvp/vvp_ric/arh_vtr_u.htm [in Ukrainian].

22. European-scale project: DTEK has launched the 240 MW Pokrovska SPP. (2019). *DTEK*. Retrieved from <https://dtek.com/en/media-center/news/proekt-evropeyskogo-masshtabu-dtek-zapustiv-pokrovsku-ses-potuzhnisty-240-mvt/>.

23. DTEK opens wind farm in Ukraine amid war to build back greener after Russian attacks. (2023). *DTEK*. Retrieved from <https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-opens-wind-farm-in-ukraine-amid-war-to-build-back-greener-after-russian-attacks/>.

24. A green deal industrial plan for the net-zero age. (2023). *European Commission*. Retrieved from https://commission.europa.eu/system/files/2023-02/COM_2023_62_2_EN_ACT_A%20Green%20Deal%20Industrial%20Plan%20for%20the%20Net-Zero%20Age.pdf.

25. National report of Ukraine 2020. (2020). *Extractive Industries Transparency Initiative*. Retrieved from https://eiti.org/sites/default/files/attachments/en_2020_ukraine_eiti_report.pdf.

26. Carbon price Tracker. (2023). *Ember*. Retrieved from <https://ember-climate.org/data/data-tools/carbon-price-viewer/>.

27. Erbach, G., Foukalovar, N. (2023). Review of the EU ETS 'Fit for 55' package. *European Parliamentary Research Service*. Retrieved from [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS_BRI\(2022\)698890_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2022/698890/EPRS_BRI(2022)698890_EN.pdf).

28. 'Let's reach for the stars': EU aims for green hydrogen below €2/kg by 2030. (2021). *EurActiv*. Retrieved from <https://www.euractiv.com/section/eet/news/lets-reach-for-the-stars-eu-aims-for-green-hydrogen-below-e2-kg-by-2030/>.

29. EU ETS revision: benchmarks and CBAM free allocation phase out Impact assessment on the EU steel industry. (2021). *Eurofer: The European Steel Association*. Retrieved from <https://www.eurofer.eu/assets/>

- publications/position-papers/joint-statement-by-energy-intensive-sectors-on-cbam/202111_CBAM_ETS-impact_EU-steel-industry.pdf.
30. European steel in Figures 2022. (2022). *Eurofer. The European Steel Association*. Retrieved from <https://www.eurofer.eu/assets/publications/brochures-booklets-and-factsheets/european-steel-in-figures-2022/European-Steel-in-Figures-2022-v2.pdf>.
31. EU Statement regarding Russia's unprovoked and unjustified military aggression against Ukraine. (2022). *European Union*. Retrieved from https://www.eeas.europa.eu/eeas/eu-statement-regarding-russia%E2%80%99s-unprovoked-and-unjustified-military-aggression-against-ukraine_en.
32. REPowerEU: joint European action for more affordable, secure and sustainable energy. (2022). *European Union*. Retrieved from [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/871871/Factsheet%20-%20REPower EU.pdf.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/871871/Factsheet%20-%20REPower%20EU.pdf.pdf).
33. Eurostat Manual of Supply, Use and Input-Output Tables. Office for Official Publications of the European Communities. (2008). *Eurostat*. Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/5902113/KS-RA-07-013-EN.PDF.pdf/b0b3d71e-3930-4442-94be-70b36cea9b39?t=1414781402000>.
34. Gas data for non-household consumers – bi-annual data (from 2007 onwards). (2023). *Eurostat*. Retrieved from https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_PC_203custom_6296695/default/table?lang=en.
35. Fan, Z., Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 5 (4), pp. 829–862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>.
36. «Ukrzaliznytsia» rozrakhovue otrymaty 11 mlrd hrv vid pidniattia vantazhnykh taryfiv. Yaki naslidky dlia biznesu [«Ukrzaliznytsia» expects to receive UAH 11 billion from the increase in freight tariffs. What are the implications for business]. (2022, 29 June). *Forbes UA*. Retrieved from <https://forbes.ua/inside/ukrzaliznytsya-rozrakhovue-otrimati-11-mlrd-grn-vid-pidnyattya-vantazhnykh-tarifiv-mayzhe-polovinu-zaplatyat-akhmetov-i-agrarii-yaki-naslidki-dlya-biznesu-29062022-6863>.
37. Friedl, M., Sulla-Menashe, D. (2015). MCD12Q1 MODIS/Terra+Aqua land cover Type yearly L3 global 500m. SIN grid. *NASA LP DAAC*. DOI: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD12Q1.006>.
38. Global blast furnace Tracker. (2023). *GEM*. Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-blast-furnace-tracker/>.
39. Global hydropower Tracker. (2023). *GEM*. Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-hydropower-tracker/>.
40. Global nuclear power Tracker. (2023). *GEM*. Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-nuclear-power-tracker/>.
41. Global steel plant Tracker. (2023). *GEM*. Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>.
42. Z pochatku roku tsiny na brukht zrosly na 1,7 tys. hrn – «UkrMet» [Since the beginning of the year, scrap prices have increased by UAH 1.7 thousand – «UkrMet»]. (2021). *GEM*. Retrieved from <https://gmcenter.ua/news/z-pochatku-roku-cini-na-bruht-zrosli-na-1-7-tis-grn-ukrmet/> [in Ukrainian].
43. Iron ore. (2023). *GMK*. URL: Retrieved from https://gmcenter/en/product_type/iron-ore/.
44. Gorodnichenko, Y., Sologoub, I., Weder Di. (Eds.). (2022). Rebuilding Ukraine: Principles and policies. Paris Report 1. *CEPR Press*. Retrieved from <https://cepr.org/publications/books-and-reports/rebuilding-ukraine-principles-and-policies>.
45. On course for large-scale production from 2025. (2022). *H2 Green Steel*. Retrieved from <https://www.h2greensteel.com/articles/on-course-for-large-scale-production-from-2025>.
46. Hasanbeigi, A. (2022). An International benchmarking of energy and CO₂ Intensities. *Steel Climate Impact*. Retrieved from <https://www.globalefficiencyintel.com/steel-climate-impact-international-benchmarking-energy-co2-intensities>.
47. Hasanbeigi, A., Sibal, A. (2023). What is Green Steel? Definitions and sScopes from Standards, Initiatives, and Policies around the World. *Global Efficiency Intelligence*. Retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/63c7a01f9d1a8a63a4b5a1b5/1674027071700/Whats+Green+Steel-+18Jan2023.pdf>.
48. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horanyi, A., et al. (2020). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146, pp. 1998–2049. DOI: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>.
49. Holmgren, W., Hansen, C., Mikofski, M. (2018). Pvlb python: a python package for modeling solar energy systems. *Journal of Open Source Software*, Vol. 3(29), Art. no. 884. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.00884>.
50. Ukraine energy profile. (2021). *International Energy Agency*. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac51678f-5069-4495-9551-87040cb0c99d/UkraineEnergyProfile.pdf>.
50. Ukraine energy profile. (2021). *International Energy Agency*. Retrieved from <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ac51678f-5069-4495-9551-87040cb0c99d/UkraineEnergyProfile.pdf>.
51. World Energy Outlook 2022. (2022). *International Energy Agency*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>.
52. Simplified levelised cost of competing low-carbon technologies in chemicals production. (2020). *International Energy Agency*. Retrieved from <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/simplified-levelised-cost-of-competing-low-carbon-technologies-in-chemicals-production>.
53. Achieving net zero Heavy industry sectors in G7 members. (2022). *International Energy Agency*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-se ctors-in-g7-members>.
54. Investment Guide Ukraine. (2024). *Ministry of Economy of Ukraine*. Kyiv, School of Economics. 240 p. Retrieved from [https://cdn.prod.website-files.com/621f88db25fbf24758792dd8/666b35cf2dc77cc050e252fa_Ukraine%20Investment%20Guide%202024_compressed%20\(1\).pdf](https://cdn.prod.website-files.com/621f88db25fbf24758792dd8/666b35cf2dc77cc050e252fa_Ukraine%20Investment%20Guide%202024_compressed%20(1).pdf).
55. Interpipe report for the united nations global Compact on the results achieved and progress in 2021. (2021). *Interpipe*. Retrieved from https://interpipe.biz/uploads/block-files/66ed3e5596976_2022_INTERPIPE_reportfortheUnitedNations2021ENG.pdf.
56. Kim, W., Sohn, I. (2022). Critical challenges facing low carbon steelmaking technology using hydrogen direct reduced iron. *Joule*, 6 (10), pp. 2228–2232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.010>.
57. Research of the impact on the economy of Ukraine from the introduction of CBAM by the European Union. (2021). *Kyiv School of Economics*. Retrieved from https://kse.ua/wp-content/uploads/2021/12/ENG_20211115-KSE_CBAM_for-publication.pdf.
58. Kudria, S. (Ed.). (2020). Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine: History, Today and Prospect. Kyiv, Institute of Renewable

Energy of NAS of Ukraine. 113 p. Retrieved from https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/ENG-book_30.11.2020.pdf.

59. Kudria, S., Ivanchenko, I., Tuchynskyi, B., Petrenko, K., Karmazin, O., Riepin, O. (2021). Resource potential for wind-hydrogen power in Ukraine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (1), pp. 157–168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.211>.

60. Kulu, H., Christison, S., Liu, C., Mikolai, J. (2023). The war, refugees, and the future of Ukraine's population. *Population, Space and Place*, 29 (4), e2656. DOI: <https://doi.org/10.1002/psp.2656>.

61. Leontief, W. (1966). Input-output economics. *Oxford University Press*. Retrieved from https://books.google.co.uk/books/about/Input_output_Economics.html?id=hBDEXblq6HsC&redir_esc=y.

62. Leontief, W. (2008). Input–output analysis. *The New Palgrave Dictionary of Economics*. (pp. 1–8). Macmillan UK. DOI: https://doi.org/10.1057/978-1-349-95121-5_1072-2.

63. Lopez, G., Farfan, J., Breyer, C. (2022). Trends in the global steel industry: Evolutionary projections and defossilisation pathways through power-to-steel. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 375, Art. no. 134182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134182>.

64. Lopez, G., Galimova, T., Fasihi, M., Bogdanov, D., Breyer, C. (2023). Towards defossilised steel: supply chain options for a green European steel industry. *Energy*, Vol. 273, Art. no. 127236. DOI: <http://.org/10.1016/j.energy.2023.127236>.

65. McCann, P. (2013). Modern Urban and Regional Economics. Oxford University Press.

66. Shchorichnyi natsionalnyi inventaryzatsiyni zvit dlia podannya zghidno z Ramkovoiu konventsiiei OON zi zmi-ny klimatu ta Kiotskym protokolom [Annual national Inventory report for Submission under the united nations framework convention on climate change and the Kyoto Protocol]. (2023). *Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine*. Retrieved from https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/03/Kadastr_2023.pdf [in Ukrainian].

67. Sustainability report 2020. (2020). *Metinvest*. Retrieved from https://metinvestholding.com/upload/sr-2020/assets/pdf/Metinvest_2020_SR-Eng-Web.pdf.

68. Steel transition strategies. *Mission Possible Partnership*. Retrieved from <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>.

69. Munroe, D. K., Biles, J. J. (2005). Regional Science. In: Kempf-Leonard, K. (Ed.). *Encyclopedia of Social Measurement*, Vol. 3, pp. 325–335. Elsevier Inc.

70. Mykhnenko, V. (2020). Causes and consequences of the war in eastern Ukraine: an economic geography perspective. *Europe-Asia Studies*, 72 (3), pp. 528–560. DOI: <https://doi.org/10.1080/09668136.2019.1684447>.

71. Inflatsiyni zvit [Inflation report]. (2023). *National Bank of Ukraine*. Retrieved from https://bank.gov.ua/admin_uploads/article/IR_2023-Q1.pdf?v=4 [in Ukrainian].

72. Ukraine's national recovery plan. (2022). *National recovery Council*. Retrieved from https://uploads-ssl.webflow.com/621f88db25fbf24758792dd8/62c166751fcf41105380a733_NRC%20Ukraine%27s%20Recovery%20Plan%20blueprint_ENG.pdf.

73. Nayak-Luke, R., Forbes, C., Cesaro, Z., Bañares-Alcántara, R., Rouwenhorst, K. (2021). Chapter 8-techno-economic aspects of production, storage and distribution of ammonia. In: Valera-Medina, A., Banares-Alcantara, R. (Eds.). *Techno-Economic Challenges of Green Ammonia as*

an Energy Vector. (pp. 191–207). Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00008-4>.

74. Pro vstanovlennia taryfiv na rozpodil elektrychnoi enerhii ta taryfiv na postachannia elektrychnoi enerhii PrAT «UKRHIDROENERHO»: Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh Ukrainy, vid 12 hrudnia 2018 r. №1902 [On establishing tariffs for the distribution of electricity and tariffs for the supply of electricity by PJSC “UKRGIDROENERGO”: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors of Ukraine, dated December 12, 2018 No. 1902]. Retrieved from <https://www.nerc.gov.ua/acts/pro-vstanovlennya-taryfiv-na-vidpusk-elektrichnoi-enerhii-prat-ukrgidroenergo-na-2019-rik> [in Ukrainian].

75. Pro vstanovlennia taryfiv na rozpodil elektrychnoi enerhii ta taryfiv na postachannia elektrychnoi enerhii NEK «UKRENERHO»: Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne rehuliuвання u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh Ukrainy, vid 21.12.2022 r. №1788 [On establishing tariffs for the distribution of electricity and tariffs for the supply of electricity by NPC "UKRENERGO": Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors of Ukraine, dated December 21, 2022 No. 1788]. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1788874-22?lang=en#Text> [in Ukrainian].

76. Normann, F., Skagestad, R., Biermann, M., Wolf, J., Mathisen, A. (2019). The CO2stCap Project – Reducing the Cost of Carbon Capture in Process Industry. *Chalmers University of Technology*. Retrieved from <https://www.sintef.no/contentassets/39f1dfcc7a80403580f5f784e16484a2/final-report-co2stcap.pdf>.

77. Effective carbon rates 2021. (2021). *The Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)*. Retrieved from <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/effective-carbon-rates-2021-highlights-brochure.pdf>.

78. Input-output analytical tables: guidance for use. (2022). *UK Office for National Statistics*. Retrieved from <https://www.ons.gov.uk/economy/nationalaccounts/supplementary/tables/articles/inputoutputanalyticaltables/guidanceforuse>.

79. Otto, A., Robinius, M., Grube, T., Schiebahn, S., Praktijn, A., Stolten, D. (2017). Power-to-Steel: reducing CO₂ through the integration of renewable energy and hydrogen into the German steel industry. *Energies*, 10 (4), 451. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10040451>.

80. Pauliuk, S., Wang, T., Müller, D. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources Conservation and Recycling*, 71, pp. 22–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.008>.

81. Pimm, A. J., Cockerill, T. T., Gale, W. F. (2021). Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127665. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>.

82. World Database on Protected areas (WDPA). (2023). *Protected Planet*. Retrieved from <https://www.protectedplanet.net/en/thematic-areas/wdpa?tab=WDPA>.

83. Salmon, N., Bañares-Alcántara, R. (2021). Impact of grid connectivity on cost and location of green ammonia production: Australia as a case study. *Energy & Environmental Science*, Vol. 14 (73), pp. 6655–6671. DOI: <https://doi.org/10.1039/D1EE02582A>.

84. Salmon, N., Bañares-Alcántara, R. (2022). A global, spatially granular techno-economic analysis of offshore green ammonia production. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 367, Art. no. 133045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133045>.
85. Shatokha, V. (2016). The sustainability of the iron and steel industries in Ukraine: challenges and opportunities. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2 (2), pp. 106–115. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0036-2>.
86. Shatokha, V. (2022). Modeling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29 (10), pp. 1851–1861. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-022-2474-8>.
87. Shatokha, V., Matukhno, E., Belokon, K., Shmatkov, G. (2020). Potential Means to reduce CO₂ emissions of iron and steel industry in Ukraine using best available technologies. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6 (3), pp. 451–462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00289-0>.
88. Ports. (2023). *Shipnext*. Retrieved from <https://shipnext.com/port/>.
89. HYBRIT: milestone reached – pilot facility for hydrogen storage up and running. (2022). *SSAB*. Retrieved from <https://www.ssab.com/en-gb/news/2022/09/hybrit-milestone-reached-pilot-facility-for-hydrogen-storage-up-and-running>.
90. Sundqvist, M., Biermann, M., Normann, F., Larsson, M., Nilsson, L. (2018). Evaluation of low and high level integration options for carbon capture at an integrated iron and steel mill. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 77, pp. 27–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.07.008>.
91. Swalec, C., Grigsby-Schulte, A. (2023). Pedal to the metal. *Global Energy Monitor*. Retrieved from https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2023/07/GEM_SteelPlants2023.pdf.
92. Toktarova, A., Walter, V., Göransson, L., Johnsson, F. (2022). Interaction between electrified steel production and the north European electricity system. *Applied Energy*, 310, 118584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118584>.
93. Trollip, H., McCall, B., Bataille, C. (2022). How green primary iron production in South Africa could help global decarbonization. *Climate Policy*, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.2024123>.
94. Gillula, J. W. (1982). The Reconstructed 1972 Input-Output Tables for Eight Soviet Republics. Foreign Economic Report No. 19. U.S. Department of Commerce, Bureau of the Census.
95. Vogl, V., Ehman, M., Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, pp. 736–745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>.
96. Wang, P., Ryberg, M., Yang, Y., Feng, K., Kara, S., Hauschild, M., Chen, W.-Q. (2021). Efficiency stagnation in global steel production urges joint supply- and demand-side mitigation efforts. *Nature Communication*, Art. no. 2066. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22245-6>.
97. Wang, C., Walsh, S., Weng, Z., Haynes, M., Summerfield, D., Feitz, A. (2023). Green steel: Synergies between the Australian iron ore industry and the production of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, Issue 83, pp. 32277–32293. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.041>.
98. Way, R., Ives, M. C., Mealy, P., Farmer, J. D. (2022). Empirically grounded technology forecasts and the energy transition. *Joule*, 6 (9), pp. 2057–2082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>.
99. Technical potential for offshore wind in Ukraine. (2020). *The World Bank Group*. Retrieved from <https://documents1.worldbank.org/curated/en/709391586844502062/pdf/Technical-Potential-for-Offshore-Wind-in-Ukraine-Map.pdf>.
100. Commodity price data (the Pink sheet). (2022). *The World Bank Group*. Retrieved from <https://www.worldbank.org/en/research/commodity-markets>.
101. Ukraine rapid damage and needs assessment : February 2022–February 2023. (2023). *The World Bank Group, the Government of Ukraine, the European Union services, and the United Nations*. Retrieved from <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099184503212328877/pdf/P1801740d1177f03c0ab180057556615497.pdf>.
102. Median construction times for reactors since 1981. (2020). *World Nuclear Association*. Retrieved from <https://www.world-nuclear.org/gallery/world-nuclear-performance-report-gallery/median-construction-times-for-reactors-since-1981.aspx>.
103. Decommissioning nuclear facilities. (2022). *World Nuclear Association*. Retrieved from <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/decommissioning-nuclear-facilities.aspx#:~:text=Generally%20speaking%2C%20early%20nuclear%20plants,to%2060%20year%20operating%20life>.
104. World steel in Figures. (2021). *World Steel Association*. Retrieved from <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2021-World-Steel-in-Figures.pdf>.
105. World steel in Figures. (2022). *World Steel Association*. Retrieved from <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2022-1.pdf>.
106. Fact sheet: steel and raw materials. (2023). *World Steel Association*. Retrieved from <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-raw-materials-2023.pdf>.
107. Zagoruichyk, A., Savytskyi, O., Kopytsia, I., O’Callaghan, B. (2023). The Green Phoenix Framework: Climate-positive Plan for Economic Recovery of Ukraine. Smith School Working Paper 23-03. Retrieved from <https://www.smithschool.ox.ac.uk/sites/default/files/2023-06/The-Green-Phoenix-Framework-a-climate-positive-plan-for-economic-recovery-in-Ukraine.pdf>.

Стаття надійшла до редакції 09.04.2025
Рецензовано: 12.05.2025

Формат цитування:

Девлін А., Михненко В., Загоруїчик А., Салмон Н., Солдак М. Зелена металургія повоєнної України. *Вісник економічної науки України*. 2025. № 1 (48). С. 215–239. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2025.1\(48\).215-239](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2025.1(48).215-239)

Devlin, A., Mykhnenko, V., Zagoruichyk, A., Salmon, N., Soldak, M. (2025). Green Steel for Post-War Ukraine. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 1 (48), pp. 215–239. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2025.1\(48\).215-239](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2025.1(48).215-239)