МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ХОМЕНКО СВІТЛАНА ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 504.064.36:622.341.1:551.510.42

ДИСЕРТАЦІЯ

ВУГЛЕЦЕВИЙ БАЛАНС ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ З УРАХУВАННЯМ СЕКВЕСТРАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ БУФЕРНИХ ЕКОСИСТЕМ

Спеціальність 101 – екологія
Галузь знань – 10 – природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____С.В. Хоменко

Науковий керівник: **КІРЕЙЦЕВА Ганна Вікторівна**, доцент, доктор технічних наук.

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Хоменко С.В. Вуглецевий баланс промислових територій з урахуванням секвестраційного потенціалу буферних екосистем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 «Екологія» (10 – Природничі науки). – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Житомир, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню важливої науково-прикладної проблеми щодо розроблення методичних засад інтегрованого оцінювання вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, шляхом поєднання кількісної інвентаризації прямих викидів CO_2 з оцінюванням секвестраційного потенціалу буферних екосистем санітарно-захисних зон. Робота спрямована на встановлення кількісних закономірностей формування вуглецевого сліду виробництва залізорудних окатишів та наукове обґрунтування сценаріїв декарбонізації гірничо-збагачувальних комбінатів в умовах посилення кліматичного регулювання Європейського Союзу та післявоєнного відновлення промисловості України.

У роботі на основі узгодження національного законодавства (Закон України № 377-IX, постанови КМУ № 880 та № 960 від 23.09.2020 р.) з вимогами міжнародних стандартів ISO 14064-1:2018, ISO 14067:2018, методологій МГЕЗК (2006, 2019) та регуляторних механізмів ЄС (EU ETS, CBAM) систематизовано нормативно-правову базу моніторингу викидів парникових газів промислових підприємств України. Встановлено, що чинна система моніторингу, звітності та верифікації є функціонально сумісною з методологією EU ETS, проте потребує розширення точності визначення на два рівні, переходу від галузевих коефіцієнтів за замовчуванням Типу I (рівень 1) до лабораторних коефіцієнтів рівня 3 та впровадження систем безперервних інструментальних вимірювань.

На основі аналізу технологічної документації, виробничих схем і характеристик основного обладнання здійснено порівняльну характеристику

процесів виробництва залізорудних окатишів та ідентифіковано джерела прямих викидів CO_2 на трьох гірничо-збагачувальних комбінатах – Полтавському, Центральному та Північному. Встановлено, що на всіх трьох підприємствах основним джерелом прямих викидів CO_2 є термічна обробка залізорудних окатишів, тоді як структура викидів визначається видом продукції, а саме, офлюсованими або неофлюсованими окатишами. Виробництво офлюсованих окатишів на Полтавському та Центральному ГЗК зумовлює частку процесних викидів від декарбонізації вапняку (метод балансу мас М4) на рівні 32,5 – 50,3 % загального обсягу, тоді як виробництво неофлюсованих окатишів на Північному ГЗК визначає спалювання природного газу практично єдиним суттєвим джерелом – 88,5 – 91,1 % викидів.

Розраховано прямі викиди CO_2 (Scope 1) трьох підприємств за комбінованим методом (стандартний метод М1 для паливних потоків та метод балансу мас М4 для процесних викидів) у розрізі шести матеріальних потоків за 2023 – 2025 рр.: ПрАТ «Полтавський ГЗК» – 234 304, 111 481 та 133 008 т CO_2; ПрАТ «Центральний ГЗК» – 57 710, 65 795 та 75 961 т CO_2; ПрАТ «Північний ГЗК» – 59 924, 81 627 та 90 478 т CO_2 відповідно. Встановлено, що питомий вуглецевий слід окатишів у 2023 р. становив 39,0 – 39,9 кг CO_2/т для всіх трьох підприємств, що свідчить про значний нереалізований потенціал для декарбонізації. Розробленою матрицею ризиків якості даних встановлено, що основним джерелом методологічної невизначеності є застосування коефіцієнтів вмісту вуглецю рівня точності 1 для вапняку, відхилення яких від фактичного хімічного складу може становити ±30 – 50 % і обумовлює результуючу похибку розрахунків 4 – 28 % для Полтавського та Центрального ГЗК.

Проведено дистанційну оцінку стану рослинного покриву санітарно-захисних зон трьох ГЗК на основі мультиспектральних знімків Sentinel-2 MSI Level-2A із розрахунком трьох спектральних індексів (NDVI, IRECI, SAVI) та класифікацією земного покриву методом Random Forest у середовищі QGIS 3.40. Встановлено, що частка деревно-чагарникового покриву становить лише 8,0 % площі санітарно-захисної зони Полтавського ГЗК (897,81 га), тоді як для Центрального (9 005,26 га) та Північного (3 463,86 га) ГЗК цей показник

становить 31,4 % та 31,8 % відповідно, що відображає суттєву диференціацію секвестраційного потенціалу буферних екосистем досліджуваних підприємств.

Запропоновано розрахункову модель оцінювання секвестрації, що поєднує дані про площу деревно-чагарникового покриву, показники стану рослинності та нормативні параметри її продуктивності. Верифікацію застосованого підходу проведено за результатами незалежної польової таксаційної інвентаризації із застосуванням алометричних рівнянь.

Розраховано інтегрований вуглецевий баланс трьох підприємств як різницю між прямими викидами CO_2 (Scope 1) та річною секвестрацією деревно-чагарникового покриву буферних екосистем. Поточна річна секвестрація становить 5 390,1 т CO_2-екв/рік (Полтавський ГЗК), 44 131,8 т CO_2-екв./рік (Центральний ГЗК) та 17 123,0 т CO_2-екв./рік (Північний ГЗК), а коефіцієнт вуглецевої компенсації у базовому 2025 р. – відповідно 4,1 %, 58,1 % та 18,9 %. Аналізом чутливості встановлено, що найвищу чутливість коефіцієнта компенсації до базових викидів демонструють Центральний та Північний ГЗК, тоді як для Полтавського ГЗК визначальним є параметр норми секвестрації нових насаджень. Імовірнісне моделювання Монте-Карло кількісно охарактеризувало невизначеність порогу: 90-відсотковий інтервал значень коефіцієнта компенсації на 2035 р. для Центрального ГЗК становить 79 – 167 %, а для Полтавського та Північного ГЗК – 19 – 50 % та 25 – 54 %. Отримані результати свідчать про можливість досягнення Центральним ГЗК повної компенсації за сприятливого поєднання параметрів, тоді як для Полтавського та Північного ГЗК досягнення вуглецевої нейтральності виключно за рахунок передбачених сценарієм заходів є малоймовірним.

Розроблено та науково обґрунтовано п'ять сценаріїв оптимізації вуглецевого балансу досліджуваних підприємств на середньостроковий (2025 – 2035 рр., Сц1 – Сц4) та довгостроковий (2025 – 2055 рр., Сц5) періоди планування. Встановлено, що за сценарієм комбінованого впровадження найкращих доступних технологій та розширення насаджень (Сц4) Центральний ГЗК досягає порогу переважної компенсації (75 %) вже у 2029 р., а у 2030-2031 рр. – вуглецевої нейтральності з подальшим переходом до перевищення

секвестрації над залишковими викидами. Для Полтавського та Північного ГЗК цей сценарій забезпечує стабілізацію показника в діапазоні 31 – 37 %, що підтверджує необхідність реалізації довгострокової стратегії з впровадженням технологій уловлювання та зберігання вуглецю та водневих технологій після 2035 р. Розроблено чотирирівневу систему моніторингу та управління вуглецевим балансом (інструментальний, розрахунковий, зведено-аналітичний, корпоративний рівні) із диференційованими вимогами до точності первинних вимірювань від ±1,0 % (хімічний аналіз вапняку) до ±5,0 % (масові потоки сировини), що забезпечує одночасне виконання вимог CBAM, CSRD та ESRS E1/E2 за принципом «одноразового збору та багаторазового використання» даних.

Отримані результати поглиблюють методичні засади інтегрованої оцінки вуглецевого балансу промислово-природних комплексів гірничодобувної галузі та прикладну цінність для вдосконалення системи моніторингу, звітності й верифікації викидів парникових газів на національному рівні. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання на рівні промислових підприємств при формуванні карбонових реєстрів і звітів з верифікації викидів, у процесі впровадження корпоративної звітності зі сталого розвитку за стандартами ESRS, для обґрунтування інвестиційних рішень щодо розширення санітарно-захисних зон; на рівні органів державного управління – при розробці регіональних програм декарбонізації промислових територій та формуванні нормативно-методичної бази МЗВ-системи України.

У дисертації розроблено методичні засади інтегрованої оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, що поєднують інвентаризацію прямих викидів CO_2 та оцінку річної секвестрації деревно-чагарниковим покривом буферних екосистем з ймовірнісно-сценарним моделюванням шляхів досягнення вуглецевої нейтральності. Це дозволило вирішити важливу науково-прикладну проблему наукового обґрунтування сценаріїв декарбонізації промислових підприємств гірничодобувної галузі в умовах вимог європейського кліматичного регулювання. Отримані результати та сформульовані наукові

положення, висновки й практичні рекомендації в сукупності вирішують поставлені завдання та досягають мети дисертаційного дослідження.

Ключові слова: вуглецевий баланс, парникові гази, моніторинг викидів парникових газів, декарбонізація, зміна клімату, CBAM, гірничо-збагачувальні комбінати, залізорудні окатиші, секвестрація вуглецю, депонування вуглецю, зелені насадження, санітарно-захисні зони, дистанційне зондування Землі, NDVI, екологічний ризик.

ABSTRACT

Khomenko S.V. Carbon Balance of Industrial Territories Considering the Sequestration Potential of Buffer Ecosystems. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 101 «Ecology» (10 - Natural Sciences). - Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr, 2026.

The dissertation addresses an important scientific and applied problem: developing a methodological framework for the integrated assessment of the carbon balance of mining and mineral processing enterprises by combining a quantitative inventory of direct CO_2 emissions with an assessment of the carbon sequestration potential of buffer ecosystems within sanitary protection zones. The study aims to identify quantitative relationships governing the carbon footprint of iron ore pellet production and to provide a scientific basis for decarbonisation scenarios for mining and mineral processing plants amid increasingly stringent European Union climate regulation and the post-war recovery of Ukrainian industry.

The regulatory framework governing the monitoring of greenhouse gas emissions from Ukrainian industrial enterprises was systematised by aligning national legislation (Law of Ukraine No. 377-IX and Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 880 and No. 960 of 23 September 2020) with the requirements of international standards ISO 14064-1:2018 and ISO 14067:2018, IPCC methodologies (2006 and 2019), and EU regulatory mechanisms (EU ETS and CBAM). The existing monitoring, reporting and verification (MRV) system was found to be functionally compatible with the EU ETS methodology. However, it requires a two-tier

improvement in estimation accuracy, a transition from sector-specific Type I default factors (Tier 1) to laboratory-derived Tier 3 factors, and the implementation of continuous emissions monitoring systems.

Based on an analysis of technical documentation, process flow diagrams and the characteristics of key equipment, iron ore pellet production processes were compared and sources of direct CO_2 emissions were identified at three mining and mineral processing plants: Poltava, Central and Northern. The thermal treatment of iron ore pellets was identified as the principal source of direct CO_2 emissions at all three plants, while the emissions profile depends on whether fluxed or non-fluxed pellets are produced. The production of fluxed pellets at the Poltava and Central plants results in process emissions from limestone calcination, calculated using the M4 mass balance method, accounting for 32.5 – 50.3 % of total emissions. In contrast, the production of non-fluxed pellets at the Northern plant makes natural gas combustion virtually the only substantial source, accounting for 88.5 – 91.1 % of emissions.

Direct CO_2 emissions (Scope 1) from the three enterprises were calculated for six material streams over 2023 – 2025 using a combined approach comprising the M1 standard method for fuel streams and the M4 mass balance method for process emissions. The respective annual emissions were 234,304, 111,481 and 133,008 t CO_2 for Private Joint-Stock Company «Poltava Mining and Processing Plant»; 57,710, 65,795 and 75,961 t CO_2 for Private Joint-Stock Company «Central Mining and Processing Plant»; and 59,924, 81,627 and 90,478 t CO_2 for Private Joint-Stock Company «Northern Mining and Processing Plant». In 2023, the specific carbon footprint of pellet production ranged from 39.0 to 39.9 kg CO_2 per tonne of pellets across all three enterprises, indicating substantial untapped decarbonisation potential. A data quality risk matrix developed in the study identified the use of Tier 1 carbon content factors for limestone as the principal source of methodological uncertainty. These factors may deviate from the actual chemical composition by ±30 – 50 %, resulting in an overall calculation error of 4 – 28 % for the Poltava and Central plants.

The condition of vegetation within the sanitary protection zones of the three plants was assessed using Sentinel-2 MSI Level-2A multispectral imagery. Three spectral indices NDVI, IRECI and SAVI, were calculated, and land cover was

classified using the Random Forest algorithm in QGIS 3.40. Tree and shrub cover accounted for only 8.0 % of the Poltava plant's sanitary protection zone, which covers 897.81 ha. The corresponding proportions for the Central and Northern plants were 31.4% and 31.8%, within sanitary protection zones covering 9,005.26 ha and 3,463.86 ha, respectively. These differences indicate substantial variation in the carbon sequestration potential of the buffer ecosystems associated with the enterprises studied.

A computational model for estimating carbon sequestration was proposed, integrating data on the area of tree and shrub cover, vegetation condition indicators and reference productivity parameters. The approach was validated against an independent field-based forest inventory using allometric equations.

The integrated carbon balance of the three enterprises was calculated as the difference between direct CO_2 emissions (Scope 1) and annual carbon sequestration by tree and shrub vegetation in the buffer ecosystems. Current annual sequestration was estimated at 5,390.1 t CO_2-eq yr^{-1} for the Poltava plant, 44,131.8 t CO_2-eq yr^{-1} for the Central plant and 17,123.0 t CO_2-eq yr^{-1} for the Northern plant. The corresponding carbon compensation ratios in the baseline year of 2025 were 4.1 %, 58.1 % and 18.9 %. Sensitivity analysis showed that the carbon compensation ratio was most sensitive to baseline emissions at the Central and Northern plants, whereas the sequestration rate of new plantings was the dominant parameter at the Poltava plant. Monte Carlo simulation quantified the uncertainty associated with reaching the compensation threshold: the 90% interval for the carbon compensation ratio in 2035 was 79 – 167 % for the Central plant, compared with 19 –50 % for the Poltava plant and 25 – 54 % for the Northern plant. These results indicate that the Central plant could achieve full compensation under a favourable combination of parameters, whereas carbon neutrality is unlikely to be achieved at the Poltava and Northern plants solely through the measures envisaged in the scenario.

Five scenarios for optimising the carbon balance of the enterprises studied were developed and scientifically substantiated for medium-term (2025 – 2035; Scenarios 1 – 4) and long-term (2025 – 2055; Scenario 5) planning horizons. Under the scenario combining the implementation of best available techniques with the expansion of vegetation cover (Scenario 4), the Central plant reaches the substantial compensation

threshold of 75 % as early as 2029 and achieves carbon neutrality in 2030 – 2031, followed by a transition to sequestration exceeding residual emissions. For the Poltava and Northern plants, this scenario stabilises the carbon compensation ratio within a range of 31 – 37 %, confirming the need for a long-term strategy incorporating carbon capture and storage and hydrogen technologies after 2035. A four-level system for monitoring and managing the carbon balance was developed, comprising instrumental measurement, calculation, consolidated analysis and corporate management levels. The system specifies differentiated accuracy requirements for primary measurements, ranging from ±1.0 % for the chemical analysis of limestone to ±5.0 % for raw material mass flows, enabling simultaneous compliance with CBAM, CSRD and ESRS E1/E2 requirements through the principle of collecting data once and reusing them for multiple purposes.

The findings advance the methodological framework for the integrated assessment of the carbon balance of industrial–natural complexes in the mining sector and provide practical value for improving greenhouse gas emissions monitoring, reporting and verification systems at the national level. At the enterprise level, the results can be used to compile carbon inventories and emissions verification reports, implement corporate sustainability reporting under ESRS, and substantiate investment decisions concerning the expansion of sanitary protection zones. At the public administration level, they can support the development of regional programmes for the decarbonisation of industrial areas and the regulatory and methodological framework of Ukraine’s MRV system.

The dissertation develops a methodological framework for the integrated assessment of the carbon balance of mining and mineral processing enterprises, combining an inventory of direct CO_2 emissions and an assessment of annual carbon sequestration by tree and shrub vegetation in buffer ecosystems with probabilistic scenario modelling of pathways to carbon neutrality. This framework addresses an important scientific and applied problem by providing a scientific basis for decarbonisation scenarios for industrial enterprises in the mining sector under European climate regulatory requirements. Taken together, the findings, scientific

propositions, conclusions and practical recommendations fulfil the research objectives and achieve the overall aim of the dissertation.

Keywords: carbon balance, greenhouse gases, greenhouse gas emissions monitoring, decarbonization, climate change, CBAM, mining and processing plants, iron ore pellets, carbon sequestration, carbon storage, green spaces, sanitary protection zones, remote sensing, NDVI, environmental risk.

Список публікацій здобувача:

1. Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Статті та публікації у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395. DOI: https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr19 (заг. обсяг 1,13 друк. арк., особисто автору належить 0,23 друк. арк.).

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

1. Кірейцева Г.В., Хоменко С.В. Вуглецевий слід виробництва залізорудних окатишів та шляхи його зменшення. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 6 (155). С. 89-97. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.6.12 (заг. обсяг 0,56 друк. арк., особисто автору належить 0,28 друк. арк.).

2. Хоменко С.В., Кірейцева Г.В. Оцінка стану впровадження міжнародних зобов'язань України зі зміни клімату в законодавче та нормативно-правове забезпечення. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 2 (59). С. 228-235. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.35 (заг. обсяг 0,50 друк. арк., особисто автору належить 0,25 друк. арк.).

3. Кірейцева Г.В., Хоменко С.В. Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції

України. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 1 (150). С. 81-91. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10 (заг. обсяг 0,69 друк. арк., особисто автору належить 0,34 друк. арк.).

4. Kireitseva H.V., Khomenko S.V., Palii O.V., Kravchuk-Obodzinska T.V., Suprunova I.V. Monitoring of greenhouse gas emissions at mining and processing plants in Ukraine under European integration conditions. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2025. Вип. 33. С. 121-136. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-09 (заг. обсяг 1,00 друк. арк., особисто автору належить 0,20 друк. арк.).

5. Кірейцева Г., Хоменко С. Адаптація i-Tree Eco для оцінки депонування та секвестрації вуглецю міськими деревними насадженнями промислових зон України. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2025. Вип. 4. С. 116-125. DOI: https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-14 (заг. обсяг 0,63 друк. арк., особисто автору належить 0,31 друк. арк.).

6. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Хоменко С.В., Легенчук Р.В. Застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних проекцій. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 26-33. DOI: https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-3-3 (заг. обсяг 0,50 друк. арк., особисто автору належить 0,13 друк. арк.).

7. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Хоменко С.В., Хрутьба В.О., Мазуркевич К.В. Інтеграція LST-індексів та сценаріїв RCP як інструмент прогнозування теплового режиму міст в умовах трансформаційних змін. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2024. № 6. С. 50-59. DOI: https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406-06 (заг. обсяг 0,63 друк. арк., особисто автору належить 0,13 друк. арк.).

8. Кірейцева Г.В., Хоменко С.В., Шомко О.М., Гнітецький О.М., Скорик М.А. Оцінка впливу пожеж на рослинність заповідника «Древлянський» в умовах військових дій. Екологічні науки. 2025. Вип. 5 (62). Ч. 2. С. 7-14. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.2.1 (заг. обсяг 0,50 друк. арк., особисто автору належить 0,10 друк. арк.).

2. Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. Кірейцева Г.В. Хоменко С.В. Бажан В.В. Стемківський О.О. Аналіз викидів парникових газів гірничозбагачувальних підприємств: методологічні підходи та практичне впровадження. Тези міжнародної науково-практичної конференції Трансформаційні підходи до сталого розвитку: екологічна освіта, наука та природоохоронні практики для відбудови України, 22-26 вересня 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С. 88-89.

2. Горшкальова В.П., Кірейцева Г.В., Хоменко С.В., Потопальський В.В., Олійник Д.А. Оцінка вуглепоглинальної здатності лісових екосистем України. Тези міжнародної науково-практичної конференції Трансформаційні підходи до сталого розвитку: екологічна освіта, наука та природоохоронні практики для відбудови України, 22-26 вересня 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С. 75.

3. Хоменко С.В., Кірейцева Г.В. Аналіз викидів парникових газів внаслідок російсько-української війни. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. 12-17 травня 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С. 260-261.

4. Хоменко С.В., Кірейцева Г.В. Оцінка наслідків пожеж, спричинених військовими діями на фітоценози заповідника «Древлянський» за допомогою вегетаційного індексу NDVI. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування» 14 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. 285 с.

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ……..	15
ВСТУП …….....	17
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ	25
1.1. Вуглецевий баланс у контексті глобальних кліматичних змін та сталого розвитку …….	25
1.2. Нормативно-правове регулювання та міжнародні стандарти оцінки вуглецевого балансу ……	32
1.3. Гірничо-збагачувальні підприємства як джерела викидів парникових газів та шляхи оптимізації їх вуглецевого балансу ……..……	40
1.4. Екологічний потенціал буферних екосистем у депонуванні та секвестрації вуглецю в умовах техногенезу ……	49
Висновки до розділу 1…….....	57
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ …...……	61
2.1. Методика дослідження…….	61
2.2. Характеристика об'єктів дослідження ……	66
2.2.1. Північний гірничо-збагачувальний комбінат……..	66
2.2.2. Центральний гірничо-збагачувальний комбінат…….	67
2.2.3. Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат…….	68
2.3. Методи оцінки викидів парникових газів гірничо-збагачувальними комбінатами …..	69
2.4. Методика оцінки параметрів депонування та секвестрації вуглецю ……	76
2.5. Методи просторового аналізу та моделювання вуглецевого балансу …	81
Висновки до розділу 2 ……..……	90
РОЗДІЛ 3. ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ……	93
3.1. Аналіз технологічних процесів виробництва залізорудних окатишів як основа оцінки викидів CO_2 ……..……	93

3.2. Ідентифікація та характеристика джерел викидів парникових газів досліджуваних підприємств ……	99
3.3. Розрахунок викидів парникових газів ……	106
3.4. Оцінка ризиків достовірності розрахунку прямих викидів CO_2 на досліджуваних гірничо-збагачувальних підприємствах ……	120
3.5. Таксономічна та просторова структура буферних екосистем досліджуваних об'єктів……	128
3.6. Оцінка вуглецевого депо буферних екосистем ……	135
3.7. Оцінка річної секвестрації вуглецю деревно-чагарниковим покривом санітарно-захисних зон ……..	158
3.8. Сценарний аналіз підвищення вуглецепоглинального потенціалу санітарно-захисних зон та рекомендації щодо оптимізації насаджень……	167
Висновки до розділу 3 ……..……....	176
РОЗДІЛ 4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ТЕРИТОРІЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ ……	181
4.1. Вуглецевий баланс досліджуваних гірничо-збагачувальних комбінатів	181
4.2. Відбір та оцінка пріоритетних НДТМ для оптимізації вуглецевого балансу	184
4.3. Моделювання сценаріїв оптимізації вуглецевого балансу промислових територій ……	190
4.4. Науково-практичні рекомендації щодо системи моніторингу та управління вуглецевим балансом ……	200
Висновки до розділу 4 ……	205
ВИСНОВКИ …….....	208
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ……	211
ДОДАТКИ ……	235

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

AGB (*Above-Ground Biomass*) – надземна фітомаса

BEF (*Biomass Expansion Factor*) – коефіцієнт розширення біомаси

BGB (*Below-Ground Biomass*) – підземна фітомаса

CBAM (*Carbon Border Adjustment Mechanism*) – механізм вуглецевого коригування імпорту Європейського Союзу

CCS (*Carbon Capture and Storage*) – уловлювання та зберігання вуглецю

CEMS (*Continuous Emissions Monitoring System*) – система безперервного моніторингу викидів

CF (*Carbon Fraction*) – частка вуглецю в сухій фітомасі

CO_2-екв. — еквівалент діоксиду вуглецю

CSRD (*Corporate Sustainability Reporting Directive*) – Директива ЄС щодо корпоративної звітності зі сталого розвитку

DBH (*Diameter at Breast Height*) – діаметр стовбура дерева на висоті 1,3 м

ESRS (*European Sustainability Reporting Standards*) – Європейські стандарти звітності зі сталого розвитку

EU ETS (*European Union Emissions Trading System*) – система торгівлі квотами на викиди Європейського Союзу

GHG Protocol (*Greenhouse Gas Protocol*) – міжнародний стандарт обліку та звітності щодо викидів парникових газів

IPCC (МГЕЗК) (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) – Міжурядова група експертів зі зміни клімату

IRECI (*Inverted Red-Edge Chlorophyll Index*) – інверсний індекс хлорофілу червоного краю

ISO (*International Organization for Standardization*) – Міжнародна організація зі стандартизації

Kcomp – коефіцієнт вуглецевої компенсації

LAI (*Leaf Area Index*) – індекс листкової поверхні

LCA (*Life Cycle Assessment*) – оцінювання життєвого циклу

LULUCF (*Land Use, Land-Use Change and Forestry*) – землекористування, зміни у землекористуванні та лісове господарство

M1 – стандартний розрахунковий метод визначення викидів від спалювання палива

M4 – метод балансу мас для визначення викидів CO_2

MPC (*Model Predictive Control*) – прогнозне керування на основі моделі

MSI (*Multispectral Instrument*) – мультиспектральний інструмент супутників Sentinel-2

NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) – нормалізований різницевий вегетаційний індекс

NIR (*Near-Infrared*) – ближній інфрачервоний діапазон спектра

QGIS – програмне забезпечення для геоінформаційного аналізу

SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) – вегетаційний індекс із поправкою на вплив ґрунту

Scope 1 – прямі викиди парникових газів від джерел, що належать підприємству або контролюються ним

Scope 2 – непрямі енергетичні викиди, пов’язані з виробництвом придбаної енергії

Scope 3 – інші непрямі викиди у ланцюгу створення вартості

TRL (*Technology Readiness Level*) – рівень технологічної готовності

WD (*Wood Density*) – базисна щільність деревини

ВД – вид діяльності

ВБ – вуглецевий баланс

ГЗК – гірничо-збагачувальний комбінат

ГІС – геоінформаційна система

ДД – дані про діяльність

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі

ДСТУ – національний стандарт України

ЄС – Європейський Союз

ЗВТ – засоби вимірювальної техніки

КВ – коефіцієнт викидів

КМУ – Кабінет Міністрів України

КО – коефіцієнт окиснення

МДПЕ – максимально допустима похибка експлуатації

МЗВ – моніторинг, звітність та верифікація

НДТМ – найкращі доступні технології та методи управління

НПЕК – Національний план з енергетики та клімату

НТЗ – нижча теплотворна здатність

ООН –Організація Об’єднаних Націй

ПГЗК – Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат

ПівнГЗК – Північний гірничо-збагачувальний комбінат

РКЗК ООН – Рамкова конвенція Організації Об’єднаних Націй про зміну клімату

СЗЗ – санітарно-захисна зона

ЦГЗК – Центральний гірничо-збагачувальний комбінат

ВСТУП

Актуальність теми. Гірничо-збагачувальна промисловість є одним із найбільш вуглемістких секторів світової економіки. Діяльність залізорудних підприємств охоплює технологічні процеси від видобування і збагачення сировини до виробництва залізорудних окатишів та супроводжується викидами парникових газів, зокрема CO_2 від спалювання природного газу та декарбонізації вапняку. В умовах посилення кліматичного регулювання, переходу до основного режиму застосування механізму прикордонного вуглецевого коригування Європейського Союзу та впровадження стандартів корпоративної звітності зі сталого розвитку, українські залізорудні підприємства постають перед необхідністю вдосконалення комплексної системи моніторингу та управління вуглецевим балансом.

Аналіз наукової літератури свідчить про те, що дослідження викидів парникових газів промислових підприємств та оцінка секвестраційного потенціалу екосистем розвиваються як два відокремлених наукових напрями. Так, вчені Azadi M., Northey S. A., Ali S. H. та Edraki M. у фундаментальному дослідженні довели, що моніторинг викидів парникових газів у гірничодобувній галузі здійснюється переважно без урахування компенсаційного потенціалу навколишніх екосистем, а прозорість звітності залишається критично недостатньою для формування інтегрованих стратегій декарбонізації [1]. Водночас Vindušková O. та Frouz J. на основі кількісного огляду постгірничих ділянок Північної півкулі встановили, що дослідження секвестрації вуглецю на рекультивованих територіях практично не враховують викидів підприємства як контексту для оцінки компенсаційного ефекту [2]. Проведений бібліометричний аналіз публікацій, індексованих у базі Scopus із використанням VOSviewer підтвердив недостатню тематичну інтеграцію зазначених напрямів. Серед восьми виявлених тематичних кластерів кластер промислових викидів гірничої галузі та кластер екологічного відновлення порушених територій не мають щільних міжкластерних зв'язків.

Для гірничо-збагачувальних підприємств України ця проблема набуває особливої актуальності, оскільки санітарно-захисні зони комбінатів формують значні масиви буферних екосистем, здатних поглинати частину викидів CO_2 та частково компенсувати техногенні викиди. Відповідно до ДСП № 173-96 «Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів», зі змінами, затвердженими наказом МОЗ України № 40 від 13.01.2026 р., мінімальна площа обов'язкового озеленення СЗЗ залежно від її ширини становить від 40 до 60 %, а вздовж межі із сельбищною територією передбачається суцільна смуга деревно-чагарникових насаджень шириною не менше 50 м [3]. З огляду на значні площі санітарно-захисних зон гірничо-збагачувальних комбінатів І класу небезпеки передбачені нормативними вимогами зелені насадження можуть формувати значний вуглепоглинальний потенціал. Цей вуглепоглинальний потенціал таких насаджень недостатньо досліджений і переважно не враховується при комплексному оцінюванні вуглецевого балансу промислових територій.

Сукупність зазначених чинників обумовлює наукову новизну та практичну цінність розробки методичних засад інтегрованої оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, що передбачає одночасне врахування викидів парникових газів та вуглепоглинальної здатності буферних екосистем санітарно-захисних зон, і визначає тему дисертаційного дослідження.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Здобувач є науковим керівником науково-дослідної роботи «Оцінка викидів парникових газів та вуглепоглинальної здатності природних екосистем Житомирської області» (державна реєстрація № 0126U000746 від 25.01.2026 р.), результати якої безпосередньо використано у дисертаційному дослідженні при розробці методики оцінки секвестраційної здатності буферних екосистем. Здобувача включено до складу виконавців держбюджетної теми «Розробка механізму сталого розвитку економічних систем в умовах воєнних дій та післявоєнного відновлення економіки» (державна реєстрація № 0124U000463; наказ університету № 163/к від 12.09.2025 р.), у межах якої розроблялися сценарії

декарбонізації промислових підприємств як складова механізму сталого відновлення економіки України.

Результати дослідження були інтегровані у низку міжнародних проєктів та програм. Здобувач є співкоординатором міжнародного проєкту «Bridge2Green», що фінансується Міністерством клімату Естонії із фондів міжнародного кліматичного співробітництва через KIK – Центр інвестицій у навколишнє середовище (наказ університету № 244/агп від 01.10.2025 р.). Участь у зазначених проєктах та програмах дозволила поглибити методичний інструментарій оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств у контексті вимог європейського кліматичного регулювання.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення методичних засад інтегрованої оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств шляхом кількісного визначення прямих викидів парникових газів та оцінки вуглепоглинальної здатності буферних екосистем санітарно-захисних зон для наукового обґрунтування сценаріїв декарбонізації в умовах європейського кліматичного регулювання.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні **завдання:**

– систематизувати нормативно-правову базу та міжнародні стандарти у сфері моніторингу викидів парникових газів промислових підприємств;

– здійснити порівняльну характеристику технологічних процесів та ідентифікувати джерела викидів парникових газів на трьох гірничо-збагачувальних комбінатах (Північному, Центральному та Полтавському ГЗК);

– розрахувати обсяги прямих викидів CO_2 досліджуваних підприємств із застосуванням комбінованого методу (стандартний метод M1 для паливних потоків та метод балансу мас M4 для процесних викидів) з оцінкою невизначеності та матрицею ризиків якості даних;

– здійснити дистанційну оцінку стану рослинного покриву санітарно-захисних зон трьох ГЗК на основі супутникових знімків Sentinel-2 з розрахунком спектральних індексів (NDVI, IRECI, SAVI), класифікацією земного покриву методом Random Forest та побудовою регресійної моделі поглинальної здатності буферних екосистем;

– розрахувати вуглецевий баланс досліджуваних підприємств у визначених межах як різницю між прямими викидами CO_2 і розрахунковим річним поглинанням CO_2 деревно-чагарниковим покривом буферних екосистем, визначити коефіцієнт вуглецевої компенсації та оцінити чутливість результатів до невизначеності вхідних параметрів;

– розробити сценарії декарбонізації гірничо-збагачувальних підприємств на середньостроковий період планування та науково-практичні рекомендації щодо системи моніторингу і управління вуглецевим балансом.

Об’єкт дослідження: процеси формування вуглецевого балансу промислових територій гірничо-збагачувальних підприємств, зумовлені прямими викидами CO_2 та поглинанням CO_2 буферними екосистемами.

Предмет дослідження: кількісні залежності оцінювання прямих викидів CO_2 від технологічних процесів виробництва залізорудних окатишів та вуглепоглинальної здатності буферних екосистем гірничо-збагачувальних підприємств.

Методики дослідження: у межах дисертаційного дослідження застосовано комплекс взаємопов’язаних методів та методик, що забезпечили всебічне вивчення вуглецевого балансу промислово-природних комплексів гірничо-збагачувальних підприємств. Аналітико-теоретичні методи включали бібліометричний аналіз, систематизацію нормативно-правової бази та порівняльну характеристику технологічних процесів. Розрахункові методики інвентаризації викидів парникових газів базувалися на методологіях IPCC: стандартний метод M1 для паливних потоків та метод балансу мас M4 для процесних викидів від декарбонізації вапняку. Польові таксаційні дослідження деревних насаджень передбачали визначення видового складу та вимірювання дендрометричних параметрів. Для опрацювання отриманих даних, оцінювання біомаси, депонованого вуглецю та річної секвестрації застосовано алометричні рівняння та програмний комплекс i-Tree Eco. Методики дистанційного зондування Землі передбачали обробку супутникових знімків Sentinel-2 MSI Level-2A та розрахунок спектральних індексів NDVI, IRECI, SAVI. Геоінформаційний аналіз у середовищі QGIS 3.40 включав класифікацію

земного покриву методом Random Forest та зональну статистику. Балансовий підхід застосовувався для моделювання вуглецевого балансу та сценарного аналізу декарбонізації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні методичних засад інтегрованої оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, що поєднують інвентаризацію прямих викидів CO_2 та оцінку річної секвестрації деревно-чагарниковим покривом буферних екосистем з ймовірнісно-сценарним моделюванням шляхів досягнення вуглецевої нейтральності.

Вперше одержано:

– кількісні оцінки вуглецевого балансу та коефіцієнтів вуглецевої компенсації прямих викидів CO_2 деревно-чагарниковим покривом буферних екосистем для залізорудних гірничо-збагачувальних комбінатів України (4,1 – 58,1 %), що дозволило встановити, що значення коефіцієнта визначається насамперед площею деревно-чагарникового покриву відносно обсягу прямих викидів, а не продуктивністю деревостанів (питома секвестрація 1,3 – 1,6 т С/га/рік), та обґрунтувати пріоритет розширення площі буферних насаджень.

Удосконалено:

– методику оцінки секвестрації деревно-чагарниковими насадженнями буферних екосистем шляхом поєднання класифікації земного покриву Sentinel-2 методом Random Forest, балансової корекції NDVI деревостану та регресійної моделі секвестрації з верифікацією за польовою інвентаризацією в i-Tree Eco, що забезпечило відповідність питомих показників у межах ±15 %;

– методичний підхід до сценарного моделювання вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств шляхом урахування вікової динаміки приросту нових насаджень і сценаріїв впровадження найкращих доступних технологій та методів з ймовірнісною оцінкою невизначеності методом Монте-Карло, що дозволило кількісно оцінити ймовірність і строки досягнення вуглецевої нейтральності кожним підприємством та визначити межі екосистемної компенсації прямих викидів.

Набули подальшого розвитку:

– підхід до оцінювання якості даних інвентаризації прямих викидів CO_2 виробництва залізорудних окатишів на основі матриці ризиків, що дозволило встановити залежність структури викидів від типу продукції (частка процесних викидів від декарбонізації вапняку 32,5 – 50,3 % для офлюсованих окатишів проти домінування природного газу для неофлюсованих), визначити основне джерело методологічної невизначеності та обґрунтувати перехід до лабораторно визначених коефіцієнтів;

– підхід до формування буферних насаджень санітарно-захисних зон на основі видових моделей залежності секвестрації від діаметра стовбура з урахуванням екологічного статусу порід та просторової структури насаджень, що дозволило визначити породи з найвищою питомою секвестраційною ефективністю та обґрунтувати їх добір для озеленення;

– методичні засади побудови системи моніторингу, звітності та верифікації вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств на основі багаторівневої архітектури з диференційованими вимогами до точності первинних даних, що забезпечує одночасне виконання вимог CBAM, CSRD та ESRS за принципом одноразового збору та багаторазового використання даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості їх використання гірничо-збагачувальними підприємствами України та органами державного управління під час планування заходів декарбонізації промислового сектору. Розроблені методичні засади можуть бути використані:

на рівні промислових підприємств

– при формуванні корпоративних реєстрів викидів парникових газів та підготовці вихідних даних для моніторингу та звітності щодо прямих викидів CO_2 (ТОВ «Центр екології та розвитку нових технологій», довідка №15/вх від 04.06.2016 р.);

– у процесі впровадження корпоративної звітності зі сталого розвитку згідно зі стандартами ESRS (ТОВ «ЕКО-МБ» довідка № 11/в від 14.05.2026 р, ГС «Асоціація професіоналів довкілля» довідка №2с/05/1с3 від 01.05.2026 р.);

– для обґрунтування інвестиційних рішень щодо розширення санітарно-захисних зон і підвищення їхнього секвестраційного потенціалу (ТОВ «Офіс сталих рішень», довідка №05/26-2 від 01.05.2026 р.).

на рівні органів державного управління:

– при розробленні регіональних програм декарбонізації промислових територій та методичних рекомендацій із моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів.

у навчальному процесі:

– матеріали дисертаційного дослідження впроваджено у навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка» при викладанні дисциплін «Моніторинг, звітність та верифікація викидів парникових газів» (довідка №44-23.07/717 від 08.05.2026 р.).

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному формулюванні наукової ідеї, мети та завдань дослідження, розробці й реалізації комплексної програми оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств. Здобувачем особисто проведено польові таксаційні дослідження деревних насаджень модельної ділянки, здійснено обробку супутникових знімків Sentinel-2 у середовищі QGIS із застосуванням методу Random Forest, виконано розрахунки викидів парникових газів, проведено моделювання вуглецевого балансу та розроблено сценарії декарбонізації для трьох досліджуваних підприємств.

Автором виконано просторово-сезонний аналіз стану рослинного покриву буферних екосистем санітарно-захисних зон Полтавського, Центрального та Північного ГЗК на основі спектральних індексів NDVI, IRECI та SAVI, що дозволило встановити просторові та сезонні відмінності стану рослинного покриву й уточнити вихідні параметри оцінювання вуглепоглинального потенціалу буферних екосистем.

Усі наукові положення, висновки та практичні рекомендації, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Особистий внесок автора у спільних публікаціях конкретизовано у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень апробовано на VI Всеукраїнському конкурсі наукових робіт «Інтелект молоді. Раціональне природокористування та новітні енергоефективні технології» за секцією «Екологічна безпека та технології захисту навколишнього середовища», де конкурсну роботу «Секвестраційний потенціал деревних насаджень санітарно-захисних зон гірничо-збагачувальних підприємств України в умовах кліматичного регулювання ЄС» відзначено ІІ місцем (2026), а також доповідались та обговорювались на наукових конференціях, у тому числі міжнародній: Міжнародна науково-практична конференція «Трансформаційні підходи до сталого розвитку: екологічна освіта, наука та природоохоронні практики для відбудови України» (2025, Житомир), а також на всеукраїнських конференціях: Всеукраїнська науково-практична on-line конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвячена Дню науки (2025, Житомир; 2024, Житомир); Всеукраїнська наукова конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування» (2024, Житомир; 2023, Житомир).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць, із них: 9 статей, у тому числі 1 стаття у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science Core Collection, 8 статей у наукових фахових виданнях України, 4 публікації апробаційного характеру в інших наукових виданнях.

Структура та **обсяг дисертації.** Повний обсяг дисертації становить 232 сторінок та включає 49 таблиць, 52рисунки, список використаних джерел із 203 найменування на 23 сторінках і додатки.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕРИТОРІЙ

1.1. Вуглецевий баланс у контексті глобальних кліматичних змін та сталого розвитку

Глобальний вуглецевий цикл є одним із ключових біогеохімічних процесів на Землі. Він описує циркуляцію вуглецю між основними компонентами земної системи: атмосферою, океаном, наземною біосферою та літосферою [3]. Цей цикл охоплює різні часові масштаби, від добових коливань до геологічних епох тривалістю мільйони років. Саме завдяки йому підтримується стабільність клімату Землі та створюються умови для існування життя [4].

Для визначення актуальних напрямів досліджень вуглецевого балансу гірничодобувних підприємств проведено бібліометричний аналіз публікацій, індексованих у базі Scopus. Загалом вибірка охопила 607 публікацій, опрацьованих із використанням VOSviewer (рис. 1.1.)

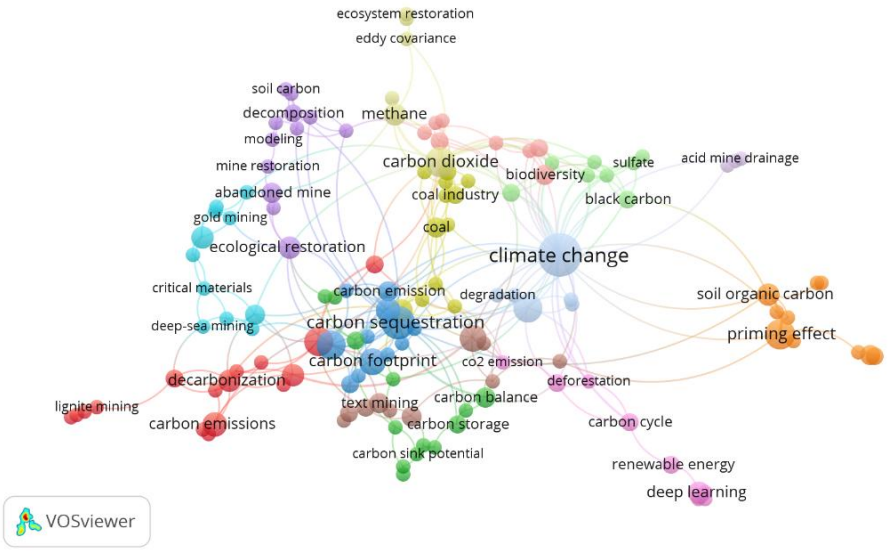


Рис. 1.1. Бібліометрична мережа ключових термінів наукових досліджень вуглецевого балансу гірничодобувних підприємств за даними Scopus (візуалізовано за допомогою VOSviewer 1.6.20)

Бібліометричний аналіз 607 публікацій бази Scopus за пошуковим запитом «carbon balance mining», проведений засобами VOSviewer, виявив вісім тематичних кластерів у досліджуваному науковому полі. Центральним вузлом карти є термін «climate change», найбільший за розміром та кількістю зв'язків, що підтверджує його роль як системоутворюючої категорії всього наукового поля. Навколо нього формуються такі кластери:

- промислових викидів гірничої галузі («carbon dioxide», «coal industry», «coal», «methane»);
- екологічного відновлення порушених територій («carbon sequestration», «ecological restoration», «mine restoration», «abandoned mine»);
- управління вуглецевим балансом («carbon footprint», «carbon balance», «carbon storage», «carbon sink potential»);
- декарбонізації промисловості («decarbonization», «carbon emissions», «lignite mining»);
- ґрунтового вуглецю («soil organic carbon», «priming effect», «soil carbon»);
- цифрових методів аналізу («deep learning», «renewable energy»).

Аналіз топології карти виявляє принципово важливу закономірність, а саме, кластер промислових викидів гірничої галузі та кластер екологічного відновлення порушених територій є відносно відокремленими і не мають щільних прямих зв'язків між собою. Це свідчить про недостатню інтеграцію досліджень викидів парникових газів гірничо-збагачувальних підприємств та секвестраційного потенціалу буферних екосистем у єдину систему вуглецевого балансу. Саме відсутність такої інтеграції у науковому полі визначає проблему та обґрунтовує необхідність проведення даного дослідження.

Аналіз динаміки публікаційної активності за тематикою вуглецевого балансу гірничодобувних підприємств свідчить про стійке зростання наукового інтересу до досліджуваної проблематики (рис. 1.2.).

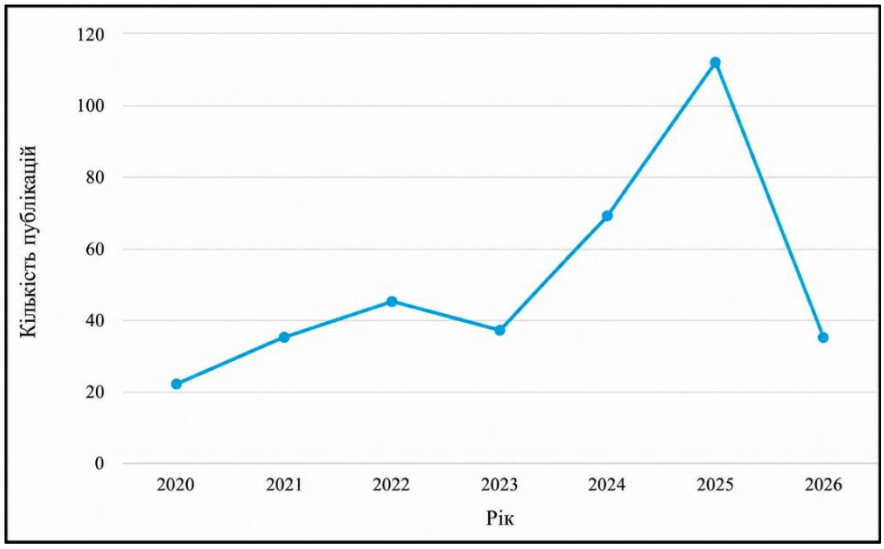


Рис. 1.2. Динаміка кількості наукових публікацій за тематикою вуглецевого балансу гірничодобувних підприємств (2020 – 2026* рр.) (розроблено автором на основі даних Scopus)

Примітка: * дані за 2026 рік не включено до динамічного аналізу, оскільки рік на момент формування вибірки не завершився.

Аналіз динаміки публікаційної активності засвідчує, що у 2020 році було опубліковано лише 22 документи, однак вже у 2025 році їх кількість досягла максимального значення 111 публікацій, що у 5 разів перевищує показник базового року. Динаміка має нерівномірний характер: після помірного зростання у 2020 – 2022 роках (22 – 45 публікацій) спостерігався короткочасний спад у 2023 році до 37 публікацій, після чого розпочалося різке прискорення у 2024 – 2025 роках. Важливо зазначити, що найінтенсивніше зростання припадає саме на 2024 – 2025 роки, період запровадження перехідного механізму CBAM та посилення кліматичного регулювання в ЄС. Такий науковий інтерес є закономірною відповіддю на поглиблення кліматичної кризи, спричиненої антропогенним впливом на природний вуглецевий цикл. Саме з початку промислової революції у середині XVIII століття людська діяльність стала додатковим вагомим чинником глобального вуглецевого циклу, спричинивши збільшення надходження CO_2 в атмосферу та порушення рівноваги між його викидами й поглинанням. Згідно з висновками міжурядових експертних груп саме цей дисбаланс став основною причиною сучасних кліматичних змін [5].

У природних умовах потоки вуглецю між різними компонентами земної системи перебувають у динамічній рівновазі. За оцінками Шостого звіту МГЕЗК (Міжурядової групи експертів зі зміни клімату IPCC AR6), унаслідок фотосинтезу наземні екосистеми щороку поглинають з атмосфери є близько 120 Гт вуглецю [5, 6]. Значна частина цього вуглецю повертається в атмосферу внаслідок дихання рослин, ґрунтового дихання та розкладання органічної речовини. Одночасно відбувається обмін CO_2 між океаном та атмосферою з інтенсивністю 80 Гт С рік$^{-1}$, що також підтримує стабільність системи. Дослідження антарктичних крижаних кернів, проведені міжнародними науковими групами під керівництвом Lüthi та співавторів [7] і Petit та колег [8], показують, що до початку індустріальної ери такий баланс зберігався протягом тривалого часу. Ця стабільність була порушена лише з початком масштабної індустріалізації. Згідно зі звітом Global Carbon Budget, у 2024 році середньорічна концентрація CO_2 в атмосфері досягла 420 млн$^{-1}$ [9]. Це означає, що за останні два з половиною століття вміст вуглекислого газу зріс майже на 50 % порівняно з доіндустріальним періодом. Такі темпи накопичення CO_2 не мають аналогів у геологічній історії Землі за останні мільйони років. Порушення глобального вуглецевого балансу спричинене двома основними факторами. Перший і найбільш значущий це спалювання викопного палива. Коли спалюються ці ресурси, вуглець повертається в атмосферу зі швидкістю, що у тисячі разів перевищує природні процеси вулканічної дегазації (рис.1.3.) [9].

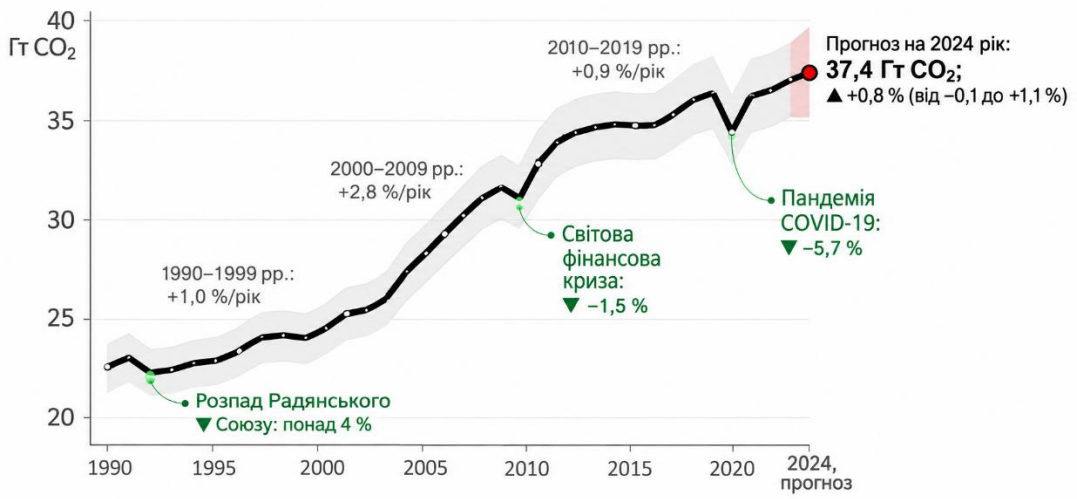


Рис. 1.3. Динаміка глобальних викидів CO_2 від спалювання викопного палива (1990 – 2024 рр.) (за даними [9])

Як видно з рис. 1.3., починаючи з 1990 року спостерігається стійке зростання обсягів викидів від спалювання викопного палива. Хоча були й короткочасні періоди стабілізації, пов'язані з глобальними економічними кризами та пандемією COVID-19, загальний тренд залишається висхідним. У 2024 році викиди досягли рекордних показників за весь період спостережень.

Другим важливим чинником є трансформація природних екосистем. Масштабне знелісснення, деградація земель та перетворення природних ландшафтів на сільськогосподарські угіддя призводять до вивільнення значних обсягів вуглецю (рис.1.4.).

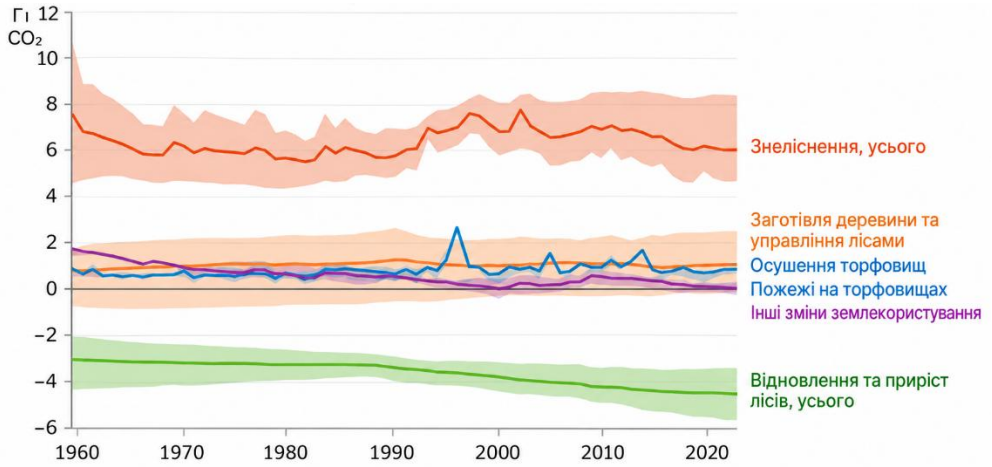


Рис. 1.4. Структура чистих викидів CO_2 внаслідок змін у землекористуванні за компонентами (1960 – 2020 рр.) (за даними [9])

Аналіз даних рис. 1.4. дозволяє констатувати, що основним джерелом викидів є знелісснення та деградація лісових ресурсів. Темпи вирубки значно перевищують як природне відновлення, так і штучне лісорозведення. Окрему увагу привертають викиди від осушення торфовищ та водно-болотних угідь, хоча їх абсолютний внесок менший, концентрація вуглецю в цих екосистемах надзвичайно висока.

Важливо відзначити, що попри посилення зусиль з лісовідновлення, загальний баланс сектору землекористування залишається позитивним. Це означає, що природні екосистеми вже не виконують свою роль поглиначів вуглецю в повній мірі, а частково перетворилися на додаткові джерела викидів парникових газів [10].

Поєднання цих двох факторів: спалювання викопного палива та трансформації природних екосистем спричинило стійке зростання антропогенних викидів парникових газів впродовж останніх півтора століття. Особливо інтенсивне збільшення обсягів викидів спостерігається з другої половини XX століття внаслідок масштабної індустріалізації, зростання енергоспоживання та розвитку важкої промисловості й транспорту [11]. Впродовж останніх десятиліть змінився також регіональний розподіл глобальних викидів: поряд із традиційно значним внеском Європи та Північної Америки суттєво зросла частка країн Азії, що пов’язано зі швидкими темпами їх індустріального розвитку та зростанням обсягів виробництва [11].

Дослідження МГЕЗК та міжнародних наукових груп підтверджують існування майже лінійної залежності між накопиченими викидами вуглецю та підвищенням глобальної температури [12]. Це означає, що кожна додаткова тонна CO2 в атмосфері призводить до подальшого потепління. Регіональні дослідження підтверджують прояви зміни клімату і на території Полісся: зафіксовано суттєве відхилення температури повітря від кліматичної норми [13], а для лісів України за сценаріями RCP 4.5 та RCP 8.5 прогнозується зростання уразливості та зміщення зон кліматичної придатності основних лісотвірних видів [14].

Фундаментальний принцип досягнення кліматичних цілей полягає у встановленні балансу між антропогенними викидами та природним поглинанням вуглецю [12, 15]. Атмосфера Землі функціонує як динамічна система, в якій концентрація CO_2 визначається співвідношенням між надходженням парникових газів від діяльності людини та їх абсорбцією природними резервуарами: океанами, лісами, ґрунтами. Коли антропогенні викиди CO_2 перевищують його поглинання природними резервуарами, вуглекислий газ накопичується в атмосфері, посилюючи парниковий ефект і глобальне потепління. Якщо обсяги поглинання перевищують викиди, вміст CO_2 в атмосфері зменшується. У спрощеному вигляді зміну запасу вуглецю в атмосфері можна представити рівнянням (1):

$$\Delta C = E - S, \qquad (1)$$

де: ΔC – зміна запасу вуглецю в атмосфері за одиницю часу, Гт С/рік;

E – сукупні антропогенні викиди CO_2 (спалювання викопного палива + зміна землекористування);

S – поглинання вуглецю природними резервуарами (океан + наземна біосфера).

За умови E = S зміна запасу вуглецю в атмосфері наближається до нуля, тобто надходження вуглецю врівноважується його поглинанням. Якщо E > S, вуглець накопичується в атмосфері; якщо E < S, його атмосферний запас зменшується. Цей балансовий принцип є основою оцінювання траєкторій скорочення глобальних викидів і формування кліматичних сценаріїв (рис. 1.5.) [9].

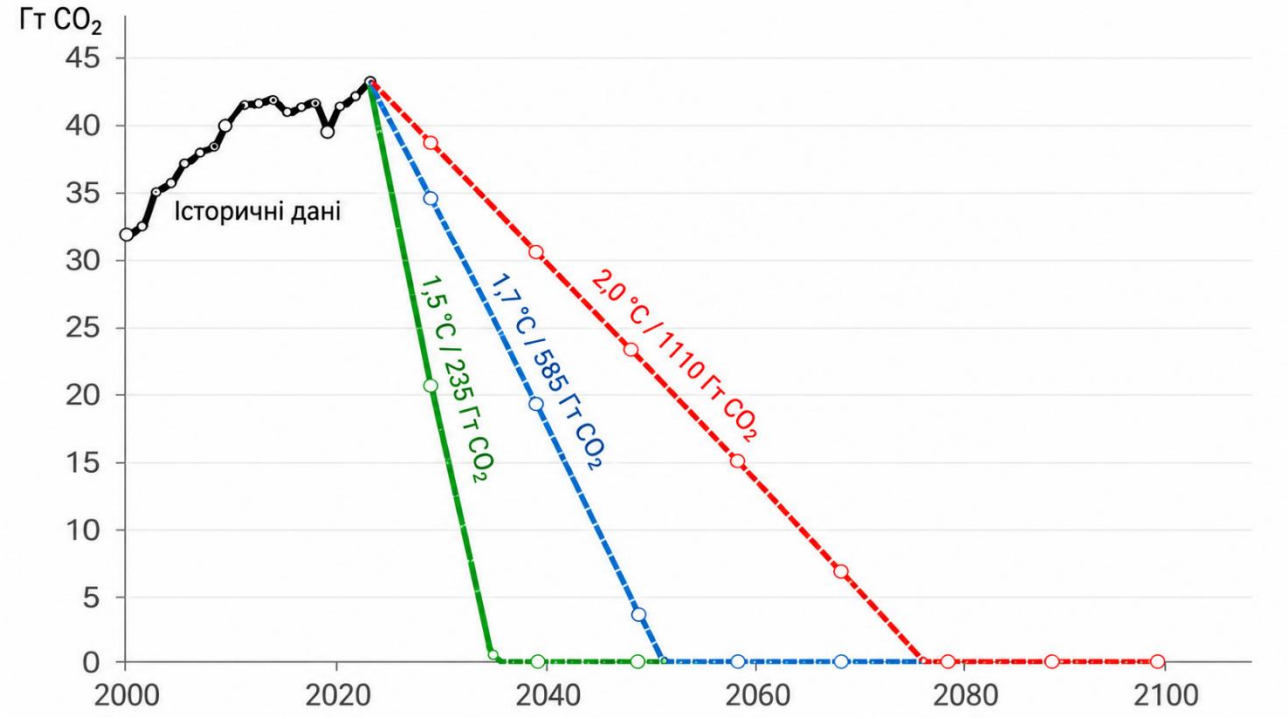


Рис 1.5. Сценарії скорочення глобальних викидів CO_2 (за даними [9])

Аналіз кліматичних сценаріїв, представлених на рис. 1.6., дозволяє виділити три критичні аспекти проблеми. По-перше, контроль над температурою можливий лише за умови негайного припинення викидів. Щоб утримати потепління в межах 1,5 – 2 °C, людство має досягти нульового балансу викидів якнайшвидше. Кожна зайва тонна CO_2 є прямим внеском у подальше зростання температури. По-друге, слід враховувати інерційність кліматичної системи. Молекули CO_2 залишаються в атмосфері протягом десятиліть і навіть століть. Це

означає, що температурний відгук на сучасні викиди збережеться надовго, навіть якщо ми повністю припинимо антропогенну діяльність сьогодні. По-третє, існує загроза досягнення «точок неповернення». Якщо концентрація вуглецю перевищить певні критичні межі, можуть запуститися незворотні процеси у кліматичній системі. У такому сценарії зміни стануть некерованими, і зусилля людства вже не зможуть їх зупинити.

Таким чином, стан вуглецевого циклу є інтегральним показником екологічної безпеки планети. Відхилення від природної рівноваги прямо корелює з частотою екстремальних погодних явищ, змінами у гідрологічних циклах та втратою біорізноманіття. У цьому контексті досягнення балансу між викидами та поглинанням вуглецю стає не просто екологічним пріоритетом, а фундаментальною умовою сталого розвитку цивілізації. Від цього залежить здатність земної системи підтримувати стабільні умови для життя у довгостроковій перспективі.

1.2 Нормативно-правове регулювання та міжнародні стандарти оцінки вуглецевого балансу

Розуміння кліматичних викликів та ключової ролі вуглецевого балансу сприяло формуванню комплексної системи міжнародних угод, національного законодавства та технічних стандартів, що регулюють облік, моніторинг та звітність викидів і поглинання парникових газів. Ця нормативно-правова база охоплює як юридично обов'язкові міжнародні договори, так і добровільні стандарти та методологічні керівництва, що створюють основу для обліку вуглецевих потоків на глобальному, національному та корпоративному рівнях.

Архітектура сучасного міжнародного кліматичного регулювання формувалася поетапно. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату, ратифікована 197 країнами, заклала базовий принцип «спільної але диференційованої відповідальності» та створила інституційну платформу для подальших переговорів [16]. Кіотський протокол (1997) розвинув цей принцип, запровадивши перші юридично обов'язкові кількісні цілі скорочення викидів для

розвинених країн у середньому на 5% нижче рівнів 1990 року у першому періоді зобов'язань (2008 – 2012 рр.) та на 18 % у другому (2013 – 2020 рр.) [17]. Попри обмежений успіх у досягненні глобального скорочення викидів, Протокол створив важливий прецедент юридично обов'язкових цілей та сформував інституційну інфраструктуру для обліку, моніторингу та верифікації викидів на міжнародному рівні [18]. Однак запроваджена архітектура «зверху вниз» та обмежене охоплення країн-учасниць (лише 37 розвинених держав несли обов'язкові зобов'язання) виявили принципові обмеження Кіотської моделі, що зумовило необхідність кардинального перегляду глобального підходу до кліматичного регулювання та створило передумови для укладення якісно нової угоди.

У грудні 2015 року на 21-й Конференції Сторін РКЗК ООН була прийнята Паризька угода, яка набрала чинності вже у листопаді 2016 року. Вона стала ключовим міжнародним документом сучасної глобальної кліматичної політики [19]. На відміну від Кіотського протоколу, який встановлював цілі «згори», Паризька угода дозволяє кожній країні самостійно визначати свої зобов'язання через Національно визначені внески [20]. Угода визначила три довгострокові цілі. По-перше, утримати зростання температури значно нижче 2°C від доіндустріального рівня, прагнучи до 1,5°C. По-друге, підвищити здатність країн адаптуватися до змін клімату. По-третє, спрямувати фінансові потоки на підтримку кліматично стійкого розвитку [20].

Ключовим механізмом угоди є п'ятирічні цикли оновлення зобов'язань. Кожні п'ять років країни мають представляти нові Національно визначені внески, які повинні бути амбітнішими за попередні [20]. Глобальною метою цієї діяльності є досягнення вуглецевої нейтральності у другій половині XXI століття, що, згідно з висновками IPCC, передбачає повне припинення чистих викидів CO_2 до 2050 року для стримування потепління в межах 1,5°C. Водночас механізм передбачає адаптивні умови для країн, що розвиваються, формуючи гнучку, але результативну модель міжнародного співробітництва. Таким чином, Паризька угода створила гнучку, але водночас амбітну систему глобальної кліматичної дії, що базується на національних зобов'язаннях, прозорості та

міжнародному співробітництві. Порівняльний аналіз двох ключових міжнародних кліматичних угод має важливе методологічне значення для розуміння еволюції глобальної системи регулювання викидів парникових газів. Для систематизації зазначених відмінностей та виявлення закономірностей розвитку міжнародного кліматичного регулювання доцільно зіставити ключові характеристики Кіотського протоколу та Паризької угоди (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз Кіотського протоколу та Паризької угоди

Критерій порівняння	Кіотський протокол (1997)	Паризька угода (2015)
Тип зобов'язань	Обов'язкові цілі для розвинених країн (Додаток I)	Національно визначені внески (НВВ) для всіх країн
Підхід	Зверху вниз – цілі визначаються на міжнародному рівні	Знизу вгору – країни самостійно визначають цілі
Охоплення країн	37 розвинених країн + ЄС (Додаток I)	Універсальна угода – 195 країн-учасниць
Довгострокова мета	Скорочення викидів на 5,2 % від рівня 1990 р. (перший період 2008 – 2012 рр.)	Утримання глобального потепління значно нижче 2°C, бажано 1,5°C
Базовий рік	1990 рік	Країни обирають власний базовий рік
Цикл перегляду	Періоди зобов'язань (2008 – 2012 рр., 2013 – 2020 рр.)	П'ятирічні цикли підвищення амбітності NDCs
Принцип відповідальності	Диференціація: тільки розвинені країни мають обов'язкові цілі	Спільна але диференційована відповідальність з урахуванням національних можливостей
Прозорість та звітність	Обов'язкова для країн Додатку I через національні кадастри	Єдина розширена рамка прозорості для всіх країн з 2024 р.
Адаптація	Не є центральним елементом	Рівноцінна увага адаптації та пом'якшенню наслідків

Джерело: розроблено автором на основі [16, 17, 18, 19, 20]

Як видно з табл. 1.1, Паризька угода радикально змінила архітектуру глобального кліматичного управління, перейшовши від жорстких «зверху вниз» зобов'язань до гнучкого «знизу вгору» підходу, який охопив практично всі країни світу.

Практичну реалізацію принципів Паризької угоди на регіональному рівні демонструє Європейська система торгівлі викидами (EU ETS), найбільша у світі система торгівлі вуглецем, запроваджена у 2005 році [21]. Система функціонує за принципом «обмеження та торгівлі»: встановлюється загальний ліміт на

викиди для всіх учасників, який поступово зменшується, а підприємства можуть торгувати квотами між собою. Станом на 2024 рік EU ETS охоплює близько 10 000 енергоємних підприємств у 30 країнах, що відповідають за близько 40 % викидів парникових газів ЄС [21].

Паралельно з EU ETS Європейський Союз запровадив Механізм прикордонного вуглецевого коригування (CBAM), затверджений Регламентом (ЄС) 2023/956, який встановлює вуглецеву ціну на імпорт товарів, еквівалентну вартості квот EU ETS. Для України, яка є значним експортером залізної руди та сталі до ЄС (близько 4,5 млн тонн сталі щорічно до війни), CBAM створює як виклики, так і стимули до декарбонізації [21].

Ключову роль у створенні міжнародних методик обліку парникових газів відіграє Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). Починаючи з 1995 року, МГЕЗК розробила три покоління методологічних керівництв, які поступово удосконалювалися з урахуванням нових наукових даних [12, 22, 23].

Перше покоління принципів у 1996 році стало першим комплексним набором методологій для обліку всіх парникових газів, регульованих Кіотським протоколом (CO_2, CH_4, N_2O, HFCs, PFCs, SF_6). У 2006 році з'явилося друге покоління керівництв, яке значно розширило методологічну базу і стало міжнародним стандартом. З 2015 року ці керівництва є обов'язковими для звітування розвинених країн. У 2019 році методології були оновлені з урахуванням нових наукових досягнень та додаткових джерел викидів [23].

Центральним у методології МГЕЗК є поняття «ключових категорій» – це джерела викидів парникових газів, що мають найбільший вплив на загальний рівень викидів країни, їх динаміку або невизначеність інвентаризації [22]. Країни повинні визначити свої ключові категорії та застосовувати для них найточніші методології. Зазвичай ключовими вважаються категорії, що сумарно становлять 95 % всіх викидів або тренду їх зміни [22]. Таким чином, методології МГЕЗК створюють гнучку систему обліку викидів парникових газів, яка дозволяє країнам з різним рівнем розвитку та доступністю даних проводити якісну інвентаризацію викидів, забезпечуючи при цьому порівнянність результатів на міжнародному рівні.

На корпоративному рівні ключову роль у обліку викидів відіграє Протокол парникових газів, розроблений Інститутом світових ресурсів та Всесвітньою радою підприємців зі сталого розвитку [24]. Цей стандарт став основою більшості національних та регіональних програм звітування викидів. Центральним елементом Протоколу є розподіл викидів компанії на три сфери залежно від джерела та ступеня контролю. Scope 1 охоплює прямі викиди від джерел, які належать компанії або контролюються нею. Scope 2 включає непрямі викиди від виробництва енергії, яку компанія купує для власних потреб - електроенергії, тепла, пари або холоду. Scope 3 охоплює всі інші непрямі викиди у ланцюзі створення вартості, які не входять до попередніх категорій. Протокол виділяє 15 категорій таких викидів. У напрямку постачальників це придбані товари та послуги, капітальне обладнання, транспортування вхідних матеріалів, поводження з відходами, ділові подорожі та переміщення працівників, орендовані активи. У напрямку споживачів, транспортування готової продукції, її обробка, використання та утилізація, франшизи та інвестиції [25].

Перехід від міжнародних стандартів до національного рівня вимагає розгляду законодавчої бази України у сфері обліку викидів парникових газів та кліматичної політики. В Україні поступово формується окремий напрям екологічного регулювання: кліматичне право, що охоплює нормативно-правові акти, спрямовані на боротьбу зі зміною клімату, зменшення викидів парникових газів, адаптацію до нових кліматичних умов та забезпечення сталого розвитку.

Основним законом у сфері кліматичної політики є Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики» №3991-IX, ухвалений 8 жовтня 2024 року. Цей закон визначає правові та організаційні засади кліматичної політики держави, включаючи забезпечення низьковуглецевого та сталого розвитку, гарантування екологічної, продовольчої та енергетичної безпеки [26].

Зобов'язання щодо скорочення викидів стали однією з ключових цілей Національного плану з енергетики та клімату до 2030 року, затвердженого Урядом у червні 2024 року. Вже в березні 2025 року Україна подала перший звіт про прогрес у його впровадженні. У 2022 році було затверджено Національний план з адаптації до зміни клімату, що визначає напрями зменшення вразливості

економіки та суспільства до наслідків зміни клімату [27, 28]. Окремим стратегічним вектором гармонізації національного законодавства є регулювання сектору LULUCF (землекористування, зміни землекористування та лісового господарства), який відіграє критичну роль у компенсації антропогенних викидів [29, 30]. Національний план з енергетики та клімату (НПЕК) до 2030 року розглядає цей сектор не лише як резервуар вуглецю, а як активний інструмент досягнення нетто-нульового балансу [28]. Зокрема, НПЕК та Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату передбачають низку стимулюючих заходів, спрямованих на посилення поглинальної здатності екосистем. До них належать розширення площ лісовідновлення та залісення, впровадження методів вуглецевого землеробства, ревіталізація водно-болотних угідь.

У 2021 році набрав чинності Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів» від 12 грудня 2019 р. №377-IX. Згідно з цим законом, визначені Урядом великі і середні промислові підприємства України зобов'язані готувати плани з моніторингу викидів. Щорічно підприємства повинні готувати звіти про викиди, які перевіряються незалежними верифікаторами та подаються на затвердження [31, 32].

Для наочного розуміння взаємозв'язку між глобальними, європейськими та національними стандартами оцінки вуглецевого балансу доцільно представити їх ієрархічну структуру та механізми імплементації (рис. 1.6.).

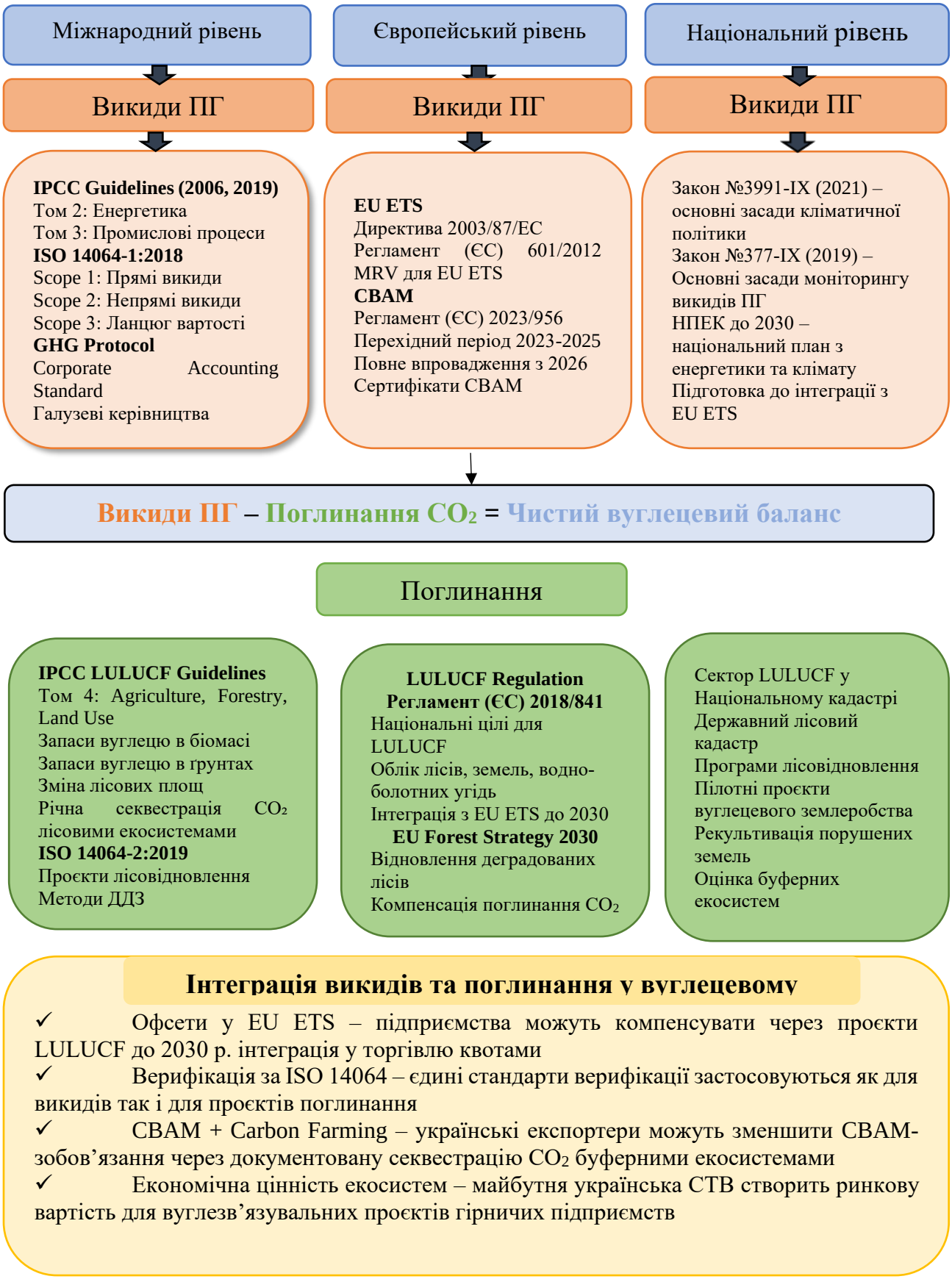


Рис. 1.6. Ієрархія міжнародних стандартів оцінки вуглецевого балансу та їх імплементація в Україні (розроблено автором за даними [17, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 28,у формуванні 31,32])

Як видно з рис. 1.7., система міжнародних стандартів побудована за принципом послідовної деталізації: глобальні методологічні рамки IPCC адаптуються на європейському рівні через регламенти EU ETS та LULUCF, а згодом імплементуються у національне законодавство з урахуванням специфіки економіки. Критичною особливістю цієї архітектури є дуальна природа вуглецевого балансу, паралельний облік викидів парникових газів (верхній ярус схеми) та їх поглинання екосистемами сектору LULUCF (нижній ярус). Ця структура створює методологічне підґрунтя для компенсаційних механізмів, коли промислові підприємства можуть зараховувати документовану секвестрацію CO_2 буферними екосистемами у рахунок зменшення власного вуглецевого сліду.

Однак практична імплементація міжнародних стандартів вуглецевого обліку в Україні стикається з низкою специфічних бар'єрів, які суттєво відрізняють національний контекст від європейського. По-перше, воєнний стан створює об'єктивні обмеження для проведення моніторингу викидів на тимчасово окупованих територіях та у прифронтових зонах, де розташовані значні промислові потужності, зокрема гірничодобувні підприємства. Як свідчать перехідні положення Закону №377-IX, законодавець фактично визнав неможливість повноцінної звітності за період 2021 – 2023 років, надавши операторам право не подавати звіти за воєнний період. По-друге, технічна неготовність українських підприємств до застосування методологій МЗВ виявляється у відсутності сертифікованого вимірювального обладнання, кваліфікованого персоналу для проведення інвентаризації викидів за стандартами ISO 14064 та досвіду роботи з акредитованими верифікаторами. Експертні оцінки свідчать, що для приведення систем моніторингу українських гірничо-збагачувальних підприємств у відповідність до вимог CBAM знадобиться від 18 до 24 місяців та інвестиції у розмірі €50-100 тис. на одне підприємство [33]. По-третє, відсутність функціонуючого вуглецевого ринку та єдиного реєстру квот позбавляє підприємства можливості апробувати механізми торгівлі викидами та накопичити досвід, який би полегшив майбутню інтеграцію з EU ETS. Ці структурні обмеження створюють ризик того, що українські

експортери опиняться у невигідному становищі порівняно з конкурентами з інших країн, які мають більше часу на підготовку до повноцінного запуску CBAM у 2026 році.

Отже, підсумовуючи варто зазначити, що Україна завершила етап нормативного забезпечення та перейшла до фази технічної імплементації, де критичним викликом є синхронізація темпів адаптації промисловості з графіком впровадження CBAM (2026 рік).

1.3. Гірничо-збагачувальні підприємства як джерела викидів парникових газів та шляхи оптимізації їх вуглецевого балансу

Досягнення глобальних кліматичних цілей неможливе без радикальної трансформації енергоємних галузей економіки. Гірничодобувна промисловість, будучи фундаментом індустріального розвитку, водночас є одним із найбільших джерел парникових газів, що вимагає детального аналізу джерел викидів та потенційних шляхів їх мінімізації. У структурі глобальних промислових викидів гірничодобувна галузь формує не лише прямі викиди від видобутку та переробки сировини, але й значний ланцюг непрямих викидів через споживання електроенергії та матеріальні потоки [1, 34]. Науковці протягом останніх двох десятиліть приділяють значну увагу проблемі вуглецевого сліду гірничо-збагачувальних підприємств. Фундаментальні дослідження Azadi та колег встановили, що світова гірничодобувна галузь відповідає за 4 – 7 % глобальних антропогенних викидів діоксиду вуглецю, з тенденцією до зростання цього показника [1]. За даними останніх досліджень, гірничодобувна індустрія залишається одним із найбільших промислових джерел викидів, при цьому більше 650 об'єктів у понад 50 країнах світу взяли на себе зобов'язання досягти нульових викидів для сфер дії 1 та 2 до 2050 року [35].

Причиною зростання питомих викидів є об'єктивний процес виснаження високосортних родовищ та залучення в експлуатацію низькоякісних руд з підвищеною енергоємністю переробки. Дослідження Norgate і Haque підтвердили цю закономірність, продемонструвавши, що середня енергоємність

видобутку та збагачення мінеральної сировини за останні три десятиліття зросла майже вдвічі з 0,8 – 1,2 ГДж/т у 1990-х роках до 1,5 – 2,3 ГДж/т на початку 2020-х років, що підтверджує гіпотезу про наближення галузі до точки критичного зростання питомих енергетичних витрат [34].

Викиди парникових газів в результаті роботи гірничо-збагачувальних підприємств класифікують за трьома сферами дії відповідно до методології Протоколу викидів парникових газів, який ліг в основу вимог Паризької угоди та системи торгівлі викидами ЄС (EU ETS). Ця класифікація дозволяє розмежувати пряму відповідальність підприємства за викиди (Scope 1), його непряму відповідальність через споживання енергії (Scope 2) та викиди у всьому ланцюгу створення вартості (Scope 3) [24, 25]. Для гірничо-збагачувальних підприємств структура цих сфер має специфічні особливості, детально відображені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2.

Класифікація джерел викидів парникових газів гірничо-збагачувальних підприємств за сферами охоплення

Сфера дії	Визначення	Джерела викидів на гірничо-збагачувальних підприємствах
Scope 1 (Прямі викиди)	Викиди від джерел, які належать підприємству або контролюються ним	1.Котельні та системи опалення 2.Обпалювальні машини 3.Мобільна техніка 4.Буро-підривні роботи
Scope 2 (Непрямі енерге-тичні викиди)	Викиди від виробництва купленої електроенергії, тепла, пари або холоду	1. Електроприводи дробарок, млинів, сепараторів 2. Насосні станції водопостачання 3. Вентиляційні системи 4. Конвеєрні лінії 5. Освітлення та допоміжне обладнання
Scope 3 (Інші непрямі викиди)	Викиди у ланцюгу створення вартості, які не контролюються підприємством	Вище за ланцюгом 1.Видобуток і транспортування палива для енергогенерації 2. Виробництво хімреагентів 3. Виробництво обладнання та запчастин Нижче за ланцюгом 1.Транспортування концентрату/окатишів до споживачів 2. Переробка продукції у сталь (доменне виробництво) 3. Утилізація відходів металургійного циклу

Джерело: розроблено автором на основі [36]

Наведена класифікація дає можливість розмежувати джерела викидів парникових газів за ступенем організаційного контролю підприємств та етапами ланцюга створення вартості. Найбільш вагомою категорією є Scope 2, тоді як внесок Scope 1 і Scope 3 (у межах операційного контролю) є відносно меншим, але не менш важливим з точки зору управлінських рішень.

Сфера дії 1 (Scope 1) охоплює прямі викиди від стаціонарних та мобільних джерел, які підприємство безпосередньо контролює. За даними Huang зі співавторами, котельні та системи опалення формують 8 – 15 % загального вуглецевого сліду при використанні сучасного обладнання [37]. Kinnunen і Kaksonen, дослідивши 47 великих гірничих підприємств, встановили, що сукупні викиди від мобільної техніки становлять 10 – 18 % від загального вуглецевого сліду. Загалом Scope 1 формує 15 – 25 % від сукупних прямих викидів гірничо-збагачувальних підприємств [38].

Сфера дії 2 (Scope 2) є домінуючою категорією. Вчені Ballantyne і Powell встановили, що процеси механічного подрібнення руди споживають 35 – 50 % загальної електроенергії збагачувальних фабрик [39]. Саме тому ці витрати формують основний масив непрямих енергетичних викидів. Azadi та колеги підтвердили, що Scope 2 часто перевищує 60 – 70 % сукупних викидів підприємства [1]. Критичним чинником є вуглецева інтенсивність регіональної електрогенерації, у країнах з переважно вугільною генерацією коефіцієнт емісії сягає 0,8 – 1,0 кг CO_2/кВт·год, тоді як у регіонах з розвинутою атомною чи гідроенергетикою лише 0,1 – 0,3 кг CO_2/кВт·год. Для України вуглецева інтенсивність енергосистеми станом на 2024 рік становить близько 0,60 кг CO_2/кВт·год. Це означає, що декарбонізація виробництва електрогенерації є найефективнішим важелем зниження викидів на цих підприємствах [40].

Сфера дії 3 (Scope 3) охоплює викиди по всьому ланцюгу створення вартості, починаючи від видобутку сировини для виробництва обладнання до утилізації кінцевої металургійної продукції. Важливо розрізняти дві підкатегорії цієї сфери. Викиди від ланцюга постачання та транспортування, які перебувають у межах практичного моніторингу гірничо-збагачувальних підприємств,

становлять 15 % від операційного вуглецевого сліду. Натомість викиди металургійного виробництва (доменне виробництво сталі) при повному LCA-аналізі збільшують реальну частку Scope 3 до ~60% від сукупних викидів сектору [1, 34]. При врахуванні цих викидів загальний внесок гірничодобувної промисловості у глобальні викиди зростає з 4 – 7 % до 28 %, що підкреслює важливість комплексного підходу до декарбонізації. Аналіз динаміки викидів діоксиду вуглецю від стаціонарних джерел на регіональному рівні засвідчує визначальну роль промислових об'єктів у формуванні вуглецевого навантаження [41]. Водночас діяльність видобувних підприємств супроводжується комплексом екологічних ризиків, оцінювання яких є невід'ємною складовою їх сталого розвитку [42]. Наочне співвідношення трьох сфер дії у межах операційного контролю гірничо-збагачувальних підприємств представлено на рис. 1.7.

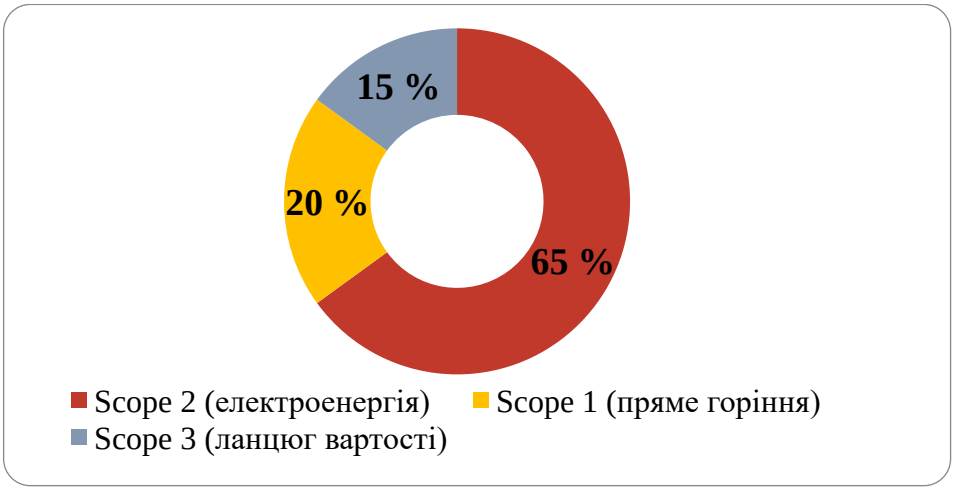


Рис. 1.7. Розподіл викидів парникових газів гірничо-збагачувальних підприємств за сферами дії (розроблено автором на основі [33, 34, 35, 37])

Примітка: Показник 15 % відображає викиди від ланцюга постачання та транспортування (Scope 3). Не враховано викиди від подальшого металургійного виробництва (доменне виробництво сталі), які збільшують реальний Scope 3 до ~60% від сукупних викидів сектору при повному LCA-аналізі.

Таким чином, структура викидів гірничо-збагачувальних підприємств характеризується домінуванням Scope 2 (60 – 70 %), що зумовлено високою електроємністю збагачувальних процесів, та істотною часткою Scope 3 при застосуванні повного LCA-підходу (~60% від сукупних викидів сектору). З

огляду на вимоги EU ETS та механізму вуглецевого коригування на кордоні (CBAM), саме ці категорії визначають регуляторне навантаження на українські видобувні підприємства в умовах європейської інтеграції.

Практична реалізація цих стандартів набуває особливого значення для України, залізорудна промисловість якої посідає 7 – 8 місце у світі за обсягами виробництва окатишів та відіграє стратегічну роль у забезпеченні економічної стабільності держави, формуючи близько 7,2 % ВВП України протягом 2024 – 2025 років. Провідні гірничо-збагачувальні комбінати України, серед яких Ferrexpo (Полтавський та Єристівський ГЗК), Metinvest (Інгулецький, Північний, Центральний ГЗК) та ArcelorMittal Kryvyi Rih, характеризуються значним вуглецевим слідом. Головними причинами є: висока частка вугільної генерації в енергобалансі України; застаріле енергоємне обладнання (моральний знос 60 – 70 %); переважання природного газу як енергоносія для випалу окатишів; значні обсяги порушених земель (понад 150 тис. га) [43].

Аналіз діяльності ключових виробників у 2024 – 2025 роках свідчить про вимушену адаптацію до зовнішніх викликів. Зокрема, на прикладі компанії Ferrexpo спостерігається трансформація структури товарної продукції, у 2025 році обсяги випуску окатишів скоротилися на 38,5 % порівняно з 2024 роком, тоді як виробництво концентрату зросло майже у п'ять разів (рис. 1.8.).

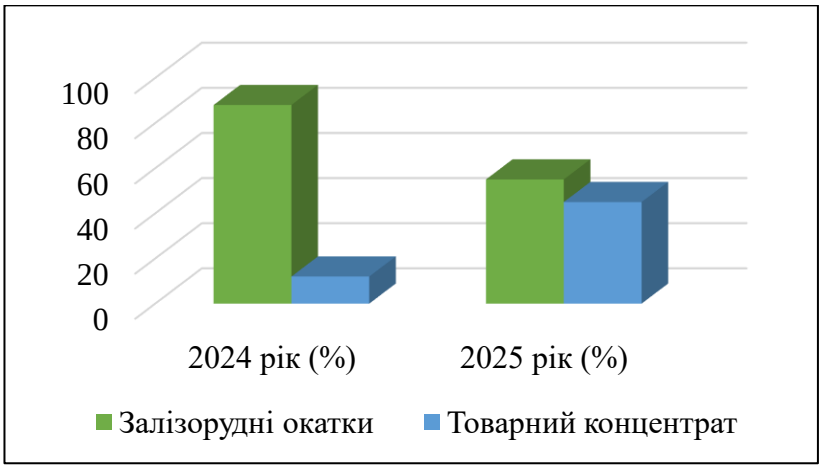


Рис. 1.8. Динаміка структури товарної продукції Ferrexpo у 2024 – 2025 рр. (розроблено автором на основі [44])

Така динаміка зумовлена стратегією адаптації до енергетичних ризиків, виробництво концентрату потребує менших питомих витрат електроенергії на тонну готової продукції, що дозволяє підприємствам підтримувати стабільні обсяги експорту навіть за умов обмеженого енергопостачання. Попри тимчасову зміну структури експорту, впровадження найкращих доступних технологій та методів (НДТМ) для скорочення викидів при виробництві окатишів залишається критичним пріоритетом [21, 33]. Аналіз міжнародного досвіду дозволяє систематизувати технологічні рішення за категоріями (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Класифікація найкращих доступних технологій для декарбонізації гірничо-збагачувальних підприємств

Категорія НДТМ	Технологічні рішення	Потенціал зниження викидів	Рівень технологічної готовності (TRL)
1	2	3	4
1. Електрифікація обладнання			
1.1	Електричні самоскиди та навантажувачі	25 – 30% (Scope 1)	TRL 8 – 9 (комерційне впровадження)
1.2	Електричні конвеєри з рекуперацією енергії	15 – 20% (Scope 2)	TRL 9 (промислова експлуатація)
1.3	Електричні буро-підривні установки	10 – 15% (Scope 1)	TRL 7 – 8 (демонстраційна стадія)
2. Відновлювані джерела енергії			
2.1	Сонячні фотоелектричні системи	40 – 60% (Scope 2)	TRL 9 (промислова експлуатація)
2.2	Вітрові електростанції	35 – 55% (Scope 2)	TRL 9 (промислова експлуатація)
2.3	Гібридні мікромережі з акумулюванням	50 – 70% (Scope 2)	TRL 7 – 8 (пілотне впровадження)
3. Зміна палива			
3.1	Біопаливо для мобільної техніки	20 – 40% (Scope 1)	TRL 8 – 9 (комерційна стадія)
3.2.	Водневі технології (DRI)	90 – 95% (Scope 1, 3)	TRL 6 – 7 (пілотна стадія)
3.3	Синтетичне паливо (e-fuel)	70 – 80% (Scope 1)	TRL 5 – 6 (лабораторна стадія)

Продовження таблиці 1.3

1	2	3	4
4. Циркулярна економіка			
4.1	Переробка хвостів збагачення	5 – 10% (непрямі викиди)	TRL 8 – 9 (промислова стадія)
4.2	Утилізація теплових викидів	8 – 12% (Scope 1, 2)	TRL 7 – 8 (демонстраційна стадія)
4.3	Мінеральна карбонізація відходів	10 – 55% (Scope 1)	TRL 6 – 7 (пілотна стадія)
5. Енергоефективність			
5.1	Системи енергоменеджменту на основі AI	8 – 15% (Scope 1, 2)	TRL 8 – 9 (комерційна стадія)
5.2	Оптимізація процесів подрібнення (ML)	12 – 18% (Scope 2)	TRL 7 – 8 (пілотна стадія)
5.3	Предиктивне обслуговування обладнання	10 – 15% (Scope 1, 2)	TRL 8 – 9 (комерційна стадія)
5.4	Автономні системи управління	15 – 25% (Scope 1, 2)	TRL 7 – 8 (демонстраційна стадія)

Джерело: розроблено автором на основі [45, 46, 47, 48, 49, 50]

Вибір конкретних технологій повинен базуватися на багатокритеріальному підході, що враховує екологічну ефективність, технічну здійсненність та економічну доцільність. Диференційований вплив кожної категорії НДТМ на окремі сфери дії викидів представлено у матриці (табл. 1.4).

Таблиця 1.4

Матриця впливу НДТМ на сфери дії викидів гірничо-збагачувальних підприємств

Категорія НДТМ	Scope 1	Scope 2	Scope 3
1. Електрифікація обладнання			
2. Відновлювані джерела енергії			
3. Зміна палива (водень, біопаливо)			
4. Циркулярна економіка			
5. Енергоефективність			

Примітка: зелений колір - сильний вплив, жовтий колір - помірний вплив, сірий колір - слабкий/непрямий вплив, прозорий - відсутній вплив (розроблено автором).

Як свідчать дані табл. 1.4, найбільший пріоритет для українських гірничо-збагачувальних підприємств мають категорії 2 (відновлювані джерела енергії) та 5 (енергоефективність), оскільки обидві чинять сильний вплив на Scope 2, який є домінуючою складовою вуглецевого сліду підприємств. Категорії 1 та 3 є критичними для скорочення Scope 1, тоді як категорія 4 (циркулярна економіка) забезпечує помірний ефект одночасно у кількох сферах дії, що робить її цінним доповненням до основних стратегій декарбонізації.

Визначені пріоритети НДТМ набувають особливої практичної значимості в контексті зовнішнього регуляторного тиску, що формує економічні стимули для прискореної декарбонізації українських гірничо-збагачувальних підприємств. Одним з таких стимулів є Механізм вуглецевого коригування на кордоні ЄС (CBAM), повноцінне запровадження якого розпочнеться з 2026 року. Принцип дії механізму полягає у тому, що імпортери зобов'язані сплачувати різницю між вуглецевою ціною у країні виробництва та ціною EU ETS, що фактично ліквідує конкурентну перевагу від відсутності внутрішнього вуглецевого регулювання [21]. Таким чином, декарбонізація для українських гірничо-збагачувальних підприємств є не просто екологічним зобов'язанням, а питанням економічного виживання. Наприклад, навіть часткове наближення вуглецемісткості до рівня європейських аналогів (0,4 – 0,6 т CO_2/т) вдвічі скорочує CBAM-навантаження на Ferrexpo, що саме по собі формує потужний інвестиційний стимул [44]. Отже, НДТМ категорій 2 і 5 слід розглядати не як витрати на відповідність регуляторним вимогам, а як стратегічні інвестиції, що визначатимуть конкурентоспроможність українських виробників окатишів на ринку ЄС у довгостроковій перспективі.

Водночас максимальний синергетичний ефект від впровадження НДТМ може бути досягнутий лише за умови інтеграції підприємств у спільні матеріально-енергетичні цикли. Саме цей принцип покладений в основу концепції еко-промислових парків (ЕПП) [51]. Це промислові кластери, де підприємства інтегровані через цілеспрямований обмін матеріальними та енергетичними потоками, перетворюючи відходи одного виробника на ресурс для іншого [51]. Для гірничо-збагачувальних комбінатів це може означати

спільне використання енергетичної інфраструктури із сусідніми підприємствами з потенціалом зниження Scope 1 на 8 – 12 %, передачу теплових відходів обпалювальних машин для потреб централізованого теплопостачання з утилізацією до 30 % теплової енергії, а також використання хвостів збагачення як сировини для виробництва будівельних матеріалів, що скорочує Scope 3 від транспортування відходів. Класичним прикладом успішного індустріального симбіозу є кластер у Калундборзі (Данія), де металургійний комплекс, нафтопереробка та фармацевтичне виробництво сформували замкнений ресурсний цикл із сукупним скороченням викидів на 25 % [52]. В Україні потенціал ЕПП залишається значною мірою нереалізованим через територіальну розосередженість гірничо-збагачувальних підприємств та відсутність законодавчої бази для регулювання міжкорпоративних угод щодо обміну побічними продуктами, що визначає необхідність інституційних змін як передумови для впровадження цієї моделі.

Отже, гірничо-збагачувальні підприємства є одними з найбільш вуглецемістких суб'єктів промислової діяльності, структура викидів яких характеризується домінуванням Scope 2 (60 – 70 %) внаслідок високої електромісткості збагачувальних процесів. Аналіз міжнародного досвіду свідчить, що ефективна декарбонізація гірничо-збагачувальних підприємств потребує комплексного застосування НДТМ з пріоритетом категорій відновлюваної енергетики та енергоефективності, які забезпечують найбільший вплив саме на домінуючу складову вуглецевого сліду. Для українських виробників окатишів цей процес набуває критичної економічної ваги в умовах запровадження CBAM з 2026 року, збереження існуючої вуглецемісткості загрожує втратою цінової конкурентоспроможності на ринку ЄС, тоді як інвестиції у декарбонізацію окупляться за 3 – 5 років виключно за рахунок уникнених регуляторних платежів. Перспективним системним рішенням, здатним посилити ефект точкових технологічних заходів, є розвиток еко-промислових парків, однак його реалізація в українському контексті потребує як технологічної модернізації підприємств, так і відповідних інституційних змін на державному рівні.

Таким чином, комплексне застосування НДТМ та розвиток еко-промислових парків створюють потужний технологічний інструментарій для скорочення викидів гірничо-збагачувальних підприємств. Проте навіть за умови повного впровадження найбільш ефективних технологічних рішень залишкові викиди, передусім від процесів випалу окатишів та споживання електроенергії з вугільної генерації, є технологічно неминучими у середньостроковій перспективі. Це обумовлює необхідність паралельного розвитку природних компенсаційних механізмів, центральне місце серед яких займають буферні екосистеми на рекультивованих землях гірничо-промислових територій.

1.4. Екологічний потенціал буферних екосистем у депонуванні та секвестрації вуглецю в умовах техногенезу

Аналіз найкращих доступних технологій декарбонізації показав, що навіть за найоптимістичніших сценаріїв повне усунення викидів гірничо-збагачувальних підприємств є технологічно недосяжним у середньостроковій перспективі. Залишкові викиди, зокрема від процесів випалу окатишів (Scope 1) та споживання електроенергії з частково вугільної генерації (Scope 2), вимагатимуть компенсаційних механізмів для досягнення цільового показника вуглецевої нейтральності до 2050 – 2060 років.

У цьому контексті критично важливу роль відіграють буферні екосистеми, що формуються навколо промислових об'єктів внаслідок цілеспрямованої рекультивації порушених земель. Ці екосистеми здатні частково компенсувати техногенні викиди через природні механізми секвестрації вуглецю, одночасно забезпечуючи широкий спектр додаткових екосистемних послуг [53]. Зелені насадження урбанізованих і промислових територій виконують функцію підтримання екологічної рівноваги та забезпечують комплекс екологічних послуг [54, 55], зокрема поглинання CO_2 рослинним покривом, що підтверджено інструментальними дослідженнями газообміну [56].

Вуглецева секвестрація екосистемами є складним багатокомпонентним процесом, що поєднує біохімічні, біологічні та ґрунтово-хімічні механізми перетворення атмосферного діоксиду вуглецю у стабільні форми органічного та неорганічного вуглецю [57]. Фундаментальну основу цього процесу становить фотосинтез, біохімічне перетворення CO_2 та води у органічні сполуки під дією сонячної енергії через цикл Кальвіна-Бенсона-Бассама [58]. У контексті вуглецевого балансу наземних екосистем розрізняють два основні резервуари депонування: надземну та підземну біомасу рослин (активне депонування з періодом обігу 1 – 100 років) та органічну речовину ґрунту (пасивне депонування з періодом обігу до тисяч років) [59, 60].

Критичну роль у процесах стабілізації вуглецю відіграє ґрунтова мікробіота, автотрофні мікроорганізми здійснюють первинну фіксацію CO_2, тоді як гетеротрофи трансформують рослинні рештки у стабільні гумусові сполуки з періодом обігу до сотень років. Інокуляція техногенних субстратів мікробними консорціумами дозволяє прискорити формування біологічних ґрунтових кірок на 2 – 3 роки [61, 62].

Концептуально важливим є розмежування термінів «секвестрація» та «депонування» вуглецю [63]. Секвестрація означає активний процес вилучення CO_2 з атмосфери та його включення у біологічні або геологічні резервуари, тоді як депонування описує тривале зберігання вуглецю у стабільних формах з мінімальним ризиком повернення в атмосферу. Для гірничо-промислових ландшафтів обидва процеси є критично важливими, секвестрація забезпечує активну компенсацію поточних викидів, а депонування довгострокове виведення вуглецю з глобального циклу [64].

Кількісні показники вуглецевої секвестрації різняться залежно від типу екосистеми, кліматичних умов та стадії сукцесії. Аналіз останніх досліджень показав, що молоді лісові насадження (вік 10 – 30 років) демонструють найвищі темпи секвестрації вуглецю у біомасі на рівні 3,5 – 5,0 Мг С/га/рік, які поступово знижуються до 1,0 – 2,0 Мг С/га/рік у зрілих лісах віком понад 100 років. Лугові екосистеми характеризуються нижчими показниками накопичення вуглецю у надземній біомасі (0,5 – 1,5 Мг С/га/рік), проте їхня перевага полягає у значній

частці підземної біомаси та інтенсивному депонуванні вуглецю у кореневій зоні ґрунту [65, 66, 67].

Механізми втрат вуглецю при гірничих розробках є багатофакторними та включають як прямі, так і опосередковані процеси [68]. Прямі втрати пов'язані з повним знищенням рослинного покриву та механічним порушенням ґрунтового профілю при видаленні розкривних порід та формуванні техногенних ландшафтів (відвалів, кар'єрів, хвостосховищ). Опосередковані втрати виникають внаслідок зміни гідрологічного режиму прилеглих територій, забруднення ґрунтів важкими металами та іншими забруднюючими речовинами, що знижує продуктивність залишкових екосистем на відстані до декількох кілометрів від епіцентру гірничої діяльності [69].

Критично важливим є часовий аспект вуглецевих втрат. Якщо знищення надземної біомаси відбувається миттєво на етапі розкривних робіт, то деградація ґрунтового вуглецю є поступовим процесом, що може тривати десятиліття [70]. Складовані у відвали техногенні ґрунти (техноземи) характеризуються екстремально низьким вмістом органічного вуглецю, зазвичай менше 0,5 % порівняно з 2 – 5 % у непорушених ґрунтах регіону. Окрім того, порушення земель супроводжується руйнуванням мікробних спільнот ґрунту, що може призвести до втрати функціональної здатності екосистеми до вуглецевої секвестрації навіть після відновлення рослинного покриву [71, 72].

Особливо критичною є ситуація з торфовищами та водно-болотними угіддями у зонах гірничого впливу. Ці екосистеми містять надзвичайно високі концентрації вуглецю (до 500 т С/га у торфових відкладах), накопиченого протягом тисячоліть за умов анаеробного середовища. Осушення або пряме порушення таких територій призводить до катастрофічного вивільнення CO_2 та CH_4 у атмосферу зі швидкістю, що може перевищувати 10 – 20 т CO_2-екв./га щорічно протягом десятиліть [73, 74].

Комплексний аналіз наслідків великомасштабного вугільного видобутку відкритим способом продемонстрував, що навіть після впровадження відновлювальних заходів, які збільшили запаси вуглецю на 192,51 Гг CO_2 за період 2001 – 2022 років, загальний дефіцит секвестрації на гірничих територіях

станом на 2022 рік все ще становив 1966,7 Гг CO_2 [75]. Це підкреслює необхідність тривалих, системних програм рекультивації та відновлення, розрахованих на десятиліття.

Формування буферних екосистем навколо промислових об'єктів створює значний потенціал для часткової компенсації техногенних викидів CO_2 через природні механізми секвестрації вуглецю [76, 77]. Аналіз останніх досліджень лісовідновлення на постгірничих територіях у помірних та бореальних зонах показав, що ліси на рекультивованих землях досягають показників накопичення вуглецю 2,8 Мг С/га/рік у надземній та підземній біомасі протягом перших п'ятдесяти років після посадки [78]. Паралельно відбувається поступове відновлення органічного вуглецю ґрунту зі швидкістю приблизно 1,0 Мг С/га/рік, хоча цей процес може бути повільнішим на техногенних субстратах з несприятливими фізико-хімічними властивостями. Критично важливим фактором успішності лісової рекультивації є правильний підбір деревних порід: швидкорослі листяні види (тополя, верба, береза) забезпечують високі темпи накопичення біомаси у перші 10 – 20 років, тоді як хвойні породи (сосна, ялина) формують більш стабільні довгострокові резервуари вуглецю [79].

Лугова рекультивація, хоча і характеризується нижчими показниками загальної вуглецевої секвестрації порівняно з лісовою (зазвичай 1,5 – 2,5 Мг С/га/рік), має суттєві переваги для специфічних умов гірничо-промислових ландшафтів [65, 78, 80]. По-перше, лугові фітоценози швидше встановлюються на техногенних субстратах і не вимагають складних агротехнічних заходів. По-друге, значна частка вуглецю у лугових екосистемах (до 70 – 80 %) зосереджена у ґрунті у формі кореневих решток та ризодепозитів, що забезпечує вищу стабільність депонування порівняно з надземною біомасою. По-третє, багаторічні трави характеризуються високою стійкістю до екстремальних умов техногенних ландшафтів. Інноваційним напрямком прискорення вуглецевої секвестрації на рекультивованих територіях є застосування мікробних технологій. Інокуляція техногенних субстратів консорціумами автотрофних мікроорганізмів (ціанобактерії, зелені водорості) дозволяє сформувати біологічні ґрунтові кірки протягом 2 – 3 років, що

прискорює накопичення органічної речовини та створює сприятливі умови для колонізації вищими рослинами [81].

Вибір оптимальної стратегії рекультивації для конкретної території вимагає комплексного аналізу екологічних, економічних та часових факторів. Порівняльний аналіз основних типів рекультивації, застосовуваних на постгірничих територіях, дозволяє оцінити їх відносну ефективність у контексті вуглецевої секвестрації (табл. 1.5).

Таблиця 1.5

Порівняльна характеристика напрямів рекультивації порушених земель для формування буферних екосистем гірничо-збагачувальних підприємств

Тип рекультивації	Темп секвестрації (Мг С/га/рік)	Час досягнення стабільного стану	Переваги	Обмеження
Лісова (хвойні породи)	1,0-2,0 (ґрунт); 2,8 (біомаса + підстилка)	80 ─120 років	Високі довгострокові запаси вуглецю; стабільність депонування; додаткові екосистемні послуги	Повільний початковий ріст; вимогливість до ґрунтів; довгий період окупності
Лісова (листяні породи)	2,0 ─ 3,9	50 ─ 80 років	Швидший ріст у перші 20-30 років; висока інтенсивність секвестрації; адаптивність до техноземів	Нижча стабільність порівняно з хвойними; потребує догляду; уразливість до пожеж
Лугова	0,8 ─ 1,5	30 ─ 50 років	Швидке встановлення фітоценозу; 70-80 % вуглецю акумулюється у ґрунті; стійкість до екстремальних умов; низька вартість	Нижча загальна місткість секвестрації; потребує управління (скошування); ризик деградації без догляду
Водно-болотна (штучні водойми на хвостосховищах)	0,35 ─ 1,10 (мінеральні ґрунти); до 2,5 (торф'яні)	20 ─ 64 роки	Висока питома місткість ґрунтового вуглецю; відновлення екологічних функцій і регулювання поверхневого стоку	Ризик емісії CH_4; залежність від гідрологічного режиму; складність управління
Агролісова (сільського-сподарсько-лісові системи)	1,4 (ґрунт) + 5,7 (біомаса)	40 ─ 60 років	Поєднує секвестрацію з продуктивністю ґрунту; висока загальна ефективність; економічна привабливість	Складність управління; залежність від ґрунтових умов; слабка законодавча база в Україні

Джерело: узагальнено автором на основі [80, 81, 82, 83]

Як видно з таблиці 1.5, не існує універсального рішення для всіх типів постгірничих ландшафтів. Лісова рекультивація листяними породами забезпечує найвищі темпи секвестрації у середньостроковій перспективі (3,5 – 5,0 Мг С/га/рік), проте вимагає значних капітальних інвестицій та тривалого періоду досягнення стабільного стану. Лугова рекультивація, незважаючи на нижчу

інтенсивність вуглепоглинання, є найбільш економічно доступною та швидко реалізованою альтернативою для підприємств з обмеженим бюджетом екологічних програм. Інноваційні підходи на основі мікробних технологій дозволяють скоротити часовий лаг відновлення екосистем до 20 – 30 років, проте потребують подальшої адаптації до українських кліматичних та едафічних умов [77, 78].

Регіональні дослідження в різних кліматичних зонах підтверджують значний потенціал відновлення вуглецевої секвестрації на буферних територіях гірничо-збагачувальних підприємств. Комплексна оцінка потенціалу секвестрації органічного вуглецю ґрунту у гірничих районах Китаю, проведена методом просторового моделювання та мета-аналізу опублікованих даних, встановила, що за умови відновлення порушених земель до стану, наближеного до вихідних екосистем, максимально досяжний потенціал секвестрації може становити 4,26 млн т С/рік [83]. Теоретичний потенціал при повному відновленні всіх порушених територій оцінюється у 9,86 млн т С/рік, проте його реалізація вимагає масштабних інвестицій та тривалого періоду часу (понад 50 років).

Дослідження у Північному Таїланді, де переважають відкриті розробки корисних копалин, продемонструвало, що регіон має найбільший потенціал вуглецевої секвестрації через наявність значних площ вегетованих земель, придатних для рекультивації. Прогнозована загальна місткість секвестрації вуглецю оцінюється у 14,68 Мт CO_2-екв. у 2023 році з потенціалом зростання до 28,02 Мт CO_2-екв. до 2030 року за умови реалізації регіональної програми екологічного відновлення гірничих ландшафтів [84].

Критичним фактором, що обмежує потенціал вуглецевої секвестрації на рекультивованих територіях, є часовий лаг між порушенням екосистеми та відновленням її функціональної здатності до поглинання CO_2 [85]. Навіть за оптимальних умов рекультивації повне відновлення запасів вуглецю до рівня непорушених екосистем може вимагати 50 – 100 років для лісів та 30 – 50 років для лугових угруповань. Це означає, що рекультивація не є миттєвим рішенням проблеми викидів, а радше довгостроковою інвестицією у регіональний вуглецевий баланс, яка вимагає компенсації не лише втрат у рік порушення, але

й накопичених втрат протягом усього життєвого циклу гірничого підприємства. Порівняльна динаміка відновлення запасів вуглецю для різних типів рекультивації наочно представлена на рис. 1.9.

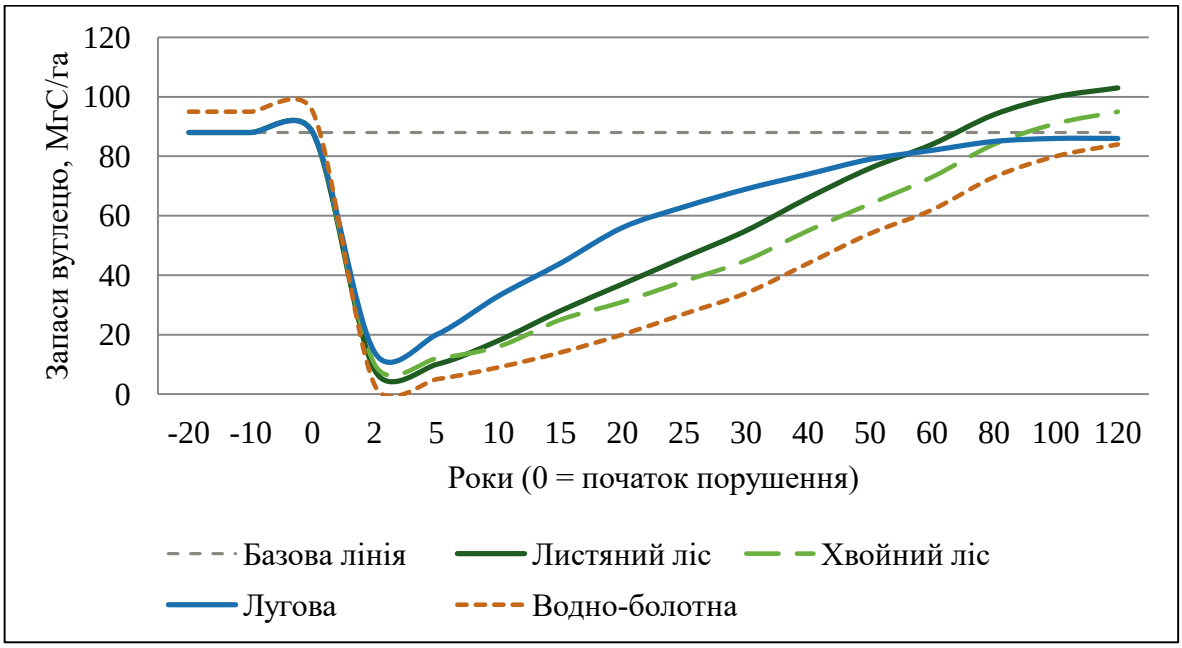


Рис. 1.9. Динаміка відновлення запасів вуглецю на рекультивованих землях залежно від типу буферної екосистеми (побудовано автором на основі [84, 85])

Як видно з рис. 1.9, динаміка відновлення запасів вуглецю суттєво різниться залежно від обраного типу рекультивації. У передпорушений період (роки -20 - 0) всі екосистеми перебувають поблизу базової лінії (88 МгС/га), однак у момент порушення (рік 0) запаси вуглецю катастрофічно знижуються до 3 – 15 МгС/га. Лісова рекультивація листяними породами забезпечує найвищі темпи відновлення у середньостроковій перспективі та перевищує базову лінію на 120-му році (103 МгС/га), тоді як хвойні насадження наближаються до неї лише після 100 – 120 років. Лугова рекультивація демонструє швидший старт у перші 0 – 30 років, проте виходить на нижче плато (~86 МгС/га), не досягаючи вихідного рівня. Водно-болотна екосистема, попри вищий вихідний рівень вуглецю (~95 МгС/га завдяки торфовим відкладам), характеризується найглибшим обвалом при порушенні та найповільнішим відновленням через специфіку анаеробних процесів накопичення органічної речовини. Таким чином, жоден із типів рекультивації не забезпечує швидкого повернення до вихідного

стану, що підтверджує висновок про необхідність довгострокового системного підходу до управління вуглецевим балансом постгірничих територій

Інтегрована оцінка компенсаційної здатності буферних екосистем вимагає співставлення потенціалу вуглецевої секвестрації на рекультивованих територіях з фактичними обсягами викидів парникових газів від гірничо-збагачувальних підприємств. За консервативними оцінками, успішна лісова рекультивація 5000 га порушених земель з досягненням показника секвестрації 2,8 Мг С/га/рік у біомасі та 1,0 Мг С/га/рік у ґрунті забезпечить щорічне поглинання 19 000 т С, що еквівалентно 69 700 т CO_2. Це становить лише 0,26 – 0,50% від загальних викидів підприємства, що підкреслює принципову неможливість повної компенсації техногенних викидів гірничо-збагачувального сектору виключно через природну секвестрацію вуглецю без радикального технологічного переоснащення виробництва [1, 86].

Проте роль буферних екосистем у стратегії досягнення вуглецевої нейтральності не слід недооцінювати. По-перше, навіть часткова компенсація викидів на рівні 10 – 15 % може суттєво знизити вуглецевий слід продукції та зменшити фінансові втрати від сплати вуглецевого збору в межах механізму CBAM [21]. По-друге, формування буферних екосистем є обов'язковою вимогою більшості міжнародних стандартів корпоративної соціальної відповідальності та екологічного менеджменту (ISO 14001, EMAS) [87]. По-третє, відновлені екосистеми надають широкий спектр додаткових екосистемних послуг: регулювання водного режиму, захист від ерозії, збереження біорізноманіття, рекреаційні можливості [88].

Практична реалізація екосистемної компенсації для українських гірничо-збагачувальних підприємств стикається з низкою специфічних викликів. За даними Державної служби статистики України, загальна площа порушених земель гірничодобувними підприємствами перевищує 150 000 га, з яких лише близько 30% підлягали рекультивації станом на 2020 рік [89]. Основними бар'єрами є обмежене фінансування програм рекультивації в умовах економічної нестабільності, недосконала нормативно-правова база щодо вимог до якості біологічної рекультивації, брак науково-обґрунтованих регіональних нормативів

вуглецевої секвестрації для різних типів рекультивації, відсутність системи моніторингу та верифікації фактичної секвестрації вуглецю на рекультивованих територіях.

Водночас, інтеграція сектору LULUCF у майбутню національну систему торгівлі викидами, передбачена Законом України «Про основні засади державної кліматичної політики», створює правове підґрунтя для монетизації екосистемних послуг буферних зон через механізм «вуглецевих офсетів» [26]. Це дозволить гірничо-збагачувальним підприємствам інвестувати у проєкти з відновлення лісів та покращення стану ґрунтів на порушених територіях з метою отримання сертифікованих вуглецевих кредитів, які зможуть зараховуватися у рахунок виконання зобов'язань зі скорочення викидів.

Таким чином, буферні екосистеми навколо гірничо-збагачувальних підприємств відіграють комплементарну роль у стратегії досягнення вуглецевої нейтральності: вони не є альтернативою технологічній декарбонізації, проте забезпечують критично важливий механізм компенсації залишкових викидів та створюють передумови для формування регіонального вуглецевого балансу в довгостроковій перспективі. Успішна реалізація потенціалу екосистемної компенсації вимагає інтеграції екологічних, економічних та регуляторних інструментів у єдину систему управління вуглецевим балансом гірничо-промислових територій.

Висновки до 1 розділу

Проведений у розділі 1 комплексний теоретичний аналіз дозволив отримати такі наукові результати:

1. За результатами бібліометричного аналізу 607 публікацій, проіндексованих у базі даних Scopus із використанням програмного забезпечення VOSviewer виокремлено вісім тематичних кластерів у предметному полі досліджень вуглецевого балансу гірничодобувних підприємств. Встановлено, що кластери промислових викидів гірничої галузі та екологічного відновлення порушених територій є відокремленими і не мають щільних прямих зв'язків, що свідчить про недостатню інтеграцію цих напрямів у єдину систему вуглецевого балансу. Різке зростання публікаційної активності у

2024 – 2025 роках (до 111 публікацій на рік, що у 5 разів перевищує показник 2020 року) безпосередньо корелює з запровадженням механізму CBAM та свідчить про посилення наукової уваги до проблем декарбонізації гірничодобувної галузі.

2. Встановлено, що антропогенне порушення глобального вуглецевого циклу призвело до зростання концентрації CO_2 до 420 млн$^{-1}$ (2024 р.), що на 50 % перевищує доіндустріальний рівень. Кумулятивні викиди перевищують природну поглинальну здатність екосистем на 40 − 45%, що математично виражається рівнянням $\Delta C = E - S$ та обґрунтовує необхідність досягнення нульового балансу викидів до 2050 року для утримання потепління в межах 1,5°C.

3. Систематизовано еволюцію міжнародної кліматичної архітектури від Кіотського протоколу до Паризької угоди, трансформація від жорсткого підходу «зверху вниз» з обов'язковими цілями для 37 країн до гнучкої моделі «знизу вгору» з охопленням 195 країн через механізм Національно визначених внесків та п'ятирічні цикли підвищення амбітності. Визначено, що практична реалізація Паризької угоди здійснюється через поєднання EU ETS (10 000 підприємств, 40% викидів ЄС) та CBAM (Регламент ЄС 2023/956), що формує прямий економічний тиск для декарбонізації українських експортних галузей з 2026 року.

4. Обґрунтовано методологічну роль керівництв IPCC (2006, 2019) та стандарту GHG Protocol у створенні уніфікованої трирівневої системи обліку викидів парникових газів. Встановлено, що ієрархічна архітектура міжнародних стандартів від глобальних методологій IPCC до регламентів EU ETS/LULUCF та національного законодавства України (Закони №3991-IX та №377-IX) створює методологічне підґрунтя для компенсаційних механізмів між промисловими викидами та екосистемною секвестрацією.

5. Встановлено, що гірничодобувна галузь відповідає за 4 – 7 % глобальних викидів (Scope 1-2) або 28 % при врахуванні повного ланцюга вартості (Scope 3, LCA-підхід). Домінуючою складовою є Scope 2 (60 – 70 %), зумовлений високою електромісткістю збагачувальних процесів. Для України вуглецева інтенсивність енергосистеми (~0,60 кг CO_2/кВт·год) та моральний знос

обладнання (60 – 70 %) формують вуглецемісткість окатишів, що у 5 – 7 разів перевищує показники європейських аналогів.

6. Систематизовано міжнародний досвід декарбонізації через класифікацію НДТМ за п'ятьма категоріями (електрифікація, відновлювані джерела енергії, зміна палива, циркулярна економіка, енергоефективність). Встановлено пріоритетність категорій 2 і 5 для українських гірничо-збагачувальних підприємств, оскільки вони чинять найбільший вплив на домінуючий Scope 2. Доведено, що інвестиції у відновлювальні джерела енергії та енергоефективність (€150-300 млн) окупляться за 3 – 5 років виключно за рахунок уникнених CBAM-платежів (€320 – 600 млн/рік для Ferrexpo).

7. Обґрунтовано комплементарну роль буферних екосистем у стратегії вуглецевої нейтральності гірничодобувного сектору. Встановлено, що порушення земель призводить до втрат органічного вуглецю 50 – 150 т C/га, еквівалентних викиду 180 – 550 т CO_2/га протягом перших 3 – 5 років. Порівняльний аналіз п'яти типів рекультивації (лісова листяна, лісова хвойна, лугова, водно-болотна, агролісова) засвідчив, що жоден із них не забезпечує швидкого повернення до вихідного стану, повне відновлення вуглецевих запасів вимагає 50 – 120 років залежно від типу екосистеми.

Таким чином, проведений теоретичний аналіз підтверджує, що досягнення вуглецевої нейтральності гірничо-збагачувальних підприємств вимагає інтегрованого підходу, що поєднує технологічну декарбонізацію як основний механізм із екосистемною компенсацією як необхідним доповненням для нейтралізації залишкових викидів. Це створює методологічний фундамент для розробки комплексної системи моніторингу та оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних комбінатів, що є предметом наступних розділів дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2
ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Методика дослідження

Методичною основою дослідження є системний підхід до оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, який передбачає інтеграцію методів інвентаризації викидів парникових газів, оцінки вуглепоглинальної здатності екосистем та геоінформаційного моделювання.

Загальна концепція дослідження базується на принципі балансового підходу, згідно з яким вуглецевий баланс території визначається різницею між обсягами викидів CO_2-еквіваленту від технологічних процесів та величиною депонування і секвестрації вуглецю буферними екосистемами. Структурно-логічна схема дослідження включала п'ять послідовних етапів (рис.2.1.).

Перший етап – аналітико-теоретичний – передбачав систематизацію наукових публікацій, нормативно-правових документів та міжнародних стандартів у сфері оцінки викидів парникових газів та вуглецевого балансу промислових територій. На цьому етапі вивчалися методології IPCC (2006, 2019), стандарти ISO 14064-1:2018, ISO 14067:2018, вимоги EU ETS та CBAM, а також національне законодавство України у сфері моніторингу викидів парникових газів [21, 22, 23, 26, 28, 29, 31, 32].

Другий етап – підготовчо-польовий – включав вибір об'єктів дослідження, планування маршрутів польових досліджень, підготовку обладнання та методичних матеріалів. Здійснювалося збирання первинної інформації про технологічні процеси гірничо-збагачувальних підприємств, обсяги виробництва, використання палива та сировини, а також попередній аналіз супутникових знімків для визначення меж буферних зон.

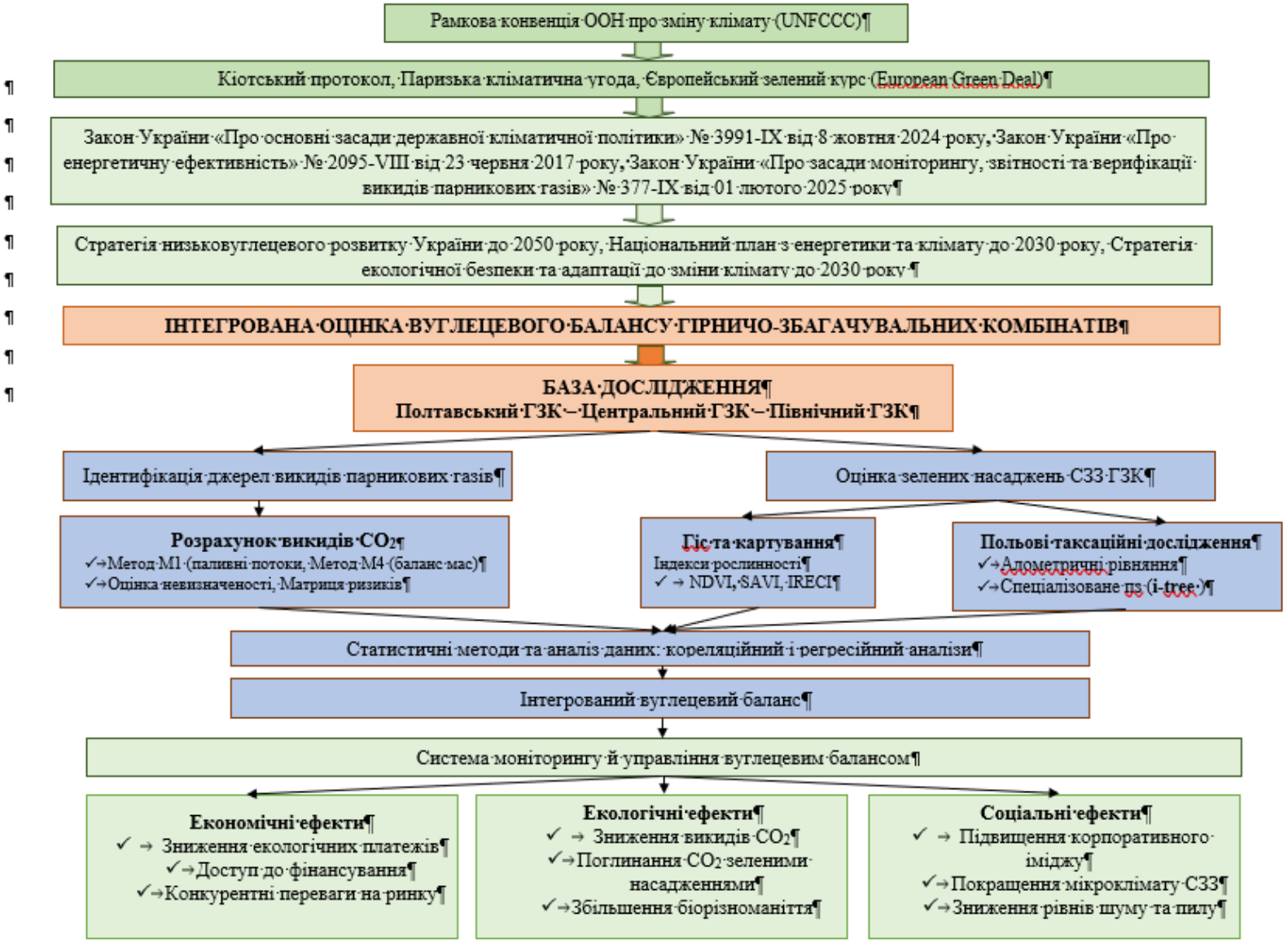


Рис.2.1. Структурно-логічна схема дослідження –

Третій етап – експериментально-польовий – включав два взаємодоповнюючих компоненти. Перший компонент передбачав проведення натурних таксаційних досліджень деревних насаджень на модельному об'єкті (вегетаційний сезон 2025 р.). Вибір модельного об'єкта обумовлений типовою структурою озеленення санітарно-захисних зон промислових підприємств України з характерним видовим складом, що збігається з основними видами насаджень буферних зон досліджуваних ГЗК, а також розташуванням у перехідній кліматичній зоні, репрезентативній щодо умов усіх трьох підприємств. Натурні таксаційні дослідження виконували функцію калібрування методики алометричної оцінки біомаси. Виконувалася таксація деревних насаджень із визначенням таксономічного складу, дендрометричних параметрів (висота, діаметр стовбура на висоті 1,3 м), віку насаджень та їх санітарного стану [90]. Другий компонент передбачав дистанційну оцінку стану буферних екосистем Північного, Центрального та Полтавського ГЗК на основі даних дистанційного зондування Землі з використанням верифікованої на модельному об'єкті методики. Використовувалися супутникові знімки Sentinel-2 MSI рівня Level-2A за 2025 рік у безхмарні періоди (хмарність <10%), отримані через платформу Copernicus Data Space. Для кількісної оцінки стану рослинного покриву буферних зон розраховувалися три спектральні індекси: NDVI, IRECI та SAVI [91]. Класифікацію земного покриву виконано методом Random Forest у бібліотеці Orfeo ToolBox з використанням каналів B02, B03, B04, B08 та B11.

Четвертий етап – камерально-розрахунковий, включав комплексну обробку первинних даних за трьома напрямами: перший – розрахунок викидів парникових газів від досліджуваних гірничо-збагачувальних підприємств; другий – визначення запасів депонованого вуглецю та інтенсивності секвестрації CO_2 буферними насадженнями на основі польових таксаційних даних модельного об'єкта із застосуванням алометричних рівнянь для основних деревних порід та відповідних коефіцієнтів техногенного навантаження; третій – геоінформаційний аналіз буферних зон досліджуваних ГЗП у середовищі QGIS 3.40, який включав розрахунок спектральних індексів NDVI, IRECI та SAVI за даними Sentinel-2; класифікацію земного покриву методом Random Forest; зональну статистику (Zonal

Statistics) у межах буферних екосистем. На основі інтеграції результатів усіх трьох напрямів здійснено моделювання вуглецевого балансу та розроблено сценарії його оптимізації шляхом скорочення прямих викидів і підвищення секвестраційного потенціалу буферних екосистем на період до 2055 року.

П'ятий етап – узагальнюючо-рекомендаційний передбачав формулювання висновків, розробку науково-практичних рекомендацій щодо системи моніторингу та управління вуглецевим балансом, відбір пріоритетних НДТМ для декарбонізації гірничо-збагачувальних підприємств.

Реалізація поставлених завдань дисертаційного дослідження забезпечується комплексом взаємопов'язаних методів, що охоплюють як кількісну оцінку промислових викидів парникових газів, так і визначення секвестраційної здатності буферних екосистем гірничо-збагачувальних комбінатів. Методичний апарат дослідження структурований за п’ятьма послідовними етапами, починаючи від характеристики об'єктів дослідження до розробки сценаріїв декарбонізації. Він поєднує інструментальні методи польових вимірювань, розрахункові методи оцінки викидів парникових газів, методи дистанційного зондування та геоінформаційного аналізу, а також статистичні методи обробки даних. Детальна характеристика методів, інструментів і очікуваних результатів кожного етапу наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Методи проведення дослідження

Методичний блок дослідження	Методи та інструменти	Очікувані результати
1	**2**	**3**
Характеристика підприємств	➢ аналіз технологічного процесу виробництва залізорудних окатишів ➢ визначення видів діяльності та меж установки (технічний аудит) ➢ інвентаризація обладнання за номінальною тепловою потужністю ➢ порівняльний аналіз виробничої структури трьох ГЗК	✓ порівняльна характеристика технологічних процесів ЦГЗК, ПІВНГЗК та ПГЗК ✓ порівняльна характеристика ЦГЗК, ПІВНГЗК та ПГЗК за видами діяльності та потужністю ✓ ідентифікація джерел та точок викидів ✓ обґрунтування репрезентативності досліджуваної вибірки підприємств

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Оцінювання прямих викидів CO_2	➢ встановлення організаційних і операційних меж дослідження; ➢ ідентифікація джерел і матеріальних потоків; ➢ стандартний метод M1 для паливних потоків; ➢ метод балансу мас M4 для процесних викидів; ➢ оцінювання невизначеності та ризиків якості даних	➢ річні обсяги прямих викидів CO_2 за підприємствами і матеріальними потоками; ➢ структура джерел викидів; ➢ оцінка невизначеності результатів
Оцінка депонування та секвестрації вуглецю буферними екосистемами	➢ польові виміри ➢ алометричні рівняння для розрахунку надземної біомаси ➢ розрахунок запасів вуглецю: коефіцієнти конверсії біомаси IPCC (2006, 2019) ➢ програмне забезпечення i-Tree Eco для оцінки річної секвестрації CO_2 ➢ поправочні коефіцієнти техногенного впливу на приріст	✓ інвентаризація дерев ✓ запаси вуглецю в деревній біомасі буферних зон (т С/га) для кожного підприємства ✓ річне поглинання CO_2 зеленими насадженнями (т CO_2/рік) ✓ порівняльна оцінка секвестраційної ємності трьох підприємств ✓ коефіцієнт компенсації: Kcomp = S(CO_2) / E(GHG) × 100 %
ГІС-аналіз та дистанційне зондування СЗЗ	➢ супутникові знімки Sentinel-2 MSI Level-2A ➢ обробка у QGIS 3.40: оцифрування меж, буфер 1000 м ➢ спектральні індекси через Raster Calculator: NDVI, IRECI, SAVI ➢ класифікація земного покриву: Random Forest, бібліотека Orfeo ToolBox	✓ тематичні карти СЗЗ трьох ГЗК з класифікацією земного покриву ✓ просторовий розподіл NDVI / IRECI / SAVI у буферних зонах підприємств ✓ площа та частка рослинного покриву в СЗЗ кожного ГЗК (%) ✓ гістограми розподілу спектральних індексів для порівняльного аналізу
Статистичний аналіз	➢ кореляційний аналіз ➢ регресійний аналіз ➢ порівняльний аналіз	✓ кореляційні матриці між дендрометричними показниками та секвестрацією CO_2 ✓ регресійні моделі поглинання CO_2 залежно від видового складу насаджень СЗЗ ✓ статистично значущі відмінності між ГЗК за питомим вуглецевим слідом
Розробка рекомендацій та сценаріїв декарбонізації	➢ інтегральна оцінка вуглецевого балансу ➢ сценарний аналіз ➢ багатокритеріальний аналіз управлінських рішень ➢ стратегічне планування	✓ інтегрований вуглецевий баланс трьох ГЗК ✓ сценарії оптимізації вуглецевого балансу ✓ науково-практичні рекомендації щодо системи моніторингу та управління вуглецевим балансом ГЗК

Розроблено автором

Таблиця 2.1 систематизує методичний апарат дослідження у вигляді поетапної матриці «метод – результат», що забезпечує логічну узгодженість між завданнями дисертаційного дослідження та інструментами їх вирішення. Кожному етапу відповідає чітко визначений набір методів і верифікованих результатів, що гарантує відтворюваність і прозорість дослідження. Зокрема, польові таксаційні виміри та алометричні розрахунки слугують основою для кількісної оцінки секвестраційної ємності буферних екосистем, тоді як геоінформаційний аналіз на

основі Sentinel-2 та Random Forest забезпечує просторову верифікацію отриманих показників у межах санітарно-захисних зон трьох досліджуваних підприємств. Інтеграція результатів усіх етапів створює методичне підґрунтя для розрахунку коефіцієнта компенсації Kcomp та розробки сценаріїв декарбонізації на період 2025 – 2055 років.

2.2. Характеристика об'єктів дослідження

Дослідження охоплює три провідні гірничо-збагачувальні комбінати України, що у сукупності формують значну частку національного виробництва залізорудних окатишів: Північний ГЗК (м. Кривий Ріг, Дніпропетровська область), Центральний ГЗК (м. Кривий Ріг, Дніпропетровська область) та Полтавський ГЗК (м. Горішні Плавні, Полтавська область) [92, 93, 94]. Вибір зазначених підприємств зумовлений сукупністю критеріїв. По-перше, усі три ГЗК належать до найбільших виробників залізорудних окатишів в Україні з повним технологічним циклом та є ключовими промисловими джерелами прямих викидів CO_2 у гірничо-збагачувальній галузі [95]. По-друге, підприємства розташовані у різних природно-кліматичних зонах, що забезпечує репрезентативність вибірки щодо різних умов формування буферних екосистем. По-третє, актуальність дослідження підсилюється тим, що всі три підприємства підпадають під регуляторні вимоги механізму СВАМ ЄС, а Полтавський ГЗК, який експортує понад 85 % продукції до країн ЄС, є особливо чутливим до вуглецевого оподаткування з 2026 року [96].

2.2.1. Північний гірничо-збагачувальний комбінат

Приватне акціонерне товариство «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «Північний ГЗК», ПівнГЗК) – одне з найбільших гірничодобувних підприємств Європи із закінченим циклом підготовки залізорудної сировини для металургійної промисловості. Підприємство розташоване в північній частині міста Кривий Ріг Дніпропетровської області

(50079, Україна, м. Кривий Ріг) та входить до складу гірничорудного дивізіону ТОВ «Метінвест Холдинг» [92].

До складу Північного ГЗК входять два відкритих кар'єри: Першотравневий (проектна глибина – 650 м, досягнута на момент досліджень близько 460 м, довжина – 3100 м, ширина – 2500 м, промислові запаси – 712 млн т з Fe заг. 34,49 %) та Ганнівський (проектна глибина – 450 м, фактична – близько 275 м, довжина – 5250 м, ширина – 1200 м, промислові запаси – 500 млн т з Fe заг. 35,8 %). Проектна сукупна потужність кар'єрів становить 48,5 млн т сирої руди на рік. Переробний комплекс підприємства включає дві збагачувальні фабрики потужністю 20,5 млн т залізорудного концентрату на рік (Fe 65 %) та три фабрики грудкування сукупною проектною потужністю понад 10 млн т (до 16,3 млн т) залізорудних окатишів на рік [97].

2.2.2. Центральний гірничо-збагачувальний комбінат

Приватне акціонерне товариство «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «Центральний ГЗК», ЦГЗК) розташоване в Жовтневому районі міста Кривий Ріг Дніпропетровської області та також входить до структури групи ТОВ «Метінвест». Основним напрямом діяльності підприємства є видобування, переробка та виробництво залізорудної сировини для металургійних підприємств [93].

Центральний ГЗК об'єднує три відкритих кар'єри та шахту, а також дробильну, збагачувальну та огрудкувальну фабрики, цех шламового господарства. Кар'єр № 1 базується на Глеюватському родовищі залізистих кварцитів (проектна продуктивність – 5,0 млн т/рік); кар'єр № 3 – на Петрівському родовищі (6,0 млн т/рік); кар'єр № 4 – на Артемівському родовищі (4,0 млн т/рік). Загальна проектна потужність гірничих об'єктів по видобутку магнетитових залізистих кварцитів становить 15 млн т сирої руди на рік. Збагачувальна фабрика підприємства забезпечує фактичне виробництво концентрату на рівні близько 6000 тис. т на рік. Проектна потужність фабрики огрудкування - 2000 тис. т окатишів на рік [93].

2.2.3. Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат

Приватне акціонерне товариство «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» (ПрАТ «Полтавський ГЗК») розташоване в м. Горішні Плавні, Полтавська область, та є єдиним великим ГЗК Полтавської області. Підприємство є найбільшим українським експортером залізорудних окатишів до країн Європейського Союзу та належить компанії «Ferrexpo». На відміну від двох попередніх об'єктів, Полтавський ГЗК розташований поза межами Криворізького залізорудного басейну [94]. Полтавський ГЗК здійснює повний технологічний цикл: видобуток сирої руди у кар'єрі, подрібнення, збагачення та виробництво концентрату, обпалення (виробництво окатишів). Переробний комплекс включає дробильну та збагачувальну фабрики. Більше 85 % продукції підприємство експортує до Австрії, Польщі, Чехії, Румунії, Болгарії, Італії, Словаччини, Сербії та інших країн [94].

Зведена порівняльна характеристика досліджуваних підприємств представлена у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика гірничо-збагачувальних комбінатів

Показник	Північний ГЗК	Центральний ГЗК	Полтавський ГЗК
Місцезнаходження	м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.	м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.	м. Горішні Плавні, Полтавська обл.
Рік заснування / першого пуску	1960 / 1963	1950 / 1961	1960 / 1970
Форма власності / корпоративна група	ПрАТ / Metinvest	ПрАТ / Metinvest	ПрАТ / Ferrexpo plc (LSE)
Проектна потужність видобутку, млн т/рік	48,5	15,0	понад 20,0
Виробництво окатишів, млн т/рік	6,5 (2020)	до 2,0	10,6 (2018)
Тип агрегату огрудкування	Трубчаста піч	Обпалювальна машина	Обпалювальна машина
Основна географія збуту	Внутрішній ринок та експортні поставки	Переважно внутрішній ринок	Переважно експорт, зокрема до країн ЄС

Джерело: сформовано автором на основі [92, 93, 94].

Отже, спільними характеристиками досліджуваних підприємств є виробництво залізорудного концентрату й окатишів, подібна послідовність

основних технологічних операцій, наявність процесів спалювання палива та термічної обробки окатишів як основних джерел прямих викидів CO_2. Водночас підприємства відрізняються масштабами виробництва, складом матеріальних потоків, технологічним обладнанням та природно-кліматичними умовами. Поєднання спільних і відмінних характеристик забезпечує можливість їх порівняльного дослідження за єдиними методичними принципами.

2.3. Методи оцінки викидів парникових газів гірничо-збагачувальними комбінатами

Першим кроком у побудові системи оцінки викидів CO_2 є встановлення меж установки (сукупності технологічних об'єктів та обладнання під єдиним операційним контролем підприємства) та ідентифікація видів діяльності, що генерують парникові гази. Межі установки визначаються таким чином, щоб охопити всі виробничі підрозділи, технологічно пов'язані між собою, від приймання та підготовки сировини до відвантаження готової продукції. До складу установки включається будь-яке обладнання для спалювання палива незалежно від його призначення, основне технологічне чи допоміжне (опалення, гаряче водопостачання, ремонтно-механічні потреби) [31, 32].

Визначення видів діяльності здійснюється у два послідовних етапи. На першому проводиться технічний аудит установки, обстеження всього промислового майданчика, складання переліку цехів і підрозділів, аналіз технологічних схем з метою виявлення процесів, що супроводжуються викидами CO_2. На другому етапі здійснюється інвентаризація обладнання для спалювання палива з визначенням номінальної теплової потужності кожної одиниці за технічною документацією виробника [31, 32].

Аналіз підприємств дав змогу виокремити два види діяльності, спільні для виробництва залізорудних окатишів на всіх досліджуваних ГЗК (табл. 2.3.)

Таблиця 2.3

Характеристика видів діяльності, пов’язаних із виробництвом залізорудних окатишів на досліджуваних ГЗК

№	Вид діяльності	Потужність	Охоплені джерела
Центральний ГЗК			
ВД01	Випалювання або спікання, в т.ч. агломерація металевої руди	6 465,75 т/добу	Випалювальна машина ОК-324
ВД02	Спалювання палива в установках із загальною тепловою потужністю > 20 МВт	1 046,7 МВт теп.	Котли, млинні тракти, барабанне сушило бентоніту (40 джерел, 23 точки викиду)
Північний ГЗК			
ВД01	Випалювання або спікання, в т.ч. агломерація металевої руди	23 287,67 т/добу	Випалювальна машина цеху виробництва окатишів
ВД02	Спалювання палива в установках із загальною тепловою потужністю > 20 МВт	1 042 МВт теп.	Котли та нагрівальне обладнання всіх підрозділів комбінату
Полтавський ГЗК			
ВД01	Спалювання палива в установках із загальною тепловою потужністю > 20 МВт	46,29 МВт теп.	Котли, нагрівальні агрегати
ВД02	Випалювання або спікання, в т.ч. агломерація металевої руди	31 342,47 т/добу	Випалювальна машина цеху виробництва окатишів

Джерело: розроблено автором

Ідентифікацію джерел викидів здійснено на основі детального аналізу технологічного процесу на основі технологічних схем виробництва окатишів, схем теплопостачання підприємства та технічної документації обладнання. Для кожного виявленого джерела визначається точка викиду, місце фізичного виходу димових газів в атмосферу. Ключовим технологічним джерелом на всіх трьох підприємствах є випалювальна машина цеху виробництва окати, де одночасно відбувається спалювання природного газу і термічне розкладання карбонатної сировини при температурах 1 200 – 1 300 °C [31, 32].

На Центральному ГЗК ідентифіковано 40 джерел викидів і 23 точки виходу димових газів. Центральним є випалювальна машина (ДВ01). Допоміжні джерела включають три млинних тракти подрібнення флюсових добавок, барабанне сушило бентоніту і розгалужену мережу газових котлів типу Колві-Термо та водогрійних котлів «Факел-08ЛЖ», розташованих у топкових відділеннях всіх основних цехів і адміністративно-побутових корпусів на трьох виробничих площадках. На

Північному ГЗК структура джерел викидів аналогічна до Центрального ГЗК з огляду на схожість технологічного процесу і приналежність до однієї промислової групи. Підприємство має 5 матеріальних потоків і не застосовує додаткових видів палива, окрім природного газу. На Полтавському ГЗК є також котли і нагрівальні агрегати, нагрівальні та термічні печі. Склад матеріальних потоків суттєво відрізняється між підприємствами і відображає їх виробничу специфіку.

Для кількісної оцінки викидів CO_2 застосовується три методи: стандартний (на основі спалювання палива), метод балансу мас і метод безперервних вимірювань [22, 25, 98]. Вибір методу для конкретного матеріального потоку визначається природою процесу, що генерує викиди.

Стандартний метод ґрунтується на обліку обсягу спожитого палива та його теплофізичних характеристик. Він ефективний для газоподібного і рідкого палива зі стандартизованим складом, але принципово не враховує процесні викиди від хімічних перетворень у сировині. Застосування стандартного методу в ізоляції на ГЗК призводить до системного заниження оцінки, оскільки декарбонізація вапняку, одне з ключових джерел CO_2 при виробництві окатишів, залишається поза розрахунком.

Метод балансу мас базується на законі збереження речовини, різниця між масою вуглецю у всіх вхідних матеріалах і масою вуглецю у вихідних продуктах дорівнює масі вуглецю, перетвореного на CO_2. Усі три досліджуваних підприємства застосовують саме цей метод для матеріальних потоків класу «металева руда» і використовують стандартний метод лише для паливних потоків. Метод безперервних вимірювань передбачає інструментальне визначення концентрації CO_2 і витрати димових газів у кожній точці викиду. Незважаючи на найвищу теоретичну точність, він технічно непридатний для досліджуваних підприємств через велику кількість розосереджених точок викиду і агресивне запилене середовище. Порівняльну характеристику методів оцінки викидів CO_2 наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Порівняльна характеристика методів оцінки викидів CO_2 для умов виробництва залізорудних окатишів

Критерій	Стандартний метод (М1)	Метод балансу мас (М4)	Метод безперервних вимірювань
1	2	3	4
Принцип	Паливо × НТЗ × КВ × КО	(С_вхід − С_вих) × 3,664	Вимірювання концентрації CO_2 у димових газах у реальному часі
Типи охоплених викидів	Лише від спалювання палива	Паливо + процесні (декарбонізація)	Точки вимірювання (неповне при множинних джерелах)
Вхідні дані	Обсяг і тип палива, НТЗ, КВ	Маса і вміст С у кожному матеріальному потоці	Витрата газів, концентрація CO_2, температура, тиск
Точність	Середня	Висока при точному аналізі складу	Найвища при надійній роботі обладнання
Витрати на впровадження	Низькі	Середні	Високі
Застосовність для досліджуваних ГЗК	Для газоподібного/рідкого палива	Рекомендований - охоплює декарбонізацію вапняку	Технічно ускладнене: 40–250+ точок викиду на кожному підприємстві

Джерело: розроблено автором на основі [22, 25, 98]

У цьому дослідженні застосовано комбінований підхід, стандартний метод (М1) для паливних потоків (природний газ, вугілля, рідке паливо) і метод балансу мас (М4) для матеріальних потоків виробництва окатишів. Такий підхід забезпечує повне охоплення прямих викидів CO_2.

Розрахунок викидів CO_2 за методом балансу мас виконується у три послідовні кроки. Спочатку визначається сумарна маса вуглецю у всіх вхідних матеріалах (крок 1), потім маса вуглецю у вихідній продукції (крок 2), після чого обчислюються викиди CO_2 як їх різниця з урахуванням стехіометричного коефіцієнта (крок 3).

Викиди CO_2 розраховувалися за формулою балансу мас (2.1):

$$\text{Викиди}CO_2 = \left(B_{\text{вхід}} - B_{\text{продукт}}\right) \times 3{,}664 \qquad (2.1)$$

де: $B_{\text{вхід}}$ – маса вуглецю у всіх видах палива та вуглецевмісних матеріалів, що витрачені на діяльність протягом року, т;

$В_{продукт}$ – маса вуглецю у всіх продуктах, що є результатом діяльності протягом року, т;

3,664 – коефіцієнт для перерахунку молярної маси вуглецю в CO_2.

Вміст вуглецю у вхідних матеріалах обчислювався за формулою (2.2):

$$Вхід = \sum(Овх \times ВВвх) \quad (2.2)$$

де: Овх – обсяг вуглецевмісних матеріалів, що витрачені на діяльність, т;

ВВвх – вміст вуглецю у вуглецевмісних матеріалів, що витрачені на діяльність, т С/т;

Вміст вуглецю у продуктах, що вийшли від здійснення діяльності протягом року, виміряний у тоннах вуглецю, обчислюється за формулою (2.3):

$$Ввих = \sum(Ових \times ВВвих) \quad (2.3)$$

де: $О_{вих}$ – обсяг продуктів, що є результатом діяльності, т;

$ВВ_{вих}$ – вміст вуглецю у продуктах, що є результатом діяльності, т С/т.

Викиди від спалювання палива розраховуються окремо відповідно за формулою (2.4):

$$ВикCO_2 = ДД \times НТЗ/1000 \times КВ \times КО \quad (2.4)$$

де: $ВикCO_2$ – викиди від спалювання палива, т CO_2;

ДД – дані про діяльність: обсяг споживання палива, т або тис. $м^3$;

НТЗ – нижча теплотворна здатність палива, ГДж/т або ГДж/тис. $м^3$;

КВ – коефіцієнт викидів CO_2 для палива, т CO_2 /ТДж;

КО – коефіцієнт окислення для палива, безрозмірний.

Для визначених матеріальних потоків на гірничо-збагачувальному комбінаті використовуються коефіцієнти вмісту вуглецю відповідно деталізованих довідкових значень розрахункових коефіцієнтів, які публікуються щороку на офіційному веб-сайті Міністерства економіки, довкілля та сільського господарства або в разі їх відсутності коефіцієнти, які були використані для останнього Національного звіту (кадастру) антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів, поданого Україною до Секретаріату Рамкової конвенції Організації Об’єднаних Націй про зміну клімату та згідно даних Керівництва МГЕЗК для національних кадастрів викидів парникових газів [22, 23].

Важливо використовувати актуальні коефіцієнти, які забезпечує достовірність національної інвентаризації викидів парникових газів, що подається до Секретаріату РКЗК ООН. Неточні коефіцієнти можуть призвести до суттєвого викривлення даних про загальні викиди. Україна як сторона Паризької угоди та РКЗК ООН зобов'язана надавати точну інформацію про викиди парникових газів.

Особливістю підходу до визначення коефіцієнтів вмісту вуглецю є відмінність між підприємствами. Повний перелік матеріальних потоків і відповідних коефіцієнтів вмісту вуглецю для кожного підприємства наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Матеріальні потоки та коефіцієнти вмісту вуглецю

Матеріальний потік	Тип	Метод розрахунку	Вміст С, т С/т (або КВ, т CO_2/ТДж)	Джерело коефіцієнта
Природний газ	Паливо	Стандартний (М1)	55,7 т CO_2/ТДж (НТЗ = 34,5 ГДж/тис. м³)	Національний кадастр антропогенних викидів України
Вапняк	Сировина	Баланс мас (М4)	0,120	МГЕЗК-2006, Том 3
Бентоніт	Сировина	Баланс мас (М4)	0,006284	Значення за замовчуванням Типу I; ДСТУ ISO 10693:2001
Залізорудний концентрат	Сировина	Баланс мас (М4)	0,000849	Значення за замовчуванням Типу I; ДСТУ ГОСТ 23581.9:2008
Залізорудні окатиші (вихід)	Вихідна продукція	Баланс мас (М4)	0,000346	Значення за замовчуванням Типу I; ДСТУ ГОСТ 23581.9:2008
Лушпиння соняшнику	Біомаса (паливо)	КВ=0	0	Керівництво МГЕЗК 2006, Том 2 (принцип вуглецевої нейтральності біомаси)

Джерело: розроблено автором на основі [22, 99, 100, 101]

Точність розрахунків за методом балансу мас визначається достовірністю вимірювання обсягів кожного матеріального потоку. На Центральному та Північному ГЗК облік природного газу здійснюється витратомірами з похибкою ±0,2 – 2,25 %. Зважування твердих матеріалів проводиться конвеєрними вагами BULKTEQ WBS-1V (похибка ±1 %) або вагонними вагами при залізничному

постачанні. У разі відсутності конвеєрних ваг необхідної точності обсяги матеріалів на складах визначаються геодезичним методом із застосуванням електронних тахеометрів, GNSS-приймачів, лазерних сканерів і безпілотних літальних апаратів.

Вміст вуглецю у твердих матеріалах визначається лабораторним аналізом на аналізаторах вуглецю (похибка ±0,1%) відповідно до встановлених галузевих методик (ДСТУ ISO 10693:2001, ДСТУ ГОСТ 23581.9:2008). Прийняті значення за замовчуванням Типу I (таблиця 2.5) застосовуються однаково для всіх трьох досліджуваних підприємств, що забезпечує методологічну порівнянність результатів розрахунку викидів CO_2 для матеріальних потоків класу «металева руда» незалежно від конкретного постачальника сировини. Сукупна невизначеність результату розрахунку формується з невизначеностей вимірювання обсягів матеріальних потоків і невизначеностей коефіцієнтів вмісту вуглецю. Загальна невизначеність оцінюється методом квадратичного підсумовування відносних похибок окремих складових. Для природного газу, домінуючого матеріального потоку за обсягом викидів на всіх трьох підприємствах, рівень точності 4 (невизначеність ± 1,5 %) забезпечується метрологічно атестованими витратомірами.

Для управління ризиками якості даних моніторингу розроблено матрицю ризиків структури 5×5, що базується на оцінці ймовірності виникнення ризикових подій та їх потенційного впливу на точність звітних даних. Ймовірність оцінювалася від рівня 1 (0,5 % на рік) до рівня 5 (50 % на рік), вплив від 28,3 т CO_2 до 11 329,6 т CO_2. Інтегральна оцінка ризику розраховувалася як добуток ймовірності та впливу з подальшою класифікацією на низький, середній та високий рівні ризику.

Таким чином, методика оцінки викидів парникових газів, застосована у дисертаційному дослідженні, ґрунтується на комбінованому використанні стандартного методу для паливних потоків і методу балансу мас для процесних матеріалів виробництва окатишів. Такий підхід підтверджений практикою всіх трьох досліджуваних підприємств, забезпечує повне охоплення прямих викидів CO_2.

2.4. Методика оцінки параметрів депонування та секвестрації вуглецю

Річна секвестрація вуглецю – це кількість вуглецю, що фіксується деревно-чагарниковим покривом СЗЗ за один вегетаційний рік у процесі фотосинтезу та приросту фітомаси. На відміну від вуглецевого депо, яке характеризує накопичений статичний запас вуглецю, секвестрація є динамічним показником, щорічним «поповненням» цього запасу. Саме інтенсивність секвестрації визначає реальний компенсаційний потенціал буферних екосистем стосовно поточних викидів парникових газів від виробничої діяльності підприємств [102].

Оцінка вуглепоглинальної здатності буферних екосистем гірничо-збагачувальних підприємств здійснювалася за двома взаємодоповнюючими напрямами, натурними таксаційними дослідженнями деревних насаджень на модельному об'єкті з подальшим калібруванням результатів на досліджувані підприємства та дистанційною оцінкою стану рослинного покриву санітарно-захисних зон трьох ГЗК на основі даних супутникового зондування Землі. Польовий компонент дослідження реалізовано на модельному об'єкті, а саме деревних насадженнях санітарно-захисної зони промислового підприємства, розташованого у перехідній кліматичній зоні між зоною мішаних лісів та лісостепом, що забезпечує репрезентативність щодо кліматичних умов усіх трьох досліджуваних ГЗК. Критично важливим фактором успішності рекультивації є правильний підбір деревних порід: швидкорослі листяні види, зокрема тополя біла (*Populus alba* L.), верба біла (*Salix alba* L.) та береза повисла (*Betula pendula* Roth), забезпечують високі темпи накопичення біомаси у перші 10 – 20 років, тоді як хвойні породи, зокрема сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.), формують більш стабільні довгострокові резервуари вуглецю [79].

Натурні таксаційні дослідження виконували функцію калібрування методики алометричної оцінки біомаси та верифікації результатів i-Tree Eco в умовах техногенного навантаження, а не слугували безпосередньою основою для розрахунку поглинальної здатності буферних екосистем трьох ГЗК. Кількісна оцінка вуглепоглинальної здатності санітарно-захисних зон Північного, Центрального та Полтавського ГЗК здійснювалась на основі даних дистанційного

зондування Землі (Sentinel-2 MSI Level-2A) із застосуванням верифікованої на модельному об'єкті методики. Загальна логіка дослідження таким чином вибудовується у послідовний ланцюг: натурні виміри на модельному об'єкті → калібрування та верифікація методики → дистанційна оцінка буферних екосистем ГЗК → інтегрований вуглецевий баланс. Для охоплення основних типів насаджень, характерних для промислових і прилеглих до них територій, на модельному об’єкті закладено 15 кругових пробних ділянок у межах трьох стратів: 1) території промислових підприємств (5 ділянок); 2) захисні зелені смуги вздовж транспортних магістралей (5 ділянок); 3) невикористовувані техногенні ділянки (5 ділянок). Ділянки охоплювали масивні насадження, лінійні придорожні посадки та локальні острівні насадження характерні для СЗЗ промислових підприємств.

Інвентаризація зелених насаджень здійснювалась відповідно до Інструкції з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України (Наказ № 226 від 24.12.2001) [85]. На кожній пробній ділянці обліковувалися дерева з діаметром стовбура ≥ 5 см на висоті 1,3 м від кореневої шийки. Виміри здійснювались із використанням обладнання Haglöf (Швеція), діаметр стовбурів вимірювався мірною вилкою Mantax Blue (точність ±1 мм), висота дерев – електронним висотоміром Vertex IV (точність ±0,1 м), вік модельних дерев визначався за допомогою бура Преслера через підрахунок річних кілець на кернах деревини. Для кожного дерева фіксувалися вид (за морфологічними ознаками), діаметр на висоті 1,3 м, загальна висота, вік та якісний стан згідно з тричленною шкалою (добрий, задовільний, незадовільний).

Річна інтенсивність секвестрації CO_2 та загальний запас депонованого вуглецю на модельному об'єкті розраховувалися за допомогою програмного забезпечення i-Tree Eco версії 6.0.35, розробленого Лісовою службою США. Програма реалізує методологію алометричного моделювання, що пов'язує вимірювані дендрометричні параметри (діаметр, висота, вік) з біомасою дерева та здатністю надавати екосистемні послуги. База алометричних рівнянь i-Tree Eco включає понад 600 видів дерев, у тому числі поширені європейські види. Зібрані польові дані імпортувалися в програму з прив'язкою до кліматичної зони Центральної України [103].

Паралельно для верифікації результатів i-Tree Eco для 10 модельних дерев, що репрезентують основні види та вікові групи, проведено розрахунки за методикою оцінки фітомаси лісових насаджень. Об'єм стовбура визначався за формулою (2.5) [104]:

$$V = \frac{\pi \times DBH^2}{4} \times H \times f \qquad (2.5)$$

де f – видовий коефіцієнт форми стовбура (0,45-0,48 для листяних, 0,42-0,45 для хвойних згідно з довідниками для лісів України).

Загальна надземна біомаса розраховувалась за формулою (2.6):

$$B = V \times \rho \times BEF \qquad (2.6)$$

де ρ – базисна щільність деревини (т/м³);

BEF – коефіцієнт розширення біомаси.

Додатково проведено порівняння з узагальненими нормативами IPCC Guidelines для помірної кліматичної зони Європи [22, 23]. Застосування конверсійних коефіцієнтів для розрахунку фітомаси та запасів вуглецю за даними таксації є усталеним підходом у вітчизняній практиці [105]. За даними моніторингу накопичення вуглецю в лісах, на підземну фітомасу припадає близько 12 % загального запасу вуглецю деревостану [106].

Розрахунок річної секвестрації вуглецю здійснено за стандартною методологією МГЕЗК із застосуванням нормативних таксаційних параметрів для деревостанів степово-лісостепової зони України, встановлених у дослідженнях Лакиди П.І. [104, 107]. Метод базується на визначенні річного об'ємного приросту деревостану (ΔV) та подальшому ланцюгу конвертацій у вуглецевий еквівалент (формула 2.7):

$$\Delta C = \Delta V \times WD \times BEF \times (1 + R) \times CF \times S, \qquad (2.7)$$

де ΔV – поточний річний об'ємний приріст (м³/га/рік);

WD – базисна щільність деревини (т/м³);

BEF – коефіцієнт розширення біомаси;

R = 0,26 – частка підземної біомаси від надземної;

CF = 0,47 – конверсійний коефіцієнт вуглецю;

S – площа відповідного класу покриву (га).

Нормативні значення поточного річного об'ємного приросту ΔV диференційовано з урахуванням локальних умов формування, структури та стану деревно-чагарникових насаджень. Для Центрального та Північного ГЗК, у санітарно-захисних зонах яких значну частку становлять сформовані захисні насадження та байрачні деревостани, прийнято базові значення ΔV_ліс = 3,8 м³/га/рік та ΔV_чаг = 2,1 м³/га/рік. Для Полтавського ГЗК, деревно-чагарниковий покрив якого характеризується меншою площею, фрагментарністю та переважною приуроченістю до заплавних і локально зволожених ділянок, застосовано консервативний коригувальний коефіцієнт 0,85. Скориговані значення становлять ΔV_ліс = 3,23 м³/га/рік та ΔV_чаг = 1,785 м³/га/рік [107, 108]. Значення базисної щільності деревини WD = 0,68 т/м³ для лісового ярусу прийнято як середньозважене для зрілих листяних деревостанів лісостепово-степової зони України відповідно до даних Українського науково-дослідного інституту лісового господарства та агролісомеліорації імені Г. М. Висоцького (УкрНДІЛГА) [109]. Для Центрального та Північного ГЗК, де видовий склад захисних смуг представлений переважно акацією білою (*Robinia pseudoacacia*), дубом звичайним (*Quercus robur*) та ясеном звичайним (*Fraxinus excelsior*). Для Полтавського ГЗК, де серед природних деревостанів значну частку займають верба біла (S*alix alba*) та тополя чорна (*Populus nigra*). Застосування єдиного нормативного значення WD = 0,68 т/м³ може спричиняти завищення розрахункової секвестрації ділянок. Кількісне визначення цієї похибки потребує уточнення фактичної частки кожної деревної породи, тому зазначений чинник враховано як складову методичної невизначеності (табл.2.6.)

Таблиця 2.6

Нормативні параметри для розрахунку річної секвестрації вуглецю санітарно-захисними зонами досліджуваних підприємств

Категорія насаджень	ΔV, м³/га/рік	WD, т/м³	BEF	ΔC, т C/га/рік	CF	Підприємство
1	2	3	4	5	6	7
Ліси листяні, вік 50 – 65 р., II – III бонітет	3,8	0,68	1,35	2,066	0,47	Центральний, Північний ГЗК

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5	6	7
Ліси листяні, вік 50 – 65 р., II – III бонітет	3,23	0,68	1,35	1,756	0,47	Полтавський ГЗК
Чагарники, вік 30 – 50 р.	2,1	0,52	1,60	1,035	0,47	Центральний, Північний ГЗК
Чагарники, вік 30 – 50 р.	1,785	0,52	1,60	0,879	0,47	Полтавський ГЗК

Джерело: розроблено автором на основі [104, 107, 108]

Вікова структура штучних насаджень (50 – 65 років) відповідає діапазону, в якому поточний річний приріст становить 85 – 95 % від кульмінаційного значення і залишається в межах нормативного діапазону II-III бонітету. Таким чином, застосовані нормативи ΔV відповідають реальному фізіологічному стану насаджень.

2.5. Методи просторового аналізу та моделювання вуглецевого балансу

Просторовий аналіз буферних екосистем та моделювання вуглецевого балансу досліджуваних підприємств здійснювались у три послідовних етапи, геоінформаційний аналіз буферних зон, інтегральна оцінка вуглецевого балансу та сценарний аналіз декарбонізації.

Геоінформаційний аналіз буферних зон виконувався у середовищі QGIS 3.40 із застосуванням координатної системи WGS 84 / UTM zone 36N (EPSG:32636). Основу дистанційної складової аналізу становили супутникові знімки Sentinel-2 MSI рівня Level-2A за 2025 рік, перелік яких наведено у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Супутникові знімки Sentinel-2 для Центрального, Полтавського та Північного ГЗК за 2025

№	Знімки
для Центрального та Північного ГЗК	
1	S2A_MSIL2A_20250420T084731_N0511_R107_T36UWU_20250420T162112.SAFE
2	S2A_MSIL2A_20250609T085431_N0511_R107_T36UWU_20250609T112415.SAFE
3	S2C_MSIL2A_20250905T084621_N0511_R107_T36UWU_20250905T142014.SAFE

для Полтавського ГЗК	
1	S2C_MSIL2A_20250428T084621_N0511_R107_T36UWV_20250428T142913.SAFE
2	S2A_MSIL2A_20250729T084731_N0511_R107_T36UWV_20250729T105115.SAFE
3	S2C_MSIL2A_20250925T084731_N0511_R107_T36UWV_20250925T141717.SAFE

Джерело: Copernicus Data Space

Координатну систему дослідних територій визначено як WGS 84 / UTM zone 36N (EPSG:32636), що забезпечує коректність просторових вимірювань площ і відстаней. Актуальні межі промислових майданчиків (кар'єрів, відвалів, хвостосховищ, промислових об'єктів) визначено методом екранного оцифрування у середовищі QGIS на основі супутникових знімків Sentinel-2 за 2025 рік. Оцифрування виконувалося у вигляді полігонів за зовнішнім контуром об'єктів із подальшою перевіркою геометрії на наявність топологічних помилок.

Для кожного об'єкта сформовано буферну зону шириною 1000 м від зовнішнього контуру, після чого буферні зони об'єднано у єдиний контур для кожного гірничо-збагачувального комбінату.

Для кількісної характеристики стану рослинного покриву розраховувалися три спектральні індекси. NDVI розраховано для аналізу інтенсивності рослинного покриву за даними Sentinel-2 (Red = Band 4 10 m, NIR = Band 8 10 m) за формулою (2.8) [110, 111].

$$\mathrm{NDVI} = \frac{(\mathrm{NIR} - \mathrm{Red})}{(\mathrm{NIR} + \mathrm{Red})} \qquad (2.8)$$

Виділено наступні діапазони значень:

≤ 0,0 – водні поверхні, штучні об'єкти або оголений ґрунт;

0,0-0,1 – відсутність або дуже слабка рослинність;

0,1-0,2 – розріджена або пригнічена рослинність;

0,2-0,3 – помірна рослинність;

0,3-0,6 – щільна рослинність;

0,6 > – дуже щільна та здорова рослинність.

IRECI використано для оцінки відносних змін поглинання випромінювання у червоному та інфрачервоному діапазонах спектра, пов'язаних із вмістом хлорофілу та станом біомаси за даними Sentinel-2 (Red = Band 4 20 m, Red-edge 1 = Band 5 20

m, Red-edge 2 = Band 6 20 m, Red-edge 3 = Band 7 20 m, NIR = Band 8 20 m) за формулою (2.9) [112].

$$\mathrm{IRECI} = \frac{(\mathrm{Red\ Edge\ 3} - \mathrm{Red})}{(\mathrm{Red\ Edge\ 1} / \mathrm{Red\ Edge\ 2})} \quad (2.9)$$

Виділено наступні діапазони значень:

≤ 0,0 – відсутність рослинності або деградовані поверхні;

0,0-0,1 – дуже низький вміст хлорофілу;

0,1-0,2 – низький рівень хлорофілу;

0,2-0,3 – середній рівень хлорофілу;

0,3-0,5 – високий рівень хлорофілу;

0,5 – дуже високий рівень хлорофілу, що відповідає здоровій та густій рослинності.

SAVI застосовано як контрольний індекс для ділянок із сильним впливом ґрунтового фону за даними Sentinel-2 (Red = Band 4 10 m, NIR = Band 8 10 m) за формулою (2.10) [113].

$$\mathrm{SAVI} = \frac{(\mathrm{NIR} - \mathrm{Red})}{(\mathrm{NIR} + \mathrm{Red} + \mathrm{L})} \times (1 + \mathrm{L}) \quad (2.10)$$

Використано L=1 (посилена поправка на ґрунт).

Виділено наступні діапазони значень:

≤ 0,0 – водні об’єкти або відсутність рослинності;

0,0-0,05 – оголений ґрунт або дуже слабка рослинність;

0,05-0,15 – розріджена рослинність;

0,15-0,25 – помірна рослинність;

0,25-0,45 – щільна рослинність;

0,45 – дуже щільна рослинність.

Оскільки значення каналів Sentinel-2 зберігаються у 16-бітному форматі (масштабний множник 10 000), під час розрахунку IRECI та SAVI вхідні значення каналів масштабувалися як B / 10 000 для отримання індексів у стандартному діапазоні інтерпретації. Для кожного індексу побудовано гістограми розподілу значень у межах кожної буферної екосистеми та створено тематичні карти.

Для виконання класифікації використано супутникові знімки Sentinel-2 літнього періоду, що характеризуються високою спектральною інформативністю.

Для Центрального та Північного ГЗК використано знімок від 09.06.2025 р., для Полтавського ГЗК від 29.07.2025 р. Обрані дати відповідають умовам мінімальної хмарності та високої якості даних, що забезпечує підвищення точності класифікації. Класифікацію земного покриву виконано з використанням бібліотеки Orfeo ToolBox. Для аналізу використано спектральні канали B02 (Blue), B03 (Green), B04 (Red), B08 (Near Infrared) та B11 (Shortwave Infrared), які забезпечують ефективне розрізнення основних типів поверхні.

Для створення навчальної вибірки виконано ручне дешифрування знімка та оцифрування полігонів однорідних ділянок. Виділено шість класів земного покриву: рослинність (ліс, чагарники, трава), відкритий ґрунт, забудова та вода. Навчальні полігони розміщувалися лише в межах однорідних ділянок, без включення змішаних пікселів. Перед класифікацією виконано об’єднання спектральних каналів у багатоканальний растр. Класифікацію виконано методом Random Forest. Навчання моделі проведено з використанням навчальних полігонів, після чого застосовано класифікацію до всього зображення. Загальна точність класифікації, оцінена за коефіцієнтом Каппа, становить 0,81, що відповідає високому рівню достовірності результатів.

Для підвищення точності результату виконано після класифікаційну обробку із застосуванням растрових масок. Маски створено на основі векторних полігонів ділянок відкритого ґрунту, трав’яної рослинності та води, де класифікація містила помилки. За допомогою растрового калькулятора помилково класифіковані пікселі замінено на відповідні класи.

Площі класів визначено шляхом підрахунку кількості пікселів кожного класу з подальшим перерахунком у площу відповідно до просторової роздільної здатності знімка (10 м) та визначено статистичні дані кожного класу за допомогою Zonal statistics.

Методологічну основу розрахунку вуглецевого депо СЗЗ складає ланцюжок послідовних перетворень: NDVI (нормалізований різницевий вегетаційний індекс) → LAI (індекс листкової поверхні) → AGB (надземна фітомаса) → BGB (підземна фітомаса) → вуглецеве депо. Цей підхід поєднує дистанційне зондування Землі (Sentinel-2) як джерело просторово розподіленої інформації про стан рослинності з

регіональними алометричними рівняннями Лакиди П.І. для степово-лісостепової зони України як нормативно-методичною основою розрахунку фітомаси.

Вихідним показником для розрахунку є максимальне значення NDVI вегетаційного сезону (NDVI_пік), отримане за даними зональної статистики Sentinel-2. Для отримання NDVI, характерного безпосередньо для деревно-чагарникового покриву, автором розроблено методику балансової корекції. Скоригований NDVI деревостану (NDVI_дер) розраховується із балансового рівняння за формулою (2.11):

$$NDVI_{заг} \times S_{заг} = NDVI_{дер} \times S_{дер} + NDVI_{чаг} \times 0{,}85 \times S_{чаг} + NDVI_{трав} \times S_{трав} + NDVI_{абіот} \times S_абіот, \quad (2.11)$$

де $S_{заг}$, $S_{дер}$, $S_{чаг}$, $S_{трав}$, $S_абіот$ – площі відповідних класів земного покриву (га);

$NDVI_{трав}$= 0,20 – типове значення NDVI степового травостою влітку;

$NDVI_{абіот}$ = 0,03 – усереднене значення для оголеного ґрунту, забудови та водних об'єктів.

Для чагарників прийнято $NDVI_{чаг}$ = 0,85 × $NDVI_{дер}$, що відображає меншу вертикальну розгалуженість крони порівняно з деревами. Після підстановки $NDVI_{чаг}$ рівняння розв'язується відносно невідомого за формулою 2.12:

$$NDVI_{дер} = (NDVI_{заг} \times S_{заг} - NDVI_{трав} \times S_{трав} - NDVI_{абіот} \times S_абіот) / (S_{дер} + 0{,}85 \times S_{чаг}), \quad (2.12)$$

Балансова корекція дозволяє виключити вплив нелісових класів, трав, оголеного ґрунту та забудови, на середнє значення NDVI по СЗЗ і отримати значення індексу, характерне безпосередньо для деревно-чагарникового покриву.

Поправочний коефіцієнт kv характеризує частку деревно-чагарникового покриву в загальній площі СЗЗ і розраховується за формулою (2.13):

$$kv = \frac{S_{дер}+S_{чаг}}{S_{заг}}, \quad (2.13)$$

На другому етапі скоригований NDVI конвертується в індекс листкової поверхні (LAI, Leaf Area Index). Для листяних насаджень степово-лісостепової зони застосовано лінійну регресійну модель (формули 2.14 та 2.15) [114]:

$$LAI_{ліс} = 7{,}5 \times NDVI_{дер} - 0{,}3, \quad (2.14)$$

$$LAI_{чаг} = 5{,}0 \times NDVI_{чаг} - 0{,}2, \quad (2.15)$$

На третьому етапі LAI конвертується в надземну фітомасу (AGB):

$$AGB = a \times LAI^b, \quad (2.16)$$

де a і b – регіональні алометричні коефіцієнти: для зрілих листяних деревостанів a = 15,3; b = 0,92; для чагарникового ярусу a = 8,7; b = 0,85.

Підземна фітомаса (BGB) розраховується через коефіцієнт кореневої частки R (формула 2.17):

$$BGB = AGB \times R, \quad (2.17)$$

де R = 0,26

Вуглецеве депо розраховується за формулою (2.18):

$$\text{Депо} = (AGB + BGB) \times CF = TB \times CF, \quad (2.18)$$

де CF = 0,47 т C / т сухої фітомаси. Для зіставлення з обсягами викидів CO_2 вуглецеве депо перераховується в еквівалент CO_2 за коефіцієнтом 3,664.

Інтегральна оцінка вуглецевого балансу здійснювалась на основі балансового підходу, згідно з яким вуглецевий баланс підприємства визначається як різниця між річними прямими викидами CO_2 та річною секвестрацією CO_2 деревно-чагарниковим покривом санітарно-захисних зон за формулою (2.19):

$$\text{ВБ} = \text{E} - \text{S}, \quad (2.19)$$

де: ВБ – вуглецевий баланс території, т CO_2/рік;

E – сукупні річні викиди парникових газів підприємства у CO_2-еквіваленті, т CO_2/рік;

S – річне поглинання CO_2 зеленими насадженнями буферних екосистем, т CO_2/рік.

Для кількісного вираження відносного внеску буферних екосистем у компенсацію промислових викидів введено коефіцієнт вуглецевої компенсації (Kcomp), що розраховується за формулою (2.20):

$$\text{К}_{\text{comp}} = \frac{S}{E} \times 100\%, \quad (2.20)$$

Коефіцієнт Kcomp є безрозмірним відносним показником, що характеризує частку промислових викидів CO_2, яка компенсується поглинальною здатністю буферних екосистем санітарно-захисних зон. На відміну від абсолютного показника вуглецевого балансу, Kcomp забезпечує порівнянність результатів між підприємствами різного масштабу виробництва, що є принципово важливим для

порівняльного аналізу трьох ГЗК з суттєво різними обсягами викидів. Шкалу інтерпретації значень Kcomp розроблено з урахуванням типових співвідношень між поглинальною здатністю промислових буферних зон та викидами великих промислових підприємств згідно з даними літературних джерел та практики EU ETS:

- Kcomp < 1 % – буферні екосистеми практично не компенсують викиди підприємства; стан характерний для підприємств з мінімальним озелененням СЗЗ або з надвисокими обсягами викидів;
- Kcomp 1 – 5 % – мінімальна компенсація; буферні екосистеми виконують переважно санітарно-гігієнічну функцію, їх внесок у вуглецевий баланс є незначним;
- Kcomp 5 – 10 % – помірна компенсація; буферні екосистеми забезпечують відчутний, але недостатній внесок у зниження вуглецевого сліду підприємства;
- Kcomp > 10 % – суттєва компенсація; буферні екосистеми є значущим елементом системи управління вуглецевим балансом підприємства.

Слід зазначити, що Kcomp має консервативний характер, оскільки враховує секвестрацію вуглецю надземною та підземною деревно-чагарниковою біомасою, але не включає зміни запасів органічного вуглецю ґрунту, підстилки та мертвої деревини.[22, 23]. Це забезпечує методичну обережність оцінки та унеможливлює завищення поглинальної здатності буферних екосистем. Розрахунок Kcomp для кожного з трьох ГЗК дозволяє здійснити порівняльну оцінку ефективності буферних екосистем, визначити пріоритетність заходів з розширення зелених насаджень та є кількісною основою для розробки сценаріїв декарбонізації.

Сценарний аналіз декарбонізації здійснювався методом багатокритеріального аналізу управлінських рішень на середньостроковому горизонті прогнозування 2025 – 2035 рр. (для сценаріїв Сц1 – Сц4), розширеному до довгострокового горизонту 2025 – 2055 рр. для сценарію Сц5 з огляду на більш пізні строки технологічної готовності CCS та водневих технологій. Вибір таких періодів обумовлений, по-перше, часовими рамками Національного плану з енергетики та клімату України до 2030 року та Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року, по-друге, мінімальним терміном, необхідним для

досягнення вимірюваного екологічного ефекту від розширення деревних насаджень у санітарно-захисних зонах, по-третє, горизонтом повноцінного запровадження механізму СВАМ ЄС, що робить декарбонізацію економічно значущою для досліджуваних підприємств [28, 115].

Базову структуру моделі утворює балансове співвідношення між прямими викидами Scope 1 та секвестраційною здатністю буферних екосистем СЗЗ (2.21):

$$\text{ВБ}\ (t) = E(t) - S(t), \text{К}_{\text{comp}}(t) = \frac{S(t)}{E(t)} \times 100, \qquad (2.21)$$

де ВБ(t) − вуглецевий баланс підприємства у році t, т CO_2/рік;

E(t) − прямі викиди Scope 1 у році t, т CO_2/рік;

S(t) − річна секвестрація деревно-чагарниковим покривом СЗЗ у році t, т CO_2-екв./рік;

Kcomp(t) − коефіцієнт компенсації викидів, %.

Прогнозування динаміки секвестрації S(t) здійснюється за допомогою регресійної моделі, що синтезує дані дистанційного зондування Землі (методика підрозділу 2.4) з нормативними таксаційними параметрами Лакиди П.І. [107] (2.22):

$$\text{S} = \beta_0 \times \beta_1 \times \text{Area} + \beta_2 \times \text{NDVI_mean} + \varepsilon, \qquad (2.22)$$

де S −річна секвестрація (т CO_2-екв./рік);

Area − площа насаджень (га), що для нових ділянок озеленення визначається за результатами оцінки дефіциту озеленення;

NDVI_mean − середньозважений вегетаційний індекс ділянки, отриманий за даними геоінформаційного аналізу Sentinel-2;

β_1 − коефіцієнт, що відповідає прийнятій нормі секвестрації вуглецю (т С/га/рік), диференційованій з урахуванням локальних умов формування та продуктивності насаджень санітарно-захисних зон;

β_2 − коефіцієнт чутливості, що відображає стан вегетації та щільність деревно-чагарникового покриву;

ε − випадкова похибка моделі.

Для врахування вікової динаміки приросту нових насаджень до базової формули введено фазовий коефіцієнт k_фаз(t), що відображає частку поточного

річного приросту від кульмінаційного значення залежно від віку деревостану на конкретний рік прогнозного періоду. Приріст секвестрації від нових насаджень розраховується за формулою (2.23):

$$\Delta S\ (t) = \text{норма} \times k_\text{фаз}(t) \times \text{площа} \times 3{,}664, \qquad (2.23)$$

де норма − нормативний показник секвестрації (т С/га/рік), диференційований за природно-кліматичними зонами (1,5 т С/га/рік для насаджень Полтавського ГЗК із застосуванням консервативного коригування та 1,8 т С/га/рік для сформованих захисних насаджень Центрального та Північного ГЗК);

3,664 − коефіцієнт перерахунку маси вуглецю в еквівалент CO_2.

Альтернативні траєкторії розвитку вуглецевого балансу формалізовано у вигляді п'яти сценаріїв, що різняться комбінацією технологічних та екосистемних заходів декарбонізації: інерційного збереження поточного стану, екстенсивного зростання виробництва, виключно екосистемної компенсації, комбінованого впровадження НДТМ із розширенням насаджень та довгострокової траєкторії з технологіями вловлювання й використання вуглецю (CCS) і водневих технологій. Далі ці сценарії позначено відповідно як Сц1 (базовий), Сц2 (зростання виробництва), Сц3 (лише озеленення), Сц4 (НДТМ + озеленення) та Сц5 (довгостроковий).

Оскільки результати детермінованого моделювання чутливі до точності вхідних параметрів, для оцінки надійності отриманих прогнозів застосовано два взаємодоповнюючі методи аналізу невизначеності. Перший це аналіз чутливості методом «торнадо», що передбачає послідовну варіацію кожного вхідного параметра моделі в межах його оціночної невизначеності за умови фіксації решти параметрів на базовому рівні, з подальшим визначенням розмаху відповідної зміни коефіцієнта компенсації Kcomp. Такий підхід дозволяє ранжувати параметри моделі за ступенем їхнього впливу на кінцевий результат і визначити пріоритетні напрями підвищення точності вхідних даних у подальших дослідженнях.

Другий метод це ймовірнісне моделювання Монте-Карло (N = 1000 ітерацій), що передбачає одночасну незалежну варіацію всіх вхідних параметрів моделі за нормальним законом розподілу в межах обґрунтованих діапазонів невизначеності: викиди базового року E_0 − ±15 % (з урахуванням похибок інвентаризації джерел

викидів та невизначеності коефіцієнтів МГЕЗК); поточна секвестрація S_0 − ±20 % (з урахуванням точності верифікації за результатами польової інвентаризації та обробки в програмному комплексі i-Tree Eco); норма секвестрації нових насаджень ±25 % (з урахуванням впливу кліматичних чинників на приріст деревостанів та очікуваної приживлюваності саджанців на рівні 60 – 90 % для умов техногенних субстратів); ефективність впровадження НДТМ r(t) ±5 відсоткових пунктів (з урахуванням ризиків затримки реалізації технологічних заходів в умовах воєнного часу). За результатами кожної ітерації моделювання формується розподіл значень Kcomp(t) для обраного прогнозного року, на основі якого визначаються медіанне значення, стандартне відхилення та межі 90 % довірчого інтервалу (5-й та 95-й перцентилі розподілу). Поєднання детермінованого сценарного аналізу з імовірнісною оцінкою невизначеності забезпечує не лише прогнозування найбільш вірогідної траєкторії вуглецевого балансу, а й кількісне обґрунтування ступеня надійності цього прогнозу, що є необхідною передумовою для формування обґрунтованих управлінських рекомендацій.

Висновки до розділу 2

За результатами дослідження, проведеного у розділі 2, сформульовано такі висновки.

1. Розроблено методичний апарат дисертаційного дослідження, структурований за п'ятьма послідовними етапами, починаючи від аналітико-теоретичного узагальнення до розробки науково-практичних рекомендацій, що поєднує інструментальні методи польових вимірювань, розрахункові методи оцінки викидів парникових газів, методи дистанційного зондування та геоінформаційного аналізу, а також статистичні методи обробки даних. Така структура забезпечує цілісність переходу від інвентаризації прямих викидів Scope 1 до оцінки секвестраційного потенціалу буферних екосистем і подальшого сценарного моделювання вуглецевого балансу.

2. Обґрунтовано вибір трьох гірничо-збагачувальних комбінатів України (Північний, Центральний, Полтавський ГЗК) на основі критеріїв технологічної однорідності виробництва залізорудних окатишів, природно-кліматичної контрастності розташування (степова та лісостепова зони) та диференційованої

регуляторної чутливості до механізму CBAM. Встановлено, що, попри спільний тип виробничого процесу, підприємства суттєво відрізняються за масштабом виробництва, видами діяльності та структурою матеріальних потоків, що визначає необхідність диференційованого методичного підходу до оцінки вуглецевого балансу кожного з них.

3. Розроблено методику оцінки прямих викидів CO_2 (Scope 1) на основі комбінованого застосування стандартного методу (M1) для паливних потоків та методу балансу мас (M4) для процесних матеріалів виробництва окатишів, що забезпечує повне охоплення викидів від спалювання палива та декарбонізації карбонатної сировини. Визначено диференційовані коефіцієнти вмісту вуглецю для кожного підприємства, зумовлені відмінностями хімічного складу сировини та технологічних режимів випалу.

4. Розроблено комплексну методику оцінки параметрів депонування та секвестрації вуглецю буферними екосистемами СЗЗ, що поєднує три взаємодоповнюючі підходи, а саме нормативний розрахунок за алометричними рівняннями та коефіцієнтами Лакиди П.І. і МГЕЗК, дистанційне зондування Землі за даними Sentinel-2 із застосуванням авторської методики балансової корекції NDVI деревостану, та польову верифікацію через програмний комплекс i-Tree Eco на модельній ділянці. Обґрунтовано ланцюжок послідовних перетворень NDVI → LAI → AGB → BGB → вуглецеве депо, що забезпечує просторово розподілену оцінку секвестраційного потенціалу з урахуванням зональної диференціації природних умов трьох підприємств.

5. Розроблено геоінформаційну методику класифікації земного покриву санітарно-захисних зон методом Random Forest з використанням спектральних індексів NDVI, IRECI та SAVI, що забезпечила загальну точність класифікації на рівні коефіцієнта Каппа 0,81. Обґрунтовано доцільність застосування трьох індексів для комплексної оцінки стану рослинного покриву, NDVI для загальної інтенсивності вегетації, IRECI для оцінки вмісту хлорофілу, SAVI як контрольного індексу для ділянок із вираженим впливом ґрунтового фону.

6. Введено та обґрунтовано систему кількісних показників інтегральної оцінки вуглецевого балансу, абсолютний показник ВБ = E − S та відносний

коефіцієнт вуглецевої компенсації Kcomp, що забезпечують як оцінку абсолютного дефіциту поглинальної здатності буферних екосистем, так і порівнянність результатів між підприємствами різного масштабу виробництва.

7. Розроблено методику динамічного сценарного моделювання вуглецевого балансу на середньостроковий та довгостроковий періоди для п'яти альтернативних сценаріїв декарбонізації, що поєднує регресійну модель прогнозування секвестрації на основі даних дистанційного зондування з розрахунком траєкторій вуглецевого балансу. Обґрунтовано застосування двох взаємодоповнюючих методів оцінки невизначеності результатів моделювання, аналізу чутливості методом «торнадо» та імовірнісного моделювання Монте-Карло, що забезпечує не лише прогнозування найбільш вірогідної траєкторії вуглецевого балансу, а й кількісне обґрунтування ступеня надійності отриманих прогнозів.

РОЗДІЛ 3
ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДОВИХ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

3.1. Аналіз технологічних процесів виробництва залізорудних окатишів як основа оцінки викидів CO_2

Ідентифікація джерел прямих викидів CO_2 на гірничо-збагачувальних підприємствах потребує детального аналізу технологічного процесу виробництва залізорудних окатишів, оскільки саме особливості термічної обробки шихти визначають склад, кількість та характер джерел викидів на кожному підприємстві. Гірничо-збагачувальні комбінати є складними промислово-виробничими системами з повним технологічним циклом від видобутку сировини до виробництва товарної продукції. Виробництво залізорудних окатишів є найбільш енергоємним етапом цього циклу і єдиною стадією, де відбуваються високотемпературні хімічні перетворення компонентів шихти, що безпосередньо генерують CO_2 як паливного, так і процесного походження [116, 117].

Вихідним матеріалом для виробництва окатишів є залізорудний концентрат. Це продукт мокрого магнітного та флотаційного збагачення залізистих кварцитів. На Полтавському ГЗК концентрат виробляється з магнетитових кварцитів Горішньо-Плавнинського та Лавриківського родовищ Кременчуцької магнітної аномалії. На Центральному ГЗК сировиною слугують залізисті кварцити трьох кар'єрів (Глеюватського, Петрівського та Артемівського родовищ) та шахти ім. Орджонікідзе, що забезпечує підприємству унікальну можливість комбінованого відкритого і підземного видобування. На Північному ГЗК концентрат отримують з магнетитових кварцитів Першотравневого та Ганнівського кар'єрів Криворізького залізорудного басейну; завдяки підвищеній якості збагачення (флотаційне доведення) отримують концентрат марки А1 з вмістом заліза ≥65 %. Усі три підприємства здійснюють повний виробничий цикл від видобутку сирої руди до готових окатишів.

Окрім концентрату, у виробництві окатишів використовують три додаткові матеріали:

1. Вапняк ($CaCO_3$) – флюсова добавка, що вводиться до шихти для регулювання основності офлюсованих окатишів. При термообробці він розкладається за реакцією $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$, стаючи одним із ключових джерел процесних викидів вуглекислого газу.

2. Бентоніт (глиниста порода на основі монтморилоніту) – в'яжуча добавка у кількості 0,5 – 1,5 % від маси шихти, що забезпечує пластичність і міцність сирих окатишів під час огрудкування. При термообробці органічний вуглець у його складі вигорає, також вивільняючи CO_2.

3. Природний газ є основним паливом для пальників випалювальних машин і нагрівального обладнання; його спалювання є домінуючим джерелом прямих викидів CO_2 (Scope 1), формуючи 87 – 88 % їх загального обсягу.

На Полтавському ГЗК додатково застосовується лушпиння соняшнику як частковий замінник природного газу у трубчастих обертових печах.

Аналіз технологічного процесу засвідчив, що виробництво залізорудних окатишів включає п'ять послідовних стадій: підготовка сировини та компонентів шихти, дозування і змішування, огрудкування, термічна обробка та відвантаження готової продукції (рис. 3.1.).

Першою стадією є підготовка сировини та компонентів шихти. Основними компонентами шихти є залізорудний концентрат, вапняк та бентоніт. Кожен з цих компонентів проходить власну технологічну підготовку і надходить до відділення дозування у визначеному фізичному стані. Концентрат надходить у цех виробництва окатишів у вигляді пульпи (водомінеральної суспензії з вмістом твердого ~30 – 35 %). Залежно від підприємства зневоднення здійснюється різними способами. На Полтавському ГЗК пульпа послідовно проходить стадії згущення та зневоднення: спочатку у згущувачах, потім у вакуум-фільтрах або у прес-фільтрах, що працюють у режимі «віджиму» або «просушування» за рахунок подачі стисненого повітря від безмасляних компресорів. На Центральному ГЗК зневоднення здійснюється на вакуум-фільтрах, де досягається вологість кеку 9,9 – 10,0 %. Відфільтрований концентрат стрічковими конвеєрами подається у корпус

шихти фабрики огрудкування або на закритий склад. На Північному ГЗК концентрат після збагачувальних фабрик подається насосами безпосередньо до цехів виробництва окатишів.

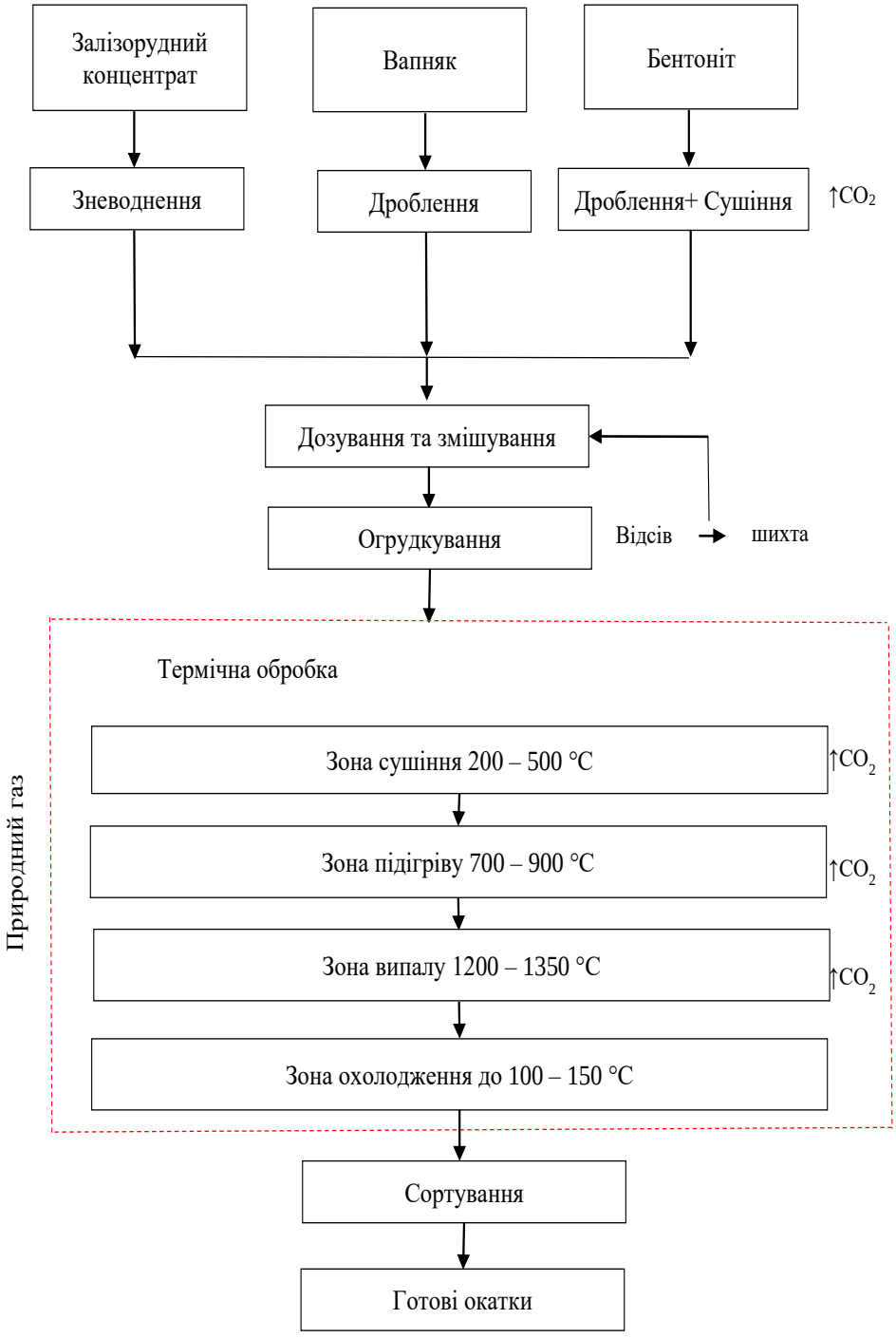


Рис. 3.1. Технологічна схема виробництва залізорудних окатишів (розроблено автором)

Вапняк надходить на підприємства залізничним транспортом партіями і після розвантаження зберігається на відкритих складах. Підготовка включає дроблення

у молоткових дробарках і тонке подрібнення у кульових млинах. На Центральному ГЗК вапняк дробиться та подрібнюється у чотирьох млинах Ш - 50. На Полтавському ГЗК процес ускладнений: у п'яти млинових трактах (млини ШБМ-50А) одночасно відбуваються подрібнення та сушіння шихтових матеріалів і вапняку, і бентоніту, за рахунок тепла продуктів згорання природного газу у топковому агрегаті кожного млина. Подрібнена суміш системою пневмотранспорту подається до накопичувальних бункерів. На Північному ГЗК для офлюсованих окатишів вапняк подрібнюється аналогічним чином, проте його витрата суттєво менша порівняно з іншими підприємствами.

Бентоніт надходить залізничними вагонами і зберігається на відкритих складах. Принципова відмінність між підприємствами полягає у способі його підготовки. На Полтавському ГЗК бентоніт піддається попередньому дробленню і сушінню у барабанному горизонтальному сушилі продуктами спалювання природного газу. Під час сушіння утворюються: CO_2, CO, NO_2, CH_4, N_2O та суміші вуглеводнів C_2-C_8 і C_1-C_4. На Центральному ГЗК барабанне сушило бентоніту присутнє у складі фабрики огрудкування. Після сушіння (або без нього) бентоніт подрібнюється у кульових млинах до крупності не менше 85 % класу 0,074 мм, що є необхідною умовою для ефективного огрудкування.

Дозування компонентів шихти здійснюється у визначеному масовому співвідношенні за розрахунковим рецептом. До складу шихти входять: концентрат як основний компонент (~95 - 97 %), вапняк (~1 - 3 %), бентоніт (~0,5 - 1,5 %) та некондиційний відсортований обпалений матеріал класу 5 мм. Некондиційний матеріал, що утворюється після грохочення готових окатишів, повертається у корпус шихти і використовується для утилізації відсіву та для поліпшення газопроникності шару окатишів на випалювальній машині. На Центральному ГЗК шихтові матеріали подаються у витратні бункери двома паралельними потоками: потік №1 спрямовує готову шихту у роторний змішувач, потік №2 у змішувач «Eirich». На Полтавському ГЗК застосовуються п'ять роторних змішувачів «Eirich». Змішування забезпечує рівномірний розподіл бентоніту та вапняку в масі концентрату, що є критично важливим для якості сирих окатишів.

Огрудкування здійснюється на чашкових огрудковувачах діаметром 7,5 м. Зволожена і перемішана шихта під дією відцентрових сил та поверхневого натягу формується у кульки – сирі окатишів, оптимального діаметра 10 - 15 мм. Бентоніт при цьому виконує роль в'яжучого компоненту, його набухаючі глинисті мінерали (монтморилоніт) утворюють пластичні зв'язки між частинками концентрату, надаючи сирим окатишам достатню міцність для транспортування до випалювальної установки. Після огрудкування сирі окатиші через роликовий грохот-укладальник завантажуються на рухому решітку або конвеєр випалювальної машини. Відсів нестандартних фракцій (+0 - 10 мм та +14 мм) повертається на переогрудкування.

Наступною стадією є термічна обробка. На досліджуваних підприємствах застосовуються два конструктивних типи термічних агрегатів. На Центральному та Північному ГЗК використовуються конвеєрні обпалювальні машини. Це одноагрегатні системи, де сирі окатиші на рухомій конвеєрній решітці послідовно проходять усі термічні зони. На Полтавському ГЗК застосовується схема «Рухома решітка – Трубчаста піч – Кільцевий охолоджувач». Це чотири незалежних технологічних лінії №1-4, кожна з яких включає три послідовно встановлені агрегати: рухому решітку, трубчасту обертову піч і кільцевий охолоджувач. Незалежно від конструктивного типу, термічна обробка включає чотири послідовних зони:

1. Зона сушіння (200 – 500°С) - сирі окатиші з вологістю ~10 % завантажуються на рухому решітку. Гарячі рекуперовані гази від зони випалу подаються димососами у двох режимах: у висхідному потоці (знизу вгору для рівномірного прогрівання) та у низхідному потоці. Відбувається видалення вільної та хімічно зв'язаної вологи.

2. Зона підігріву (700 – 900°С) – висушені окатиші нагріваються у низхідному потоці газів від пальників. Досягнення температури ~840°С ініціює початок термічної декарбонізації вапняку: $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$. Одночасно при температурі понад 500 – 700°С вигорає органічний вуглець у складі бентоніту та мінеральних домішках концентрату: $C+O_2 \rightarrow CO_2$. Частина вуглецю окислюється до СО.

3. Зона випалу (1 200 – 1 350°C) – це головна зона генерації CO_2, де паливна і процесна компоненти реалізуються одночасно. У трубчастій обертовій печі пальники встановлено на розвантажувальному кінці барабану, горіння факелу забезпечує радіаційний та конвекційний нагрів шару у протитечійному режимі, а обертання барабану перемішує окатиші для рівномірного обпікання. У конвеєрних машинах пальники розміщені рівномірно вздовж зони випалу. Відбуваються три одночасних процеси, по-перше, спалювання природного газу: $CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$, по-друге, завершення декарбонізації залишкового вапняку при температурах 1 000 – 1 200°C, по-третє, окислення $Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3$ і твердофазне спікання частинок концентрату. На Полтавському ГЗК у пальниках додатково спалюється лушпиння соняшнику.

4. Зона охолодження (кільцевий охолоджувач, до 100 – 150°C). Гарячі окатиші (~1 000 – 1 100°C) після розвантаження з печі або конвеєрної зони рівномірним шаром надходять у кільцевий охолоджувач. Атмосферне повітря продувається через шар матеріалу двома вентиляторами. Повітря першого вентилятора, нагріваючись, подається до пальника печі як вторинне (рекуперація теплової енергії), а повітря другого вентилятора відводиться через трубу назовні. Охолоджені окатиші через розвантажувальну тічку потрапляють на вібраційний живильник і транспортер.

Після охолодження обпалені окатиші надходять на грохоти для сортування за гранулометричним складом. Кондиційний клас (як правило, +10 - 14 мм) конвеєрами транспортується на склад готової продукції, де формується у штабель. Зі складу окатиші відвантажуються залізничним транспортом. Частина кондиційних окатишів направляється на випалювальну машину як захисний настил на паллетах (візках машини), що оберігає їх від термічного руйнування.

На всіх трьох підприємствах функціонує розгалужена мережа котлів і нагрівального обладнання для теплопостачання цехів і підрозділів. На Полтавському ГЗК це водогрійні котли ПТВМ-100 і понад 250 газових нагрівачів і різаків. На Центральному ГЗК котли Колві-Термона і Факел-08ЛЖ. На Північному ГЗК котли підрозділів.

Таким чином, аналіз технологічних процесів виробництва залізорудних окатишів на трьох досліджуваних підприємствах засвідчив, що попри єдину структурно-логічну схему виробничого ланцюга, між підприємствами існують певні технологічні відмінності. Вони стосуються типів випалювального агрегату, конвеєрні машини на Центральному та Північному ГЗК і схема «Рухома решітка – Трубчаста піч – Кільцевий охолоджувач» на Полтавському ГЗК. Також встановлено, що стадії дроблення, збагачення, дозування та огрудкування є механічними процесами, тоді як термічна обробка є єдиною стадією, де відбуваються високотемпературні хімічні перетворення компонентів шихти. Незважаючи на відмінності у складі та конструктивних особливостях технологічного обладнання, виробництво окатишів на досліджуваних підприємствах охоплює однакові основні стадії та характеризується спільними механізмами утворення прямих викидів CO_2.

3.2. Ідентифікація та характеристика джерел викидів парникових газів досліджуваних підприємств

Визначення переліку та характеристик джерел прямих викидів CO_2 є необхідною передумовою для подальшого розрахунку їх обсягів. Інвентаризація джерел викидів CO_2 на досліджуваних підприємствах проводилась відповідно до вимог Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження переліку видів діяльності, на які поширюються моніторинг, звітність та верифікація викидів парникових газів», що відтворює положення Директиви ЄС 2003/87/ЄС. У ході дослідження здійснювалася ідентифікація та класифікація видів діяльності на кожному підприємстві. Це важливий етап від якого залежить які джерела викидів будуть враховані, який метод розрахунку застосовуватиметься та які матеріальні потоки підлягають обліку. Для віднесення установки до конкретного виду діяльності використовувалося два критерії одночасно: технологічний – виробничий процес має відповідати опису виду діяльності, та кількісний – потужність установки має перевищувати встановлене порогове значення, наприклад загальна

теплова потужність понад 20 МВт для спалювання палива або певний обсяг виробництва для випалювання руди [118, 119].

На всіх трьох досліджуваних підприємствах виявлено два спільних види діяльності, безпосередньо пов'язаних з виробництвом залізорудних окатишів: ВД01 – спалювання палива в установках, загальна номінальна теплова потужність яких перевищує 20 МВт, ВД02 – випалювання або спікання, в тому числі агломерація металевої руди (зокрема сульфідної руди) [120]. Саме поєднання цих двох видів діяльності формує повний обсяг прямих викидів Scope 1 у межах виробництва окатишів на кожному з підприємств. Кожен вид діяльності задає власне коло обладнання, що підлягає обліку, і визначає методи розрахунку викидів.

Після визначення видів діяльності наступним кроком дослідження стала безпосередня ідентифікація конкретних джерел викидів у розрізі кожного підприємства. Для кожного виявленого джерела встановлювалися його належність до відповідного виду діяльності, тип та найменування обладнання, та характер утворення CO_2: паливний (від спалювання природного газу) або процесний (від термохімічних перетворень шихти). У процесі аналізу всі виявлені джерела було систематизовано за функціональним принципом, окремо розглядалося котельне та нагрівальне обладнання як джерела виключно паливних викидів (ВД01) та випалювальні агрегати як процесно-паливні джерела, що одночасно охоплюють ВД01 і ВД02. Така систематизація дозволила не лише скласти повний перелік джерел, а й оцінити їх відносну значущість з точки зору формування загального обсягу викидів CO_2 на кожному підприємстві.

Розглянемо детальніше джерела викидів парникових газів на кожному з трьох досліджуваних підприємств. Всі виявлені джерела викидів систематизовано у чотири функціональні групи відповідно до етапу технологічного процесу, в якому вони задіяні. Перелік джерел викидів Полтавського ГЗК представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Перелік джерел викидів CO_2 ПрАТ «Полтавський ГЗК»

№ п/п	Назва джерела викидів	Кількість, од.	ВД	Тип викидів CO_2
1. Теплопостачання підприємства				
1	Котли парові та водогрійні (ДКВР-20/13, Е 6,5/1,4ГМ, ПТВМ-100, КВ-ГМ-100)	11	ВД01	М1 (паливний)
2	Котли малої потужності (КС-Г045 «Житомир-3», КТН1.100СЕ, Маяк-80)	6	ВД01	М1 (паливний)
3	Котли Мінськ	4	ВД01	М1 (паливний)
4	Інфрачервоні випромінювачі DSL-70	53	ВД01	М1 (паливний)
5	Інфрачервоні випромінювачі DSL-70	27	ВД01	М1 (паливний)
6	Пальникові пристрої ППІВ-30	308	ВД01	М1 (паливний)
7	Пальникові пристрої ППІВ-50	692	ВД01	М1 (паливний)
8	Піч опалювальна «Буржуйка»	1	ВД01	М1 (паливний)
2. Ремонтно-допоміжні операції				
9	Газові різаки	54	ВД01	М1 (паливний)
10	Керосинорізи	47	ВД01	М1 (паливний)
11	Пости газового різання	4	ВД01	М1 (паливний)
12	Нагрівальні газові печі	6	ВД01	М1 (паливний)
13	Ковальське горно	2	ВД01	М1 (паливний)
14	Газовий пальник	1	ВД01	М1 (паливний)
15	Нагрівальна газова двокамерна піч	1	ВД01	М1 (паливний)
3. Підготовка компонентів шихти				
16	Сушильний барабан УСБ (сушіння бентоніту)	1	ВД01, ВД02	М1 + М4
17	Млинові тракти №1-5 (подрібнення і сушіння шихти)	5	ВД01, ВД02	М1 + М4
18	Сушильні барабани	2	ВД01	М1 (паливний)
19	Сушила (вертикальне, камерні, стенди для сушіння ковшів)	17	ВД01	М1 (паливний)
20	Барабанне горизонтальне сушило піску	1	ВД01	М1 (паливний)
4. Термічна обробка окатишів (процесно-паливні джерела)				
21	Трубчасті обертові печі ALLIS-CHALMERS №1-4	8	ВД01, ВД02	М1 + М4 (паливний + процесний)
22	Кільцеві охолоджувачі (ЦВО-1 та ЦВО-2, лінії №1–2)	8	ВД01, ВД02	М1 + М4 (паливний + процесний)

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи дані таблиці 3.1. варто зазначити, що першу групу формують джерела теплопостачання підприємства: котли, інфрачервоні випромінювачі та пальникові пристрої. Котельне обладнання представлене агрегатами різних типів і потужностей. До цієї ж групи віднесено інфрачервоні випромінювачі і пальникові пристрої. Попри незначну одиничну потужність, сукупна кількість пристроїв цієї підгрупи є найбільшою серед усіх виявлених джерел. Усі джерела першої групи належать до ВД01 і генерують виключно паливні викиди CO_2 від спалювання природного газу за методом М1. Другу групу складають джерела ремонтно-допоміжних операцій: газові різаки, керосинорізи та нагрівальне обладнання ремонтних підрозділів. До цієї ж групи відносяться нагрівальні газові печі термічно-ковальського відділення, пости наплавлення бабіту відділення корундування та ковальські горна. Всі ці джерела належать до ВД01. Третю групу утворюють джерела підготовки компонентів шихти. Сушильний барабан та п'ять млинових трактів виявлено у корпусі дроблення і сушки бентоніту. На відміну від двох попередніх груп, ці джерела одночасно охоплюють ВД01 і ВД02, оскільки в процесі сушіння та подрібнення відбувається і спалювання природного газу у топкових агрегатах (паливні викиди М1), і часткові термохімічні перетворення вуглецевмісних компонентів шихти (процесні викиди М4). Додатково до цієї групи відносяться сушильні барабани та сушила ливарної дільниці і залізничного цеху, що є джерелами виключно паливних викидів ВД01. Четверта група це процесно-паливні джерела термічної обробки окатишів. Вона є ключовою з точки зору формування основного обсягу прямих викидів CO_2 підприємства. До неї належать чотири трубчасті обертові печі з кільцевими охолоджувачами. Незважаючи на те, що ця група налічує лише 16 одиниць обладнання, саме тут відбуваються одночасно три процеси: спалювання природного газу у пальниках при 1 200 – 1 350 °С (метод М1), термічна декарбонізація вапняку $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2\uparrow$ (метод М4) та вигоряння органічного вуглецю компонентів шихти (метод М4). Ці джерела охоплюють обидва ВД ВД01 і ВД02 і формують домінуючу частку прямих викидів Scope 1 підприємства.

Наступним об'єктом дослідження є Центральний ГЗК, де структура джерел викидів є принципово іншою як за кількістю, так і за складом (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

Перелік джерел викидів CO_2 ПрАТ «Центральний ГЗК»

№ п/п	Назва джерела викидів	Кількість, од.	ВД	Тип викидів CO_2
1. Теплопостачання підприємства				
1	Котел водогрійний Колві-Термона КТН 100	23	ВД01	М1 (паливний)
2	Котел водогрійний Колві-Термона КТН 50	8	ВД01	М1 (паливний)
3	Апарат опалювальний Колві-Термона КТ-DUO 100Т	3	ВД01	М1 (паливний)
4	Котел «Факел-0,8ЛЖ»	2	ВД01	М1 (паливний)
5	Апарат опалювальний Колві-Термона КТ 26 ТСХ	2	ВД01	М1 (паливний)
6	Термоблок «Колві 350»	2	ВД01	М1 (паливний)
2. Ремонтно-допоміжні операції				
7	Ковальське горно	1	ВД01	М1 (паливний)
3. Підготовка компонентів шихти - відсутня на підприємстві				
4. Термічна обробка окатишів (процесно-паливні джерела)				
8	Обпалювальна машина ОК-324	1	ВД01, ВД02	М1 + М4 (паливний + процесний)

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи дані таблиці варто зазначити, що першу групу складають джерела теплопостачання підприємства. Це шість типів котельного обладнання загальною кількістю 40 одиниць, що відносяться виключно до ВД01. Котельне обладнання представлене агрегатами марки Колві-Термона різних модифікацій, термоблоки «Колві 350», а також котли «Факел-0,8ЛЖ». Усі джерела групи генерують виключно паливні викиди CO_2 за методом М1. Другу групу формує єдине джерело ремонтно-допоміжних операцій ковальське горно. Воно відноситься до ВД01 і є джерелом паливних викидів М1. Третя група підготовка компонентів шихти на Центральному ГЗК відсутня як самостійна категорія джерел. Підготовка компонентів шихти здійснюється у кульових млинах без окремого теплового агрегату. Четверта група представлена єдиною обпалювальною машиною ОК-324. Попри те, що це лише одна одиниця обладнання, вона одночасно охоплює ВД01 і ВД02 та формує основний обсяг прямих викидів CO_2 підприємства. Під час роботи машини в одному агрегаті відбуваються усі термічні процеси сушіння, підігрів, випал та охолодження окатишів, а отже і обидва механізми утворення CO_2:

спалювання природного газу у пальниках (метод М1) та термічна декарбонізація вапняку і вигоряння органічного вуглецю шихти (метод М4). Таким чином, на відміну від Полтавського ГЗК, де процесно-паливних джерел 22, на Центральному ГЗК уся процесна складова викидів М4 сконцентрована в єдиному джерелі. Це є наслідком конструктивної особливості ОК-324 як конвеєрної машини, де всі термічні зони є частинами одного агрегату, а не окремими установками як у схемі Полтавського ГЗК.

Розглянемо структуру джерел викидів CO_2 ПрАТ «Північний ГЗК» (табл. 3.3.)

Таблиця 3.3

Перелік джерел викидів CO_2 ПрАТ «Північний ГЗК»

№ п/п	Назва джерела викидів	Кількість, од.	ВД	Тип викидів CO_2
1. Теплопостачання підприємства				
1	Котли та нагрівальне обладнання цеху підготовки виробництва	6	ВД01	М1 (паливний)
2	Котли та нагрівальне обладнання допоміжних виробництв (АЦ, УЗТ, ГТЦ-1, ГТЦ-2, ЦМП та ін.)	8	ВД01	М1 (паливний)
2. Ремонтно-допоміжні операції — відсутні на підприємстві				
3. Підготовка компонентів шихти — відсутні на підприємстві				
4. Термічна обробка окатишів (процесно-паливні джерела)				
3	Конвеєрні випалювальні машини LURGI 552A та LURGI 552B	2	ВД01, ВД02	М1 + М4 (паливний + процесний)

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи дані таблиці варто зазначити, що першу групу складають джерела теплопостачання підприємства котли та нагрівальне обладнання двох підрозділів загальною кількістю 14 одиниць, що відносяться виключно до ВД01. Усі джерела групи генерують виключно паливні викиди CO_2 за методом М1. Друга і третя групи ремонтно-допоміжні операції та підготовка компонентів шихти на Північному ГЗК відсутні як самостійні категорії джерел викидів. Відсутність групи підготовки шихти пояснюється тим, що конвеєрні машини LURGI не потребують окремого зовнішнього сушильного обладнання для підготовки шихтових матеріалів на газовому паливі, а отже відповідні процеси інтегровані у загальний

тепловий ланцюг машини і не є відокремленими джерелами викидів у системі обліку. Четверта група процесно-паливні джерела термічної обробки окатишів представлена двома конвеєрними випалювальними машинами LURGI 552A та LURGI 552B. Обидві машини об'єднані в єдине джерело ДВ01, яке охоплює 53 точки виходу відхідних газів. Як і у випадку з ОК-324 на Центральному ГЗК, машини LURGI охоплюють одночасно ВД01 і ВД02. Під час їх роботи відбувається і спалювання природного газу у пальниках (метод М1), і термічна декарбонізація вапняку та вигоряння органічного вуглецю шихти (метод М4). Конструктивно машини LURGI є конвеєрними агрегатами, де окатиші послідовно проходять зони сушіння, підігріву, випалу та охолодження на єдиній рухомій решітці, на відміну від схеми Полтавського ГЗК, де ці зони реалізовані трьома окремими апаратами.

Характерною особливістю Північного ГЗК є те, що підприємство виробляє неофлюсовані окатиші з концентрату марки А1 з вмістом заліза ≥65 %, що зумовлює мінімальну витрату вапняку у шихті порівняно з офлюсованими окатишами Полтавського та Центрального ГЗК. Це безпосередньо впливає на структуру процесних викидів М4, адже внесок декарбонізації вапняку є значно меншим, а домінуючою складовою М4 стає вигоряння органічного вуглецю концентрату та бентоніту.

Проведений порівняльний аналіз результатів інвентаризації джерел викидів CO_2 на трьох досліджуваних підприємствах дозволяє виявити низку принципових закономірностей. По-перше, на всіх трьох підприємствах функціонально визначальною є термічна обробка окатишів. Саме тут зосереджені обидва механізми утворення CO_2 одночасно: паливний від спалювання природного газу (метод М1) і процесний від термохімічних перетворень шихти (метод М4). При цьому кількість одиниць обладнання у цій групі є найменшою: 16 агрегатів на Полтавському, 1 на Центральному і 2 на Північному ГЗК. Така закономірність є спільною для всієї галузі: незначна кількість випалювальних агрегатів формує переважну частину прямих викидів Scope 1, тоді як численне допоміжне обладнання має підпорядковане значення. По-третє, між підприємствами існують принципові технологічні відмінності, що визначають структуру процесних викидів М4. На Полтавському ГЗК процесно-паливних джерел 22: сушильний барабан,

п'ять млинових трактів та 16 агрегатів, тоді як на Центральному і Північному ГЗК уся процесна складова зосереджена в єдиному джерелі: відповідно ОК-324 та машинах LURGI. Ця відмінність є прямим наслідком різних конструктивних типів термічних агрегатів: схема Полтавського ГЗК передбачає три окремих апарати (рухому решітку, трубчасту піч та кільцевий охолоджувач), тоді як конвеєрні машини ОК-324 і LURGI об'єднують усі термічні зони в одному агрегаті. По-четверте, склад шихти і тип продукції безпосередньо визначають структуру процесних викидів М4. Полтавський і Центральний ГЗК виробляють офлюсовані окатиші з вапняком у шихті, тому декарбонізація $CaCO_3$ є суттєвою складовою процесних викидів. Північний ГЗК виробляє неофлюсовані окатиші з мінімальною часткою вапняку, тому внесок декарбонізації є незначним, а домінуючою складовою М4 стає вигоряння вуглецю концентрату та бентоніту. Це означає, що перехід до виробництва неофлюсованих DR-pellets, що спостерігається як загальносвітова тенденція в умовах декарбонізації металургії, є одночасно і технологічним, і вуглецево вигідним рішенням.

Таким чином, проведена інвентаризація засвідчила, що попри єдину галузеву приналежність три підприємства суттєво відрізняються за кількістю, структурою та типом джерел викидів CO_2. Спільною рисою є концентрація основного обсягу викидів у групі термічної обробки окатишів. Виявлені відмінності у конструкції термічних агрегатів і підходах до реєстрації джерел є основою для диференційованого розрахунку викидів по кожному підприємству.

3.3. Розрахунок викидів парникових газів

Після встановлення повного переліку джерел викидів CO_2 на кожному підприємстві наступним етапом є формування переліку матеріальних потоків, тобто конкретних речовин і матеріалів, вуглець яких бере участь у процесах горіння або термохімічних перетворень і в кінцевому підсумку переходить у форму CO_2. На основі результатів інвентаризації для кожного підприємства сформовано перелік матеріальних потоків, що підлягають обліку (рис. 3.2.).

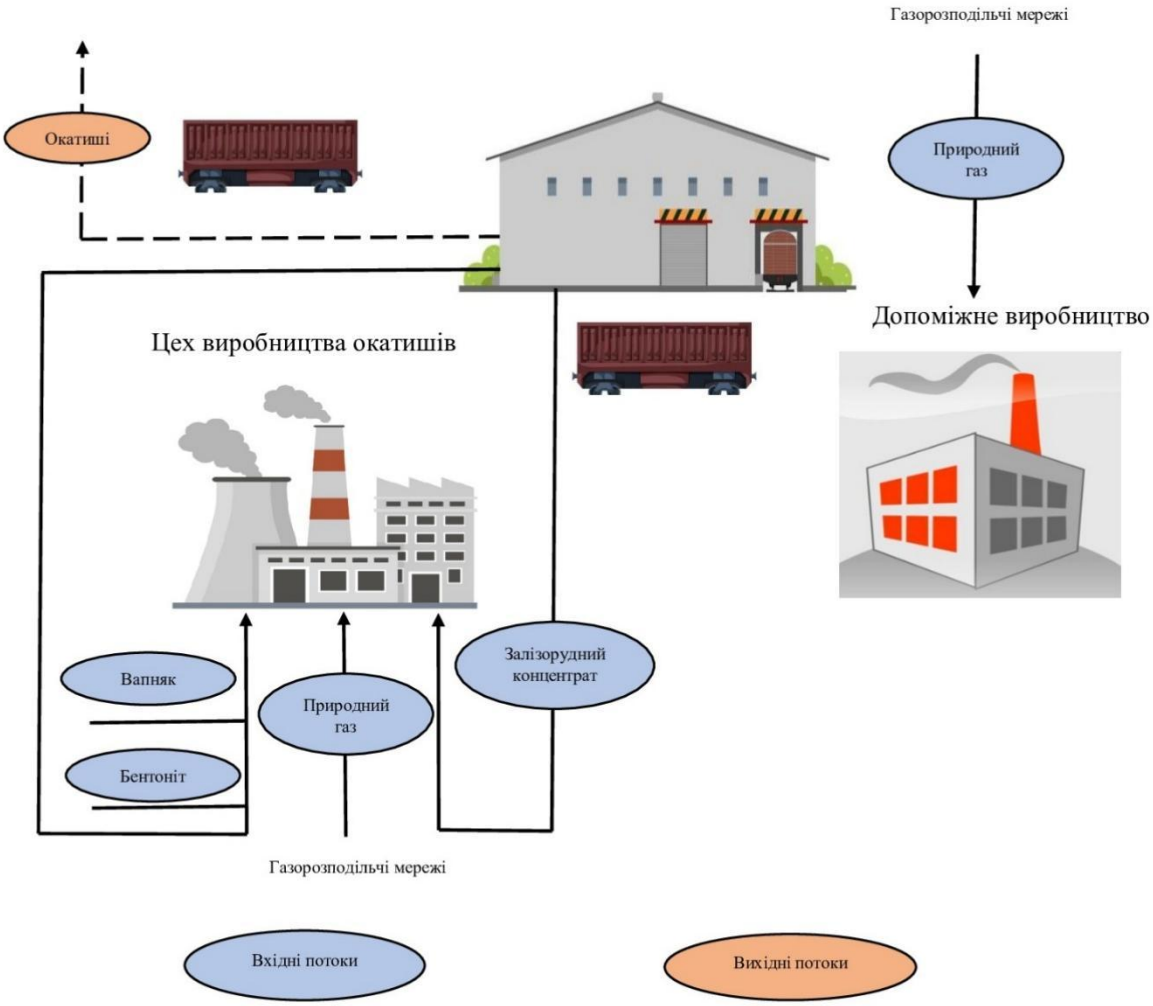


Рис. 3.2 Схема матеріальних потоків (розроблено автором)

У ході дослідження для кожного підприємства визначено перелік матеріальних потоків двох типів (табл. 3.4). Аналізуючи дані варто зазначити, що до першого типу належать паливний потік природний газ, який розраховується за методом М1. До другого типу належать процесні потоки методу М4: вхідні матеріали шихти (вапняк, бентоніт, залізорудний концентрат) та вихідний продукт – окатиші. Відповідно до методу балансу мас (М4), весь вуглець, який надходить з вхідними матеріалами і не залишається у готовій продукції, вважається таким, що окислився до CO_2 в процесі термічної обробки [121].

Таблиця 3.4

Перелік матеріальних потоків досліджуваних підприємств та коефіцієнти розрахунку

Код	Назва матеріального потоку	Тип потоку	Метод розрахунку	Рівень точності Значення коефіцієнта,	Джерело коефіцієнта
П01	Природний газ	Паливо газоподібне	М1 (спалювання)	2а КВ = 55,7 т CO_2/ТДж; НТЗ = 34,5 ГДж/тис. $м^3$	Національний кадастр антропогенних викидів України
П02	Вапняк	Вхідна сировина	М4 (баланс мас)	1 значення за замовчуванням Типу I, 0,120 т С/т	Керівництво МГЕЗК 2006, Том 3 «Промислові процеси та використання продукції», таблиця 2.1
П03	Бентоніт	Вхідна сировина	М4 (баланс мас)	1 значення за замовчуванням Типу I, 0,006284 т С/т	Значення за замовчуванням Типу I. У довідниках МГЕЗК відсутнє, прийнято як єдине верифіковане значення для галузі
П04	Залізорудний концентрат	Вхідна сировина	М4 (баланс мас)	1 значення за замовчуванням Типу I, 0,000849 т С/т	Значення за замовчуванням Типу I. У довідниках МГЕЗК відсутнє, прийнято як єдине верифіковане значення для галузі
П05	Залізорудні окатиші	Вихідний продукт	М4 (баланс мас, від'ємний)	1 значення за замовчуванням Типу I, 0,000346 т С/т	Значення за замовчуванням Типу I
П06	Лушпиння соняшнику	Паливо біомаса	КВ = 0 (біомаса)	2а, КВ = 0	Керівництво МГЕЗК 2006, Том 2 (принцип вуглецевої нейтральності біомаси)*

Примітки: матеріальний потік П06 Лушпиння соняшнику є лише у ПрАТ «Полтавський ГЗК»*

Аналізуючи дані таблиці 3.4 ватро зазначити, що окатиші формують від'ємний внесок у баланс, адже вуглець, що залишився в готових окатишах після випалу, виключається з розрахованого обсягу викидів (рис. 3.3.). Для природного газу застосовано метод М1 (стандартний метод спалювання) з коефіцієнтами рівня точності 2а. Обидва значення взято з останнього Національного звіту (кадастру) антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів, поданого Україною до Секретаріату Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату. Рівень точності 2а передбачає застосування національних значень за замовчуванням Типу II, які є уточненими порівняно з глобальними

значеннями рівня 1 за рахунок врахування характеристик природного газу, що транспортується газотранспортною системою України.

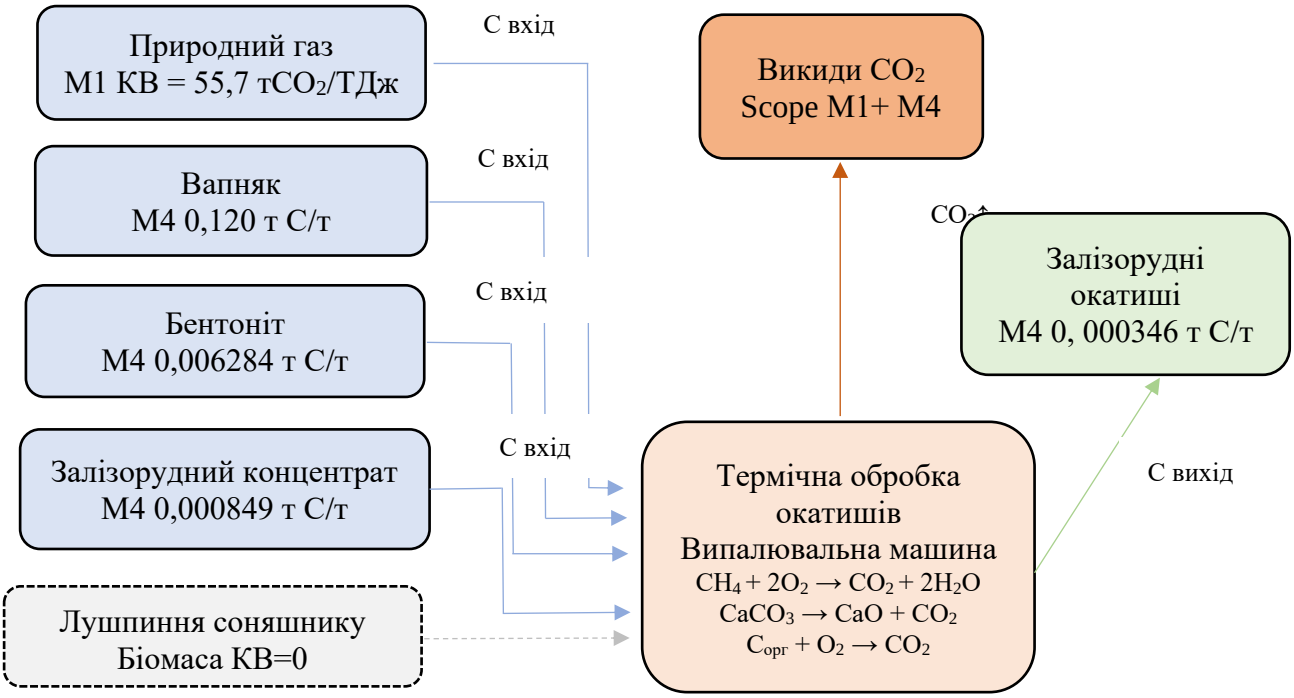


Рис 3.3. Схема балансу вуглецю при виробництві залізорудних окатишів за методами M1 та M4 (розроблено автором)

Коефіцієнти вмісту вуглецю для матеріальних потоків методу M4, що відсутні у довідниках МГЕЗК, визначено відповідно до встановлених методів аналізу. Вміст органічного вуглецю у вапняку встановлено відповідно до ДСТУ Б EN 13639:2015 «Визначення загального вмісту органічного вуглецю у вапняку» (EN 13639:2002, IDT); значення 0,120 т C/т відповідає хімічно чистому карбонату кальцію $CaCO_3$ з молярним відношенням $C/CaCO_3 = 12/100$ і додатково підтверджене таблицею 2.1 Керівництва МГЕЗК 2006, Том 3.

Вміст вуглецю у бентоніті (0,006284 т C/т) визначено за методом ГОСТ 28177-89, що ґрунтується на визначенні двоокису вуглецю, виділеного при обробці бентоніту розчином соляної кислоти, у перерахунку на $CaCO_3$. Значення відповідає середньому вмісту органічного вуглецю для промислових марок формувального бентоніту монтморилонітового типу.

Вміст вуглецю у залізорудному концентраті (0,000849 т C/т) та залізорудних окатишів (0,000346 т C/т) визначено відповідно до ДСТУ ГОСТ 23581.9:2008 «Руди

залізні, концентрати, агломерати і окатиші. Методи визначення вмісту вуглецю» кулонометричним методом. Менший вміст вуглецю в окатишах порівняно з концентратом є закономірним наслідком термічного вигоряння органічного вуглецю під час випалу при тих самих температурах.

Для розрахунку викидів CO_2 за методами М1 та М4 використовувалися фактичні дані про діяльність (ДД), обсяги споживання палива та сировини та реалізації готової продукції за звітний рік. Зведені дані про діяльність по трьох досліджуваних підприємствах за 2023 - 2025 роки наведено у таблицях 3.5 – 3.7.

Таблиця 3.5

Зведені дані про діяльність ПрАТ «Полтавський ГЗК» за матеріальними потоками, 2023 - 2025 рр.

Матеріальний потік	Од.	Полтавський ГЗК		
		2023 р.	2024 р.	2025 р.
Природний газ	тис. $м^3$	74 678,45	46 342,00	53 760,00
Вапняк	т	173 456,00	30 265,00	32 750,00
Бентоніт	т	92 567,00	70 350,28	77 500,00
Залізорудний концентрат	т	6 432 085,00	4 000 645,00	6 100 000,00
Залізорудні окатиші (реалізація)	т	-6 000 500,00	-3 900 000,00	-4 306 000,00
Лушпиння соняшнику	т	80 600,00	51 963,00	56 000,00

Таблиця 3.6

Зведені дані про діяльність ПрАТ «Центральний ГЗК» за матеріальними потоками, 2023 - 2025 рр.

Матеріальний потік	Од.	Центральний ГЗК		
		2023 р.	2024 р.	2025 р.
Природний газ	тис. $м^3$	13 544,03	13 767,91	16 500,70
Вапняк	т	58 600,45	76 555,15	86 500,20
Бентоніт	т	39 267,62	35 807,00	38 870,00
Залізорудний концентрат	т	2 200 759,00	2 579 202,00	2 800 000,00
Залізорудні окатиші (реалізація)	т	−1 445 810,00	−2 500 000,00	-2 670 000,00
Лушпиння соняшнику	т	-	-	-

Таблиця 3.7

Зведені дані про діяльність ПрАТ «Північний ГЗК» за матеріальними потоками, 2023 - 2025 рр.

Матеріальний потік	Од.	Північний ГЗК		
		2023 р.	2024 р.	2025 р.
Природний газ	тис. $м^3$	28 400,49	37 600,68	42 430, 00
Вапняк	т	789,00	645,30	530,00
Бентоніт	т	56 527,00	61 869,39	68 200,00
Залізорудний концентрат	т	1 800 960,30	3 278 600,10	3 640 000,00
Залізорудні окатиші (реалізація)	т	−1 500 524,70	−2 000 338,00	-3 300 000,00
Лушпиння соняшнику	т	-	-	-

На основі фактичних даних про діяльність, наведених у таблицях 3.5 – 3.7, та коефіцієнтів вмісту вуглецю відповідно до таблиці 3.4 здійснено розрахунок прямих викидів CO_2 (Scope 1) по кожному підприємству за 2023-2025 роки. Результати розрахунку по кожному матеріальному потоку наведено у таблицях 3.8 – 3.10.

Таблиця 3.8

Результати розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Полтавський ГЗК» за матеріальними потоками, 2023-2025 рр., т CO_2

Матеріальний потік	Метод	2023 рік, т CO_2	2024 рік, т CO_2	2025 рік, т CO_2
Природний газ	М1	143 505,84	89 053,10	103 307,90
Вапняк	М4	76 265,13	13 306,92	14 399,52
Бентоніт	М4	2 131,32	1 619,79	1 784,40
Залізорудний концентрат	М4	20 008,52	12 444,95	18 975,49
Залізорудні окатиші	М4	-7 607,10	-4 944,20	-5 458,91
Лушпиння соняшнику	КВ=0	0,00	0,00	0,00
Разом		234 303,71	111 480,55	133 008,41

Аналіз результатів розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Полтавський ГЗК» (табл. 3.8) засвідчує, що природний газ є домінуючим джерелом викидів упродовж усього досліджуваного періоду, формуючи 61,2 – 79,9 % загального

обсягу залежно від року. Разом з тим визначальною особливістю підприємства є висока частка процесних викидів від декарбонізації вапняку 32,5 % у 2023 р., що є прямим наслідком виробництва офлюсованих окатишів з підвищеним вмістом $CaCO_3$ у шихті. Різке скорочення викидів від вапняку у 2024 р. з 76 265 до 13 307 т CO_2, тобто у 5,7 рази, є індикатором не лише загального падіння виробництва, а й суттєвої зміни рецептури шихти в умовах воєнного часу. Загальний обсяг викидів Scope 1 скоротився у 2024 р. до 111 481 т CO_2 (52,4 % відносно 2023 р.) та частково відновився у 2025 р. до 133 008 т CO_2, не досягнувши базового рівня. Питомий вуглецевий слід у 2023 р. становив 39,0 кг CO_2/т окатишів, що відповідає галузевому діапазону 35 – 45 кг CO_2/т і визначає CBAM-навантаження на рівні 3,51 $/т продукції при поточній ціні вуглецю 90 $/т CO_2.

Таблиця 3.9

Результати розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Центральний ГЗК» за матеріальними потоками, 2023-2025 рр., т CO_2

Матеріальний потік	Метод	2023 рік, т CO_2	2024 рік, т CO_2	2025 рік, т CO_2
Природний газ	М1	26 026,89	26 457,10	31 708,57
Вапняк	М4	25 765,45	33 659,77	38 032,41
Бентоніт	М4	904,12	824,44	894,97
Залізорудний концентрат	М4	6 845,98	8 023,22	8 710,06
Залізорудні окатиші	М4	-1 832,92	-3 169,36	-3 384,88
Лушпиння соняшнику	КВ=0	-	-	-
Разом		57 709,51	65 795,17	75 961,13

Аналіз результатів розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Центральний ГЗК» (табл. 3.9) засвідчує, що структура викидів є принципово відмінною від Полтавського ГЗК. Природний газ і вапняк формують практично рівні частки 45,1 % і 44,6 % відповідно у 2023 р., тоді як у 2024 – 2025 рр. вапняк виходить на перше місце, досягаючи 50,1 – 51,2 % загального обсягу. Визначальною технологічною особливістю підприємства є найвища серед трьох досліджуваних ГЗК питома витрата вапняку на тонну окатишів, що відображає виробництво офлюсованих окатишів з підвищеним основним числом шихти і зумовлює

домінування процесних викидів над паливними. Зростання викидів від декарбонізації вапняку у 2024 р. на 30,6 % з 25 765 до 33 660 т CO_2 при практично незмінному обсязі спалювання газу (+1,7 %) свідчить про цілеспрямоване нарощування частки офлюсованої продукції в умовах перебудови ринку збуту в умовах воєнного часу. Загальний обсяг викидів Scope 1 стабільно зростав упродовж усього досліджуваного періоду з 57 710 т CO_2 у 2023 р. до 65 795 т (+14,0 %) у 2024 р. та 75 961 т (+31,6 %) у 2025 р., що суттєво відрізняє підприємство від Полтавського ГЗК, який продемонстрував різке падіння виробництва у 2024 р. Питомий вуглецевий слід у 2023 р. становив 39,9 кг CO_2/т окатишів, що відповідає галузевому діапазону 35 – 45 кг CO_2/т і визначає CBAM-навантаження на рівні 3,59 $/т продукції при поточній ціні вуглецю 90 $/т CO_2.

Таблиця 3.10

Результати розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Північний ГЗК» за матеріальними потоками, 2023-2025 рр., т CO_2

Матеріальний потік	Метод	2023 рік, т CO_2	2024 рік, т CO_2	2025 рік, т CO_2
Природний газ	М1	54 575,80	72 255,35	81 535,61
Вапняк ($CaCO_3$)	М4	346,91	283,73	233,03
Бентоніт	М4	1 301,51	1 424,52	1 570,28
Залізорудний концентрат	М4	5 602,31	10 198,86	11 323,08
Залізорудні окатиші	М4	-1 902,28	-2 535,92	-4 183,56
Лушпиння соняшнику	КВ=0	-	-	-
Разом		59 924,25	81 626,53	90 478,44

Аналіз результатів розрахунку прямих викидів CO_2 ПрАТ «Північний ГЗК» (табл. 3.10) засвідчує, що природний газ є абсолютно домінуючим джерелом викидів упродовж усього досліджуваного періоду, формуючи 88,5 – 91,1 % загального обсягу, що є найвищою часткою серед трьох досліджуваних підприємств. Визначальною технологічною особливістю підприємства є переважне виробництво неофлюсованих окатишів із мінімальним використанням вапняку як флюсуючого компонента, внаслідок чого частка процесних викидів від декарбонізації карбонатів є мізерною і не перевищує 0,6% загального обсягу на

противагу 32,5 – 50,1 % у ПГЗК та ЦГЗК відповідно. Різке зростання викидів від залізорудного концентрату у 2024 р. на 82,0 % з 5 602 до 10 199 т CO_2 при одночасному збільшенні газових викидів на 32,4 %, відображає суттєве нарощування обсягів виробництва, що підтверджується зростанням реалізації окатишів з 1 500 524 до 2 000 338 т. Загальний обсяг викидів Scope 1 послідовно зростав з 59 924 т CO_2 у 2023 р. до 81 627 т (+36,2 %) у 2024 р. та 90 478 т (+51,0 %) у 2025 р., що є найвищим темпом серед трьох підприємств і свідчить про стабільне нарощування виробничих потужностей попри воєнний стан. Питомий вуглецевий слід у 2023 – 2024 рр. становив 39,9 – 40,8 кг CO_2/т окатишів, однак у 2025 р. знизився до 27,4 кг CO_2/т (−31,3%) завдяки значному зростанню випуску продукції при відносно помірнішому збільшенні абсолютних викидів, що формує CBAM-навантаження на рівні 2,472 – 3,67 $/т залежно від року при поточній ціні вуглецю 90 $/т CO_2.

Отже, аналізуючи отримані результати розрахунку прямих викидів CO_2 варто зазначити, що сукупні викиди трьох підприємств становили 351 937 т CO_2 у 2023 р., скоротилися до 258 902 т (-26,4 %) у 2024 р. та частково відновилися до 299 448 т у 2025 р., не досягнувши базового рівня. При цьому частка Полтавського ГЗК у загальному обсязі скоротилася з 66,6 % у 2023 р. до 43,1 – 44,4 % у 2024 – 2025 рр., натомість частки Центрального та Північного ГЗК симетрично зросли з 16,4 % і 17,0 % до 25,4 % і 30,2 % відповідно.

Показовою є різнонаправленість структурних змін: якщо у 2024 – 2025 рр. частка паливних викидів (M1) у сукупному обсязі зросла з 63,7 % до 72,3 – 72,5 % порівняно з 2023 р., то це відображає не підвищення газоємності виробництва, а різке скорочення процесних викидів від декарбонізації вапняку на Полтавському ГЗК з 76 265 до 13 307 – 14 400 т CO_2.

Найбільш значущим результатом з позицій CBAM є конвергенція питомих вуглецевих слідів: якщо у 2023 р. всі три підприємства демонстрували практично ідентичний показник 39,0 – 39,9 кг CO_2/т окатишів, то у 2025 р. він диференціювався до 27,4 – 30,9 кг CO_2/т, причому Північний ГЗК досяг найнижчого значення завдяки випереджальному зростанню обсягів реалізації [122, 123, 124, 125, 126, 127]. Це означає, що при поточній ціні вуглецю 90 $/т CO_2

CBAM-навантаження на продукцію трьох підприємств у 2025 р. зблизилося до діапазону 2,47 – 2,78 $/т, тоді як у 2023 р. воно було практично однаковим на рівні 3,51 – 3,59 $/т [128]. Тобто перехід до масштабнішого виробництва з нижчою питомою енергоємністю формує конкурентну перевагу саме в умовах вуглецевого регулювання.

Детальний аналіз динаміки та структури викидів у розрізі підприємств наведено у рисунках 3.4 – 3.6.

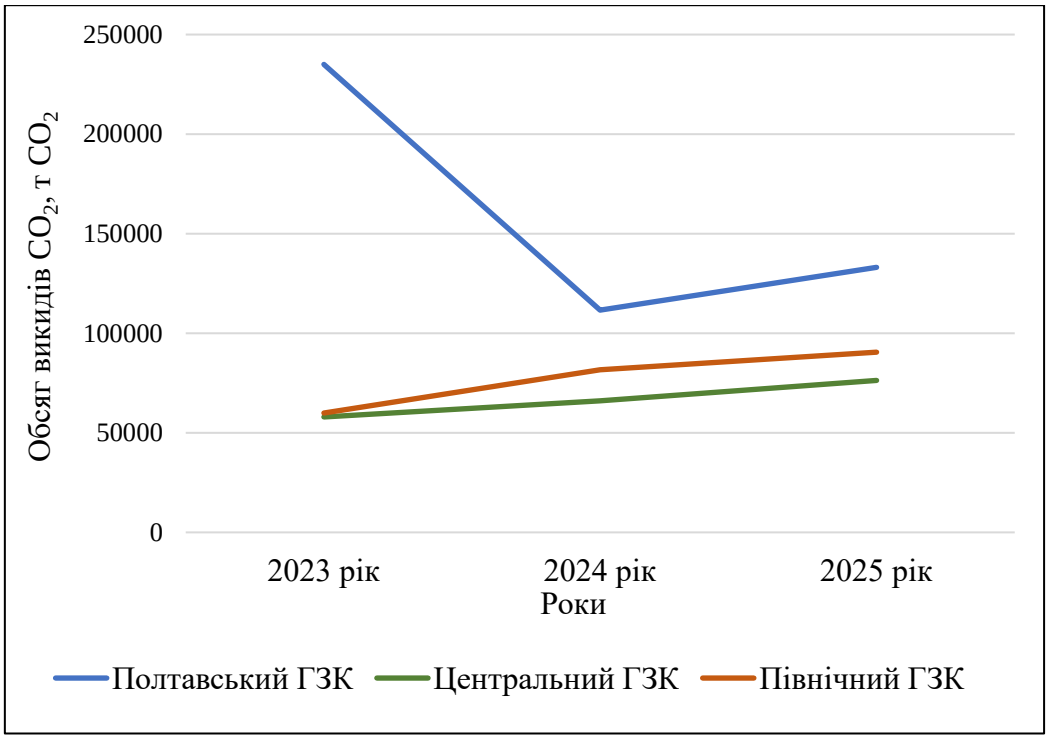


Рис. 3.4. Динаміка прямих викидів CO_2 на досліджуваних підприємствах (побудовано автором)

Аналіз динаміки прямих викидів CO_2 (рис. 3.4) наочно демонструє, що у 2023 р. Полтавський ГЗК формував 66,6 % сукупних викидів трьох підприємств, тоді як Центральний та Північний ГЗК розподіляли решту практично порівну 16,4 % і 17,0 % відповідно. Ключовий структурний зсув 2024 – 2025 рр. полягає у тому, що Північний ГЗК вперше перевищив Центральний за абсолютним обсягом викидів, відображаючи вищі темпи нарощування виробництва на тлі практично ідентичної стартової бази 2023 р.

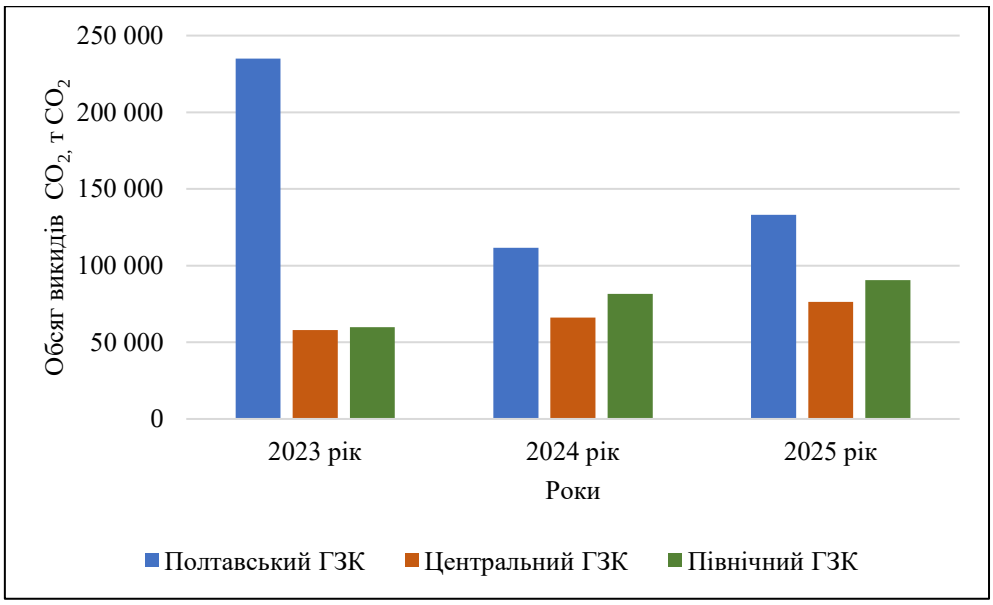


Рис. 3.5. Порівняння обсягів викидів CO_2 по підприємствах, 2023-2025 роки, т CO_2 (побудовано автором)

Порівняльний аналіз абсолютних обсягів викидів (рис. 3.5) кількісно підтверджує зближення підприємств, якщо у 2023 р. Полтавський ГЗК перевищував Центральний у 4,1 рази, а Північний у 3,9 рази, то у 2025 р. розрив скоротився до 1,8 і 1,5 рази відповідно, причому Північний ГЗК уперше випередив Центральний і наближається до показників Полтавського ГЗК, демонструючи найвищі темпи абсолютного приросту викидів серед трьох підприємств.

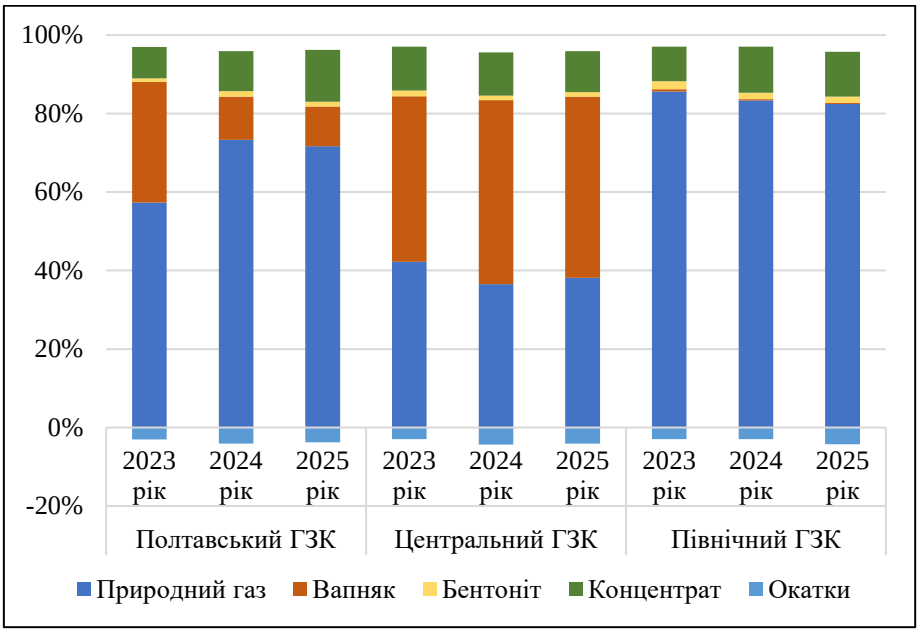


Рис. 3.6. Структура прямих викидів CO_2 за матеріальними потоками, 2023-2025 роки, т CO_2 (побудовано автором)

Аналіз структури прямих викидів CO_2 за матеріальними потоками (рис. 3.6) розкриває принципові технологічні відмінності між підприємствами. На Полтавському ГЗК у 2023 р. природний газ формував 61,2 % викидів, вапняк 32,5 %, однак у 2024 – 2025 рр. після різкого скорочення витрат вапняку його частка впала до 10,8 – 11,9 %, а домінування газу посилилося до 77,7 – 79,9 %. На Центральному ГЗК спостерігається протилежна тенденція: частка вапняку зросла з 44,6 % у 2023 р. до 50,1 – 51,2 % у 2024 – 2025 рр., перевищивши частку природного газу (40,2 – 41,7 %). Принципово інша картина на Північному ГЗК, природний газ стабільно формує 88,5 – 91,1 % викидів упродовж усього періоду, тоді як вапняк не перевищує 0,6 %, що є прямим відображенням виробництва виключно неофлюсованих окатишів. Спільною рисою всіх трьох підприємств є зростання частки залізорудного концентрату у 2024 – 2025 рр. до 11,2 – 14,3 % (ПГЗК), 11,5 – 12,2 % (ЦГЗК) та 12,5% (ПВНГЗК), що корелює із загальним нарощуванням обсягів переробки.

Виявлені структурні закономірності мають безпосереднє прикладне значення для формування стратегій декарбонізації. Для Полтавського та Центрального ГЗК пріоритетними напрямами є скорочення питомої витрати вапняку шляхом оптимізації рецептури шихти або переходу до виробництва неофлюсованих DR-pellets, що одночасно є і технологічно, і вуглецево вигідним рішенням в умовах декарбонізації металургії [129, 130, 131]. Для Північного ГЗК основним об'єктом управління викидами є природний газ, заміщення якого воднем або інтеграція технологій уловлювання CO_2 є стратегічно пріоритетними заходами у середньостроковій перспективі [132, 133]. На всіх трьох підприємствах природний газ залишається домінуючим або значущим джерелом викидів, що визначає його як ключовий об'єкт галузевої кліматичної політики в контексті виконання зобов'язань за механізмом CBAM та потенційної інтеграції до системи EU ETS.

Таким чином, розрахунок прямих викидів CO_2 на трьох досліджуваних підприємствах за методами М1 та М4 дозволив отримати верифіковану кількісну картину їх вуглецевого сліду за 2023 – 2025 роки [134, 135, 136]. Сукупні викиди Scope 1 у межах облікових доменів ВД01 та ВД02 склали на ПрАТ «Полтавський

ГЗК» 234 304 т, 111 481 т та 133 008 т відповідно; на ПрАТ «Центральний ГЗК» 57 710 т, 65 795 т та 75 961 т; на ПрАТ «Північний ГЗК» 59 924 т, 81 627 т та 90 478 т.

Встановлено, що попри спільну галузеву приналежність підприємства суттєво відрізняються як за абсолютними обсягами викидів, так і за їх структурою. Визначальним чинником структурних відмінностей є тип продукції: виробництво офлюсованих окатишів на Полтавському та Центральному ГЗК зумовлює значну частку процесних викидів від декарбонізації вапняку (33 – 50 % загального обсягу), тоді як виробництво неофлюсованих окатишів на Північному ГЗК робить природний газ практично єдиним суттєвим джерелом викидів (88,5 – 91,1 %). На всіх трьох підприємствах природний газ є домінуючим або одним із двох ключових джерел викидів, що визначає його як головний об'єкт управління в контексті декарбонізації галузі.

Достовірність розрахованих обсягів викидів CO_2 безпосередньо визначається точністю первинних даних про діяльність, що формуються засобами вимірювальної техніки (ЗВТ) на кожному підприємстві. На всіх трьох досліджуваних підприємствах облік витрати природного газу здійснюється комерційними витратомірами діафрагменними або роторними, що проходять державну метрологічну сертифікацію. Це дозволяє застосовувати спрощений метод оцінки невизначеності (метод РО-1): як показник невизначеності приймається максимально допустима похибка під час експлуатації (МДПЕ), встановлена законодавством про метрологію. Для комерційних витратомірів природного газу МДПЕ становить ±0,2-2,25 % залежно від типу приладу, що при розрахунку сумарної невизначеності за двома паралельними витратомірами дає результуючу похибку в межах ±0,2 %. Облік твердої сировини вапняку, бентоніту та залізорудного концентрату здійснюється залізничними вагонними вагами (МДПЕ ±0,25 %) у поєднанні з маркшейдерським методом визначення залишків на складах. Невизначеність маркшейдерського методу відповідно до галузевої нормативної документації становить ±8 % при обсязі відвалу менше 20 тис. $м^3$. Оскільки складські приміщення підприємств здатні вмістити понад 5 % річного обсягу відповідної сировини, зміна запасів включається до розрахунку сумарної невизначеності даних про діяльність.

Результати оцінки невизначеності даних про діяльність для ключових матеріальних потоків методу М4 наведено у таблиці 3.11

Таблиця 3.11

Оцінка невизначеності даних про діяльність за матеріальними потоками

Матеріальний потік	Категорія	Метод вимірювання	Досягнута невизначеність	Поріг рівня точності
Природний газ	Значний	Комерційні витратоміри (2 прилади)	±0,20%	≤±1,5% (рівень 4)
Вапняк	Значний	Залізничні ваги + маркшейдерський метод	±3,09%	≤±5,0% (рівень 2)
Бентоніт	Мінімальний	Залізничні ваги + маркшейдерський метод	±1,45%	≤±1,5% (рівень 4)
Залізорудний концентрат	Значний	Конвеєрні ваги (2 прилади)	±0,71%	≤±1,5% (рівень 4)
Залізорудні окатиші	Незначний	Конвеєрні ваги (2 прилади)	±0,71%	≤±1,5% (рівень 4)

Джерело: розраховано автором

Аналіз наведених даних засвідчує, що для більшості матеріальних потоків досягнута невизначеність відповідає вимогам рівня точності 4. Виняток становить вапняк, для якого сумарна невизначеність ±3,09 % перевищує поріг рівня 4 (±1,5 %), що зумовлено домінуючим внеском маркшейдерського методу визначення залишків на складах (±8 %). Відповідно до вимог нормативної бази МЗВ для цього потоку застосовується рівень точності 2 з порогом ±5,0 %, якому розрахована невизначеність відповідає [137]. Для підприємств, де вапняк формує ЗЗ – 50% загального обсягу викидів (Полтавський та Центральний ГЗК), підвищена невизначеність даних про діяльність по цьому потоку є основним чинником, що впливає на точність підсумкового результату розрахунку. Коефіцієнти вмісту вуглецю для вапняку, бентоніту, залізорудного концентрату та окатишів визначаються за результатами лабораторних аналізів з використанням інфрачервоного методу (аналізатор вуглецю та сірки), що відповідає вимогам рівня точності 3. Для природного газу застосовується рівень точності 2а на основі значень Національного кадастру антропогенних викидів, що є обґрунтованим з огляду на технічну неможливість відбору проб газу без порушення цілісності комерційного газопроводу.

3.4. Оцінка ризиків достовірності розрахунку прямих викидів CO_2 на досліджуваних гірничо-збагачувальних підприємствах

Розрахунок прямих викидів CO_2 за методами М1 та М4 є кількісним науковим методом, точність результатів якого визначається якістю вхідних даних і достовірністю застосованих розрахункових коефіцієнтів. Відхилення у будь-якому з цих параметрів призводить до систематичної або випадкової похибки у підсумковому обсязі викидів, що має як методологічні, так і практичні наслідки, насамперед у контексті виконання вимог механізму CBAM та інтеграції до системи EU ETS. З метою комплексної оцінки достовірності отриманих результатів проведено систематизацію ризиків за трьома групами: методологічні, операційні та регуляторні. Результуючий показник ризику визначається як добуток I × B і класифікується відповідно до матриці ризиків (табл. 3.12.

Таблиця 3.12

Матриця ризиків розрахунку прямих викидів CO_2 на досліджуваних підприємствах

Ймовірність (I)	Рівень впливу на обсяг викидів (B)				
	1 Мінімальний (< 0,1 % загального обсягу)	2 Незначний (0,1 – 1 %)	3 Помірний (1 – 5 %)	4 Суттєвий (5 – 15 %)	5 Критичний (> 15 %)
5 – Майже неминучий (> 50 %)	Середній	Високий	Високий	Високий	Високий
4 – Вірогідний (20 – 50 %)	Середній	Середній	Високий	Високий	Високий
3 – Можливий (5 – 20 %)	Низький	Середній	Середній	Високий	Високий
2 – Малоймовірний (1 – 5 %)	Низький	Низький	Середній	Середній	Високий
1 – Рідкісний (< 1 %)	Низький	Низький	Низький	Середній	Середній

Примітка: зелений колір – низький ризик (I×B ≤ 4); жовтий – середній ризик (I×B = 5-12); червоний – високий ризик (I×B ≥ 15).

Джерело: адаптовано автором.

Оцінка ризиків здійснювалась напівкількісним методом відповідно до методологічних рекомендацій системи моніторингу, звітності та верифікації [138, 139]. Кожен ризик характеризується двома параметрами: ймовірністю виникнення інциденту (I) за шкалою від 1 (рідкісний, < 1 % на рік) до 5 (майже неминучий, >50 %) та рівнем впливу на підсумковий обсяг викидів (B) за шкалою від 1 (мінімальний, < 0,1 % загального обсягу) до 5 (критичний, > 15 %).

Для кожного ідентифікованого ризику визначено властивий рівень (до застосування контрольних заходів) та залишковий рівень (після їх впровадження). Зведену оцінку ризиків за всіма трьома групами наведено у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13

Зведена оцінка ризиків достовірності розрахунку викидів CO_2 на досліджуваних ГЗК

Вид ризику	Джерело ризику	Рівень до контролю	Рівень після контролю	Захід мінімізації
1. Методологічні ризики (пов'язані з точністю розрахунку)				
Невизначеність коефіцієнтів вмісту C рівня 1 для M4	Коефіцієнти не враховують специфіку родовища; відхилення ±30-50 %	Середній (I=2, B=3)	Низький (I=1, B=2)	Перехід до рівня 3 (лабораторні аналізи), щомісячне оновлення коефіцієнтів
Некоректні ДД	Будь-яка зміна технологічного режиму або рецептури шихти призводить до систематичного відхилення	Середній (I=2, B=3)	Низький (I=1, B=2)	Налагодження системи збору даних про діяльність
Неврахування CO/CH_4 у відхідних газах	Метод M4 передбачає повне окислення C до CO_2	Низький (I=1, B=2)	Низький (I=1, B=1)	Допустиме відхилення в межах рівня 1; у разі переходу до рівня 3 врахування через CEMS
2. Операційні ризики (пов'язані зі збором та обробкою даних)				
Збій або несправність ЗВТ (лічильники газу, ваги)	Вихід з ладу, викрадення, збій електропостачання	Середній (I=2, B=4)	Низький (I=1, B=2)	Резервний прилад; паралельний облік; звірка з рахунками-фактурами постачальника
Людський фактор при ручному внесенні даних	Помилки при введенні ДД, НТЗ, вмісту вуглецю	Середній / Високий (I=2–3, B=4–5)	Низький / Середній (I=1–2, B=3–4)	Перевірка двома особами; перехресна перевірка з попередніми роками та даними виробництва
Пошкодження або втрата розрахункового файлу	Вірусне зараження, злам IT-системи, збій бази даних	Середній / Високий (I=2–4, B=4–5)	Низький (I=1, B=3)	«Дзеркальний» сервер у режимі реального часу; резервне копіювання; зовнішній диск

Продовження таблиці 3.13

3. Регуляторні ризики (пов'язані з CBAM та EU ETS)				
Заниження викидів у CBAM-декларації	Застосування нижчих рівнів точності; неповне врахування потоків	Середній (I=2, B=3)	Низький (I=1, B=2)	Підвищення рівнів точності M4; незалежна верифікація для CBAM
Завищення викидів та втрата конкурентних переваг	Систематичне відхилення коефіцієнтів рівня 1 у бік завищення	Середній (I=2, B=3)	Низький (I=1, B=2)	Перехід до лабораторних коефіцієнтів рівня 3; впровадження CEMS для основних агрегатів

Джерело: розроблено автором

Основним джерелом методологічної невизначеності у цьому дослідженні є застосування коефіцієнтів вмісту вуглецю рівня точності 1 для потоків методу M4 вапняку, бентоніту, залізорудного концентрату та окатишів. Коефіцієнти рівня 1 є фіксованими галузевими значеннями за замовчуванням і не відображають реального хімічного складу матеріалів конкретних родовищ. Для карбонатних порід (вапняк) відхилення від галузевого значення може становити ±30 – 50 % залежно від мінералогічного складу сировини [140]. Оскільки процесні викиди M4 від зазначених потоків формують від 8 до 55 % загального обсягу викидів залежно від підприємства і року, результуюча похибка у підсумковому значенні може сягати 4 – 28 %. Найбільш значущою ця невизначеність є для Полтавського ГЗК, де частка вапняку у загальних викидах у 2023 р. становила 32,7 %, а також для Центрального ГЗК, де вапняк формує 44,9 – 50,3 % загального обсягу. Для Північного ГЗК цей ризик є мінімальним, частка вапняку не перевищує 0,6 %. Відповідно до матриці ризиків цей інцидент оцінюється як середній (I=2, B=3) і знижується до низького (I=1, B=2) після переходу до лабораторних коефіцієнтів рівня 3.

Другим методологічним ризиком є використання некоректних даних про діяльність для допоміжних матеріалів. На підприємствах відсутня налагоджена система збору та відкритого доступу до верифікованих первинних даних про діяльність. Практичним наслідком цієї проблеми є те, що будь-яка реальна зміна технологічного режиму або рецептури шихти призводить до систематичного відхилення результату від фактичного обсягу викидів. Показовим прикладом є Полтавський ГЗК, де у 2024 р. зафіксовано різке скорочення питомої витрати

вапняку у 5,7 рази, що є ознакою реальної зміни рецептури шихти, а не лише зниження обсягів виробництва. Ризик оцінюється як середній (I=2, B=3) і може бути знижений до низького лише шляхом налагодження повноцінної системи збору первинних даних, впровадження автоматизованого обліку витрати сировини з інтеграцією до корпоративних ERP-систем, а також забезпечення відкритого доступу до цих даних для цілей незалежного наукового моніторингу та верифікації CBAM-декларацій.

Третім методологічним ризиком є неврахування неповного окислення вуглецю утворення CO та CH_4 у відхідних газах замість CO_2. Метод M4 базується на припущенні про повне окислення всього вуглецю матеріальних потоків до CO_2. Відповідно до методологічних настанов МГЕЗК цей ефект є допустимим відхиленням у межах рівня точності 1 і оцінюється як низький ризик (I=1, B=2). У разі переходу до вищих рівнів точності врахування неповного окислення може здійснюватись через системи неперервних вимірювань викидів (CEMS).

Операційні ризики охоплюють усі можливі збої на етапах збору, передачі, обробки та зберігання первинних даних про діяльність. Аналіз охоплює чотири функціональні групи процесів: вимірювання витрати природного газу, вимірювання маси сировини та продукції, автоматизована реєстрація та передача даних, а також ручне введення і розрахунок. Операційні ризики поділено на 4 окремі групи.

Група 1. Вимірювання витрати природного газу. Природний газ є домінуючим матеріальним потоком на всіх трьох підприємствах, формуючи від 41,9 до 91,1 % загального обсягу викидів CO_2, що визначає особливо високу значущість ризиків, пов'язаних із засобами його обліку. Найбільш вагомим є ризик збою електропостачання комерційних лічильників газу середній рівень (I=1, B=5), результуючий показник 323 т CO_2 для Полтавського ГЗК та 57 т CO_2 для Центрального ГЗК. Заходами мінімізації є забезпечення незалежним резервним генератором та відновлення даних через рахунки-фактури постачальника, після чого ризик знижується до низького рівня 0,8 т CO_2 та 0,1 т CO_2 відповідно. Ризик несправності приладу обліку (I=2, B=4) 161 т CO_2 та 28 т CO_2, мінімізується резервним приладом і паралельним обліком, після контролю 8,1 т CO_2 та 1,4 т CO_2.

Ризики викрадення приладу (І=1, В=4) та порушення передачі даних (І=2, В=3) також класифікуються як середні і після застосування контрольних заходів знижуються до низького рівня.

Група 2. Вимірювання маси сировини та готової продукції. Ця група охоплює ризики, пов'язані з залізничними вагонними вагами, конвеєрними вагами та маркшейдерськими вимірюваннями залишків на складах. Ризик несправності приладу (І=2, В=4) середній, 161 т CO_2 на Полтавському ГЗК та 28 т CO_2 на Центральному ГЗК, після контролю низький. Ризик технічної помилки при ручній фіксації даних (людський фактор, І=2, В=3) середній, 32 т CO_2 та 6 т CO_2. Є характерним для всіх трьох підприємств, де первинні дані з вагових систем частково переносяться вручну. Мінімізується перевіркою даних відповідальною особою із співставленням із середньостатистичними показниками та перехресною перевіркою через рахунки-фактури. Після контролю низький рівень: 0,8 т CO_2 та 0,1 т CO_2.

Група 3. Автоматизована реєстрація та передача даних. Збій системи приймання або передачі даних, технічна несправність персонального комп'ютера (І=2, В=3) середній ризик, 32 т CO_2 та 6 т CO_2, після контролю низький: 0,1 – 2,8 т CO_2. Ризик зараження комп'ютера вірусом або порушення безпеки даних (І=1, В=3) низький. Ризик викрадення персонального комп'ютера з базою даних (І=1, В=4) середній, 81 т CO_2 та 14 т CO_2, після впровадження посиленої системи безпеки та резервного копіювання низький рівень.

Група 4. Ручне введення даних до розрахункового файлу та розрахунок. Це найбільш критична група. Помилки при внесенні даних про діяльність, НТЗ або вмісту вуглецю до файлу оцінюються як середній ризик 161 т CO_2 (І=2, В=4). На Центральному ГЗК аналогічний ризик є високим 1 133 т CO_2 (І=3, В=5), що пояснюється більшим обсягом ручних операцій і відсутністю автоматизованої передачі даних з вимірювальних систем. Після застосування контрольних заходів (перевірка двома особами, перехресна перевірка) на Полтавському ГЗК низький: 16,1 т CO_2, проте на Центральному ГЗК залишковий ризик залишається середнім 161 т CO_2 (І=2, В=4), що є найвищим залишковим ризиком серед усіх ідентифікованих інцидентів. Ризик неправильної обробки даних у розрахунках

(I=3, B=5) високий на Центральному ГЗК, 1 133 т CO_2, після перехресної перевірки двома особами низький: 2,8 т CO_2.

Таблиця 3.14

Зведена оцінка операційних ризиків досліджуваних підприємств

Група ризику	Інцидент	Рівень до контролю	Рівень після контролю
1	**2**	**3**	**4**
Вимірювання газу	Збій електропостачання лічильників	Середній	Низький
Вимірювання газу	Несправність приладу обліку	Середній	Низький
	Викрадення приладу обліку	Середній	Низький
	Порушення передачі даних	Середній	Низький
Вимірювання сировини	Несправність вагового обладнання	Середній	Низький
	Людський фактор при фіксації даних	Середній	Низький
	Викрадення приладу обліку	Середній	Низький
ІТ-системи	Технічна несправність ПК	Середній	Низький
	Зараження вірусом / злом даних	Низький	Низький
	Викрадення ПК з базою даних	Середній	Низький
Розрахунок	Помилки при введенні даних до файлу	Середній / Високий	Низький / Середній
	Пошкодження файлу (вірус, злом)	Середній / Високий	Низький
	Неправильна обробка даних у розрахунках	Середній / Високий	Низький
	Помилки при перенесенні даних до звіту	Середній	Низький
Коефіцієнти	Використання невірного коефіцієнта	Низький	Низький

Джерело: розроблено автором

Аналіз таблиці 3.14 засвідчує, що найвищі властиві ризики зосереджені не у сфері вимірювальної техніки, а у процесі ручного введення та обробки даних у середовищі MS Excel. Цей факт підкреслює пріоритетність автоматизації процесів збору та обробки первинних даних як найефективнішого заходу підвищення достовірності розрахунку викидів на всіх трьох підприємствах.

Регуляторні ризики безпосередньо пов'язані із запровадженням механізму CBAM та поступовою інтеграцією України до системи EU ETS у межах євроінтеграційних процесів [141]. CBAM передбачає нарахування вуглецевого збору на залізорудні окатиші, що експортуються до ЄС, виходячи із задекларованої питомої інтенсивності прямих викидів Scope 1. Ризик заниження викидів у CBAM-декларації (I=2, B=3) виникає внаслідок застосування нижчих рівнів точності або неповного врахування матеріальних потоків і класифікується як середній. Його наслідком є штрафні санкції та репутаційні втрати на ринку ЄС. Симетричним є ризик завищення викидів (I=2, B=3) через систематичне відхилення коефіцієнтів рівня 1 у бік переоцінки вмісту вуглецю, що збільшує вуглецеві зобов'язання і послаблює цінову конкурентоспроможність продукції. Обидва ризики після застосування заходів контролю (підвищення рівнів точності M4 та незалежної верифікації) знижуються до низького рівня (I=1, B=2).

Фінансовий вимір регуляторного ризику є суттєвим. Відповідно до галузевих оцінок, питома інтенсивність викидів при виробництві залізорудних окатишів становить 35 – 45 кг CO_2/т продукції. При ціні вуглецю 90 \$/т CO_2 CBAM-навантаження становить близько 3,2 – 4,1 \$/т окатишів, при 113 \$/т 4,0 – 5,1 \$/т. Для Полтавського ГЗК з виробничою потужністю 3,85 – 6,07 млн т/рік сукупне річне навантаження від CBAM може становити 12 – 31 млн \$ залежно від обсягів експорту та ціни вуглецю. Заниження викидів у декларації тягне штрафні санкції та репутаційні втрати, тоді як завищення збільшує вуглецеві зобов'язання і послаблює конкурентні позиції на ринку ЄС. Це надає методологічній точності розрахунків безпосереднього економічного виміру і робить систему моніторингу стратегічно важливим інструментом управління конкурентоспроможністю підприємств в умовах євроінтеграції. З огляду на виявлені ризики для підвищення точності та регуляторної надійності системи моніторингу на досліджуваних підприємствах доцільним є: перехід до коефіцієнтів вмісту вуглецю рівня точності 3 на основі лабораторних аналізів для всіх значних потоків методу M4, насамперед для вапняку на Полтавському та Центральному ГЗК; впровадження автоматизованого збору первинних даних про діяльність з інтеграцією до корпоративних ERP-систем замість ручного введення до таблиць Excel;

забезпечення окремої від МЗВ процедури верифікації даних для цілей CBAM-декларування; поступовий перехід до інструментів звітності, сумісних з вимогами EU ETS. Реалізація зазначених заходів дозволить знизити рівень усіх ідентифікованих ризиків до низького і забезпечить відповідність системи МЗВ підприємств вимогам європейського вуглецевого регулювання.

3.5. Таксономічна та просторова структура буферних екосистем досліджуваних об'єктів

Санітарно-захисні зони гірничо-збагачувальних комбінатів є складними природно-антропогенними системами, що формуються на межі промислових майданчиків та суміжних природних і напівприродних територій. В екологічній науці СЗЗ розглядаються як буферні зони, тобто території, що просторово відокремлюють джерело антропогенного впливу від об'єктів захисту та виконують різноманітні стабілізуючі функції, зокрема вуглепоглинальну [5]. Оцінка вуглепоглинальної здатності таких зон є необхідною складовою комплексного аналізу вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, оскільки деревно-чагарникова рослинність СЗЗ безпосередньо бере участь у поглинанні та депонуванні вуглецю, що генерується виробничою діяльністю ГЗК.

Нормативну основу визначення меж СЗЗ складають Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів (ДСП-173-96, у редакції наказу МОЗ України № 40 від 13.01.2026 р., зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 05.02.2026 р. за № 165/45559), відповідно до яких підприємства з видобутку та збагачення залізної руди відносяться до I класу шкідливості з мінімальною шириною СЗЗ 1 000 м. Відповідно до п. 5.13 ДСП-173-96, мінімальна площа озеленення СЗЗ для зон шириною від 300 до 1 000 м становить не менше 50 % загальної площі зони, з обов'язковим формуванням смуги дерево-чагарникових насаджень шириною не менше 50 м з боку сельбищної території [142]. Просторові межі СЗЗ кожного підприємства визначені як нормативний буфер 1 000 м навколо виробничого майданчика у середовищі ГІС. Саме нормативна межа 1 000 м визначає просторові рамки оцінки вуглепоглинального потенціалу у

цьому дослідженні та забезпечує порівнянність результатів між трьома підприємствами незалежно від фактичних розмірів їх виробничих майданчиків.

Просторову структуру буферних екосистем визначено методом дистанційного зондування Землі з використанням мультиспектральних знімків супутника Sentinel-2 із просторовим розрізненням 10 м на піксель. Класифікацію земного покриву здійснено методом Random Forest з використанням бібліотеки Orfeo ToolBox із виділенням шести категорій: ліси (клас 1), чагарники (клас 2), трави (клас 3), оголений ґрунт (клас 4), забудова (клас 5) та водні об'єкти (клас 6) [143, 144]. До аналізу залучено п'ять спектральних каналів Sentinel-2: B02 (Blue), B03 (Green), B04 (Red), B08 (NIR) та B11 (SWIR). Зональна статистика площ розраховувалась у середовищі геоінформаційних систем.

ПрАТ «Полтавський ГЗК» охоплює загальну площу 11 269,60 га. Структура земного покриву характеризується домінуванням оголеного ґрунту – 5 647,95 га (50,1 %), що відповідає площам кар'єрів, відвалів та хвостосховища. Травостій займає 3 465,28 га (30,7 %), водні об'єкти – 644,31 га (5,7 %), забудова – 614,25 га (5,5 %). Деревна та чагарникова рослинність представлена лісами – 777,57 га (6,9 %) та чагарниками – 120,24 га (1,1 %). Їх сукупна площа становить 897,81 га, або 8,0 % загальної площі СЗЗ (рис. 3.7).

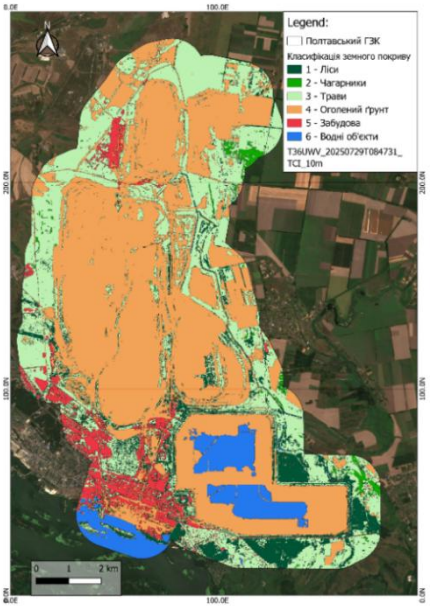


Рис. 3.7. Структура земного покриву ПрАТ «Полтавський ГЗК» за даними класифікації Sentinel-2 (джерело: розроблено автором на основі класифікації Sentinel-2)

СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» є найбільшою серед трьох досліджуваних об'єктів і охоплює 28 637,53 га. До її складу включено кілька просторово відокремлених виробничих ділянок підприємства, розташованих у різних частинах Криворізько-Кременчуцького рудного поясу. Структура земного покриву характеризується приблизно рівними частками оголеного ґрунту 9 135,66 га (31,9 %) та трав'яного покриву – 8 855,86 га (30,9 %). Деревно-чагарниковий покрив є найбільш розвиненим серед усіх трьох підприємств: ліси займають 2 644,72 га (9,2 %), чагарники – 6 360,54 га (22,2 %), що у сукупності становить 9 005,26 га, або 31,4 % загальної площі. Забудова – 986,61 га (3,4 %), водні об'єкти – 654,14 га (2,3 %) (рис. 3.8).

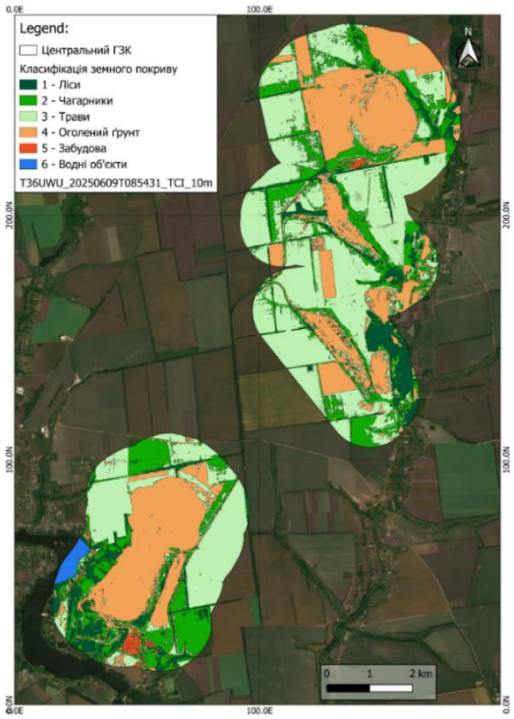


Рис. 3.8. Структура земного покриву санітарно-захисної зони ПрАТ «Центральний ГЗК» за даними класифікації Sentinel-2 (джерело: розроблено автором на основі зональної статистики Sentinel-2)

СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» охоплює 10 890,10 га. Структура земного покриву характеризується домінуванням оголеного ґрунту – 4 470,67 га (41,1 %), що відповідає значним площам хвостосховищ та розкривних відвалів. Деревно-чагарниковий покрив є другим за значущістю після Центрального ГЗК: ліси – 1 056,35 га (9,7 %), чагарники – 2 407,51 га (22,1 %), у сукупності 3 463,86 га

(31,8 %). Трави займають 2 392,78 га (22,0 %), водні об'єкти – 341,96 га (3,1 %), забудова – 220,83 га (2,0 %) (рис. 3.9).

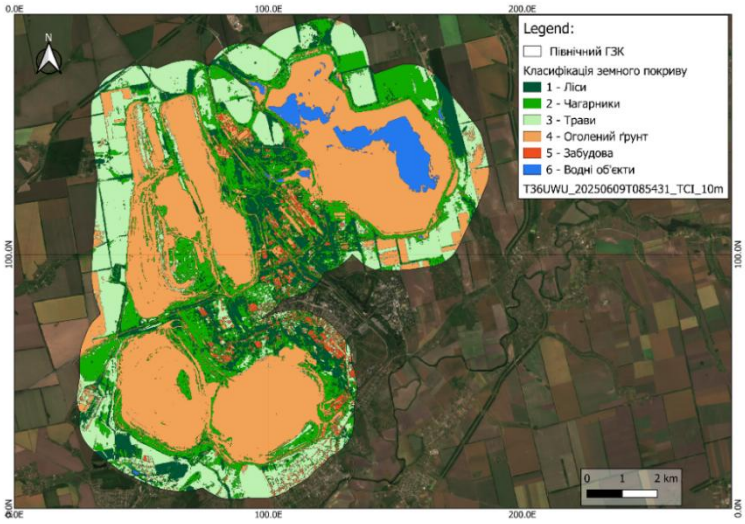


Рис. 3.9. Структура земного покриву санітарно-захисної зони ПрАТ «Північний ГЗК» за даними класифікації Sentinel-2 (джерело: розроблено автором на основі зональної статистики Sentinel-2)

Зведену кількісну характеристику структури земного покриву санітарно-захисних зон усіх трьох досліджуваних підприємств наведено у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15

Структура земного покриву буферних екосистем досліджуваних підприємств

Клас земного покриву	Полтавський ГЗК		Центральний ГЗК		Північний ГЗК	
	га	%	га	%	га	%
Ліси	777,57	6,9	2 644,72	9,2	1 056,35	9,7
Чагарники	120,24	1,1	6 360,54	22,2	2 407,51	22,1
Трави	3 465,28	30,7	8 855,86	30,9	2 392,78	22,0
Оголений ґрунт	5 647,95	50,1	9 135,66	31,9	4 470,67	41,1
Забудова	614,25	5,5	986,61	3,4	220,83	2,0
Водні об'єкти	644,31	5,7	654,14	2,3	341,96	3,1
Разом	**11 269,60**	**100**	**28 637,53**	**100**	**10 890,10**	**100**
у т.ч. деревно-чагарниковий (1+2)	**897,81**	**8,0**	**9 005,26**	**31,4**	**3 463,86**	**31,8**

Джерело: розраховано автором за даними зональної статистики на основі класифікації Sentinel-2

Порівняльний аналіз структури земного покриву трьох досліджуваних об'єктів виявляє принципову відмінність за часткою деревно-чагарникового компоненту. Полтавський ГЗК суттєво відрізняється від двох інших підприємств, його деревно-чагарниковий покрив становить лише 8,0 % проти 31,4 % на Центральному та 31,8 % на Північному ГЗК. Ця відмінність пояснюється насамперед природно-географічним контекстом, адже незважаючи на розташування Полтавського ГЗК у межах лісостепової природно-кліматичної зони, деревно-чагарниковий покрив його СЗЗ має фрагментарний характер і переважно приурочений до заплавних та локально зволожених ділянок. Натомість у СЗЗ Центрального та Північного ГЗК, розташованих у степовій зоні, сформувалися значні за площею штучні захисні насадження.

Таксономічна структура деревно-чагарникового покриву буферних екосистем досліджуваних підприємств охарактеризована на основі регіональної типології захисних насаджень степової та лісостепової зон України [145]. Штучні насадження СЗЗ гірничо-збагачувальних комбінатів, закладені переважно у 1960 – 1980-х роках та формуються типовим для промислових об'єктів степового регіону асортиментом газо- та пилостійких деревних порід. Відповідно до досліджень, домінуючими видами штучних насаджень є робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.) та тополя чорна (*Populus nigra* L.), що у сукупності формують основу захисних смуг по периметру виробничих майданчиків. Як супутні породи широко представлені тополя біла (*Populus alba* L.), ясен ланцетолистий (*Fraxinus lanceolata* Borkh.), в'яз дрібнолистий (*Ulmus pumila* L.), маслинка вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.) та гледичія триколючкова (*Gleditsia triacanthos* L.). Для Центрального та Північного ГЗК, розташованих у межах Криворізького залізорудного басейну, характерна наявність байракових лісів із участю дуба черешчатого (*Quercus robur* L.), клена гостролистого (*Acer platanoides* L.), ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) та липи серцелистої (*Tilia cordata* Mill.) як едифікаторів природних угруповань. На Полтавському ГЗК природна деревна рослинність представлена переважно заплавними угрупованнями вздовж річок Ворскли та Дніпра з домінуванням верби білої (*Salix alba* L.) та вільхи клейкої (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Зведену таксономічну

характеристику деревно-чагарникового покриву за категоріями насаджень та підприємствами наведено у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16

Типологічна таксономічна характеристика деревно-чагарникового покриву буферних екосистем досліджуваних підприємств

Підприємство / природно-географічна зона	Категорія насаджень	Характерні деревні та чагарникові види
Полтавський ГЗК (Полтавська обл.)	Штучні насадження СЗЗ (домінанти)	Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.), тополя чорна (*Populus nigra* L.), тополя біла (*Populus alba* L.)
	Штучні насадження СЗЗ (супутні)	Ясен ланцетолистий (*Fraxinus lanceolata* Borkh.), в'яз дрібнолистий (*Ulmus pumila* L.), маслинка вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.), гледичія триколючкова (*Gleditsia triacanthos* L.)
	Прилеглі екосистеми (заплавні)	Верба біла (*Salix alba* L.), тополя біла (*Populus alba* L.), вільха клейка (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)
Центральний ГЗК (Дніпропетровська обл.)	Штучні насадження СЗЗ (домінанти)	Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.), в'яз дрібнолистий (*Ulmus pumila* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.), тополя чорна (*Populus nigra* L.)
	Штучні насадження СЗЗ (супутні)	Маслинка вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.), гледичія триколючкова (*Gleditsia triacanthos* L.), ясен ланцетолистий (*Fraxinus lanceolata* Borkh.)
	Прилеглі екосистеми (байракові)	Дуб звичайний (*Quercus robur* L.), клен гостролистий (*Acer platanoides* L.), ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.), липа серцелиста (*Tilia cordata* Mill.)
Північний ГЗК (Дніпропетровська обл.)	Штучні насадження СЗЗ (домінанти)	Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L.), в'яз дрібнолистий (*Ulmus pumila* L.), клен ясенелистий (*Acer negundo* L.)
	Штучні насадження СЗЗ (супутні)	Маслинка вузьколиста (*Elaeagnus angustifolia* L.), тополя чорна (*Populus nigra* L.), гледичія триколючкова (*Gleditsia triacanthos* L.)
	Прилеглі екосистеми (байракові)	Дуб звичайний (*Quercus robur* L.), клен гостролистий (*Acer platanoides* L.), ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.), граб звичайний (*Carpinus betulus* L.)

Джерело: розроблено автором

Аналіз таблиці 3.16 засвідчує, що попри спільний домінантний вид робінію звичайну (*Robinia pseudoacacia* L.) на всіх трьох підприємствах, склад прилеглих

природних екосистем принципово відрізняється: Центральний та Північний ГЗК мають байракові ліси з едифікаторами дубом звичайним (*Quercus robur* L.) та ясенем звичайним (*Fraxinus excelsior* L.), тоді як Полтавський ГЗК заплавні угруповання з вербою білою (*Salix alba* L.) та вільхою клейкою (*Alnus glutinosa* L.). Ця відмінність безпосередньо визначає різний секвестраційний потенціал природного компоненту буферних екосистем. Вікова структура штучних насаджень СЗЗ трьох підприємств є подібною і перебуває у стані зрілого або перестійного насадження. Це є одночасно чинником їх відносно значного вуглецевого депо, нагромадженого за десятиліття вегетації, і потенційним ризиком поступового зниження інтенсивності секвестрації у зв'язку зі сповільненням приросту у перестійних деревостанах. Прилеглі природні екосистеми представлені різновіковими угрупованнями з більш широким діапазоном вікових класів, від молодих самосівних угруповань на рекультивованих ділянках до стиглих байракових лісів. Таксономічний склад та вікова структура насаджень є вихідними параметрами для вибору алометричних коефіцієнтів Лакиди П.І. у подальших розрахунках вуглецевого депо та річної секвестрації.

Таким чином, просторова та таксономічна структура буферних екосистем трьох досліджуваних підприємств формує принципово різний вихідний потенціал вуглепоглинання, що потребує диференційованого підходу до оцінки та моделювання секвестрації у наступних підрозділах.

3.6. Оцінка вуглецевого депо буферних екосистем

Встановлена у підрозділі 3.5 просторова структура деревно-чагарникового покриву СЗЗ є основою для кількісної оцінки вуглецевого депо. Вуглецеве депо СЗЗ представляє сукупну масу вуглецю, що акумульована у різних компонентах екосистеми на момент обліку, надземній фітомасі дерев і чагарників, підземній фітомасі (кореневих системах), підстилці та ґрунтовому органічному вуглеці [146]. У межах цього дослідження як пріоритетний компонент вуглецевого депо визначено надземну та підземну фітомасу деревно-чагарникового покриву, оскільки саме вона формує найбільш динамічну та просторово диференційовану

частку загального депо і безпосередньо визначається характеристиками рослинного покриву.

Вихідні дані для розрахунку отримано шляхом мультитемпорального аналізу знімків Sentinel-2 за трьома фенологічними фазами: весна (квітень), початок літа (червень-липень, максимум листкового покриву) та осінь (вересень) [147, 148]. Зональна статистика розраховувалась по всій площі СЗЗ (включаючи всі класи земного покриву). Для розрахунку вуглецевого депо використано значення NDVI піку вегетаційного сезону – червень для Центрального та Північного ГЗК, липень для Полтавського ГЗК (табл.3.17).

Таблиця 3.17

Зональна статистика вегетаційних індексів СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК»

Індекс	Дата зйомки	Середнє	Медіана	Ст. відх.	Мін.	Макс.
NDVI	20.04.2025 р.	0,1813	0,1491	0,1556	-0,2445	0,6656
NDVI	09.06.2025 р.	0,2301	0,2420	0,1754	-0,1543	0,6835
NDVI	05.09.2025 р.	0,1462	0,1227	0,1284	-0,1885	0,6324
SAVI	20.04.2025 р.	0,1142	0,0860	0,1076	-0,1926	0,5747
SAVI	09.06.2025 р.	0,1522	0,1520	0,1218	-0,1426	0,6120
SAVI	05.09.2025 р.	0,0895	0,0738	0,0814	-0,1215	0,5211
IRECI	20.04.2025 р.	0,1129	0,0622	0,1513	-0,2336	1,1645
IRECI	09.06.2025 р.	0,1731	0,1370	0,1660	-0,1354	1,3967
IRECI	05.09.2025 р.	0,0739	0,0467	0,0834	-0,1808	0,9282

Джерело: розраховано автором за даними Sentinel-2

Просторовий розподіл вегетаційних індексів NDVI, SAVI та IRECI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» за трьома фенологічними фазами вегетаційного сезону 2025 р. весна (20.04), пік вегетації (09.06) та осінь (05.09) наведено на рис. 3.10. – 3.18. Просторовий розподіл значень індексів відображає контрастність між активно вегетуючим деревно-чагарниковим покривом захисних смуг СЗЗ та невегетуючими поверхнями промислових об'єктів (кар'єри, відвали, хвостосховища).

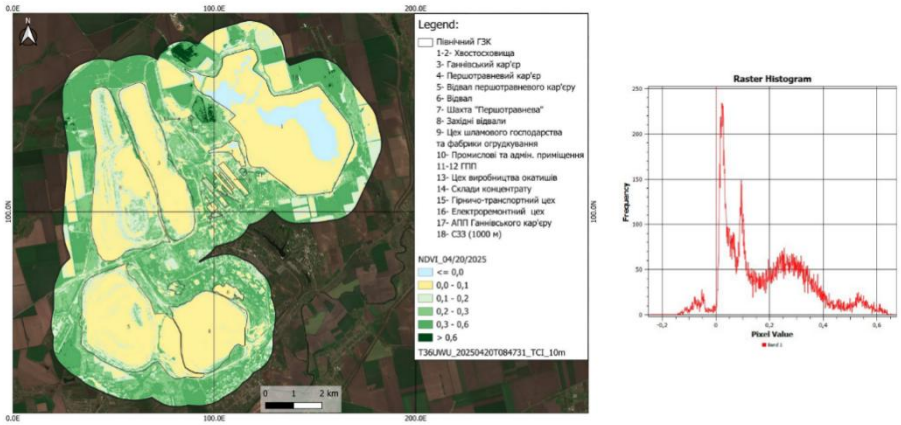


Рис. 3.10. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Як видно з рисунку 3.10. навесні домінує клас NDVI 0,2-0,3 (світло-зелений), що відповідає початковій фазі розгортання листкового пологу. Ділянки з NDVI > 0,6 локалізовані переважно вздовж захисних смуг по периметру виробничих майданчиків та в заплавних зонах, тоді як кар'єрні та відвальні поверхні стабільно утримують NDVI < 0,1.

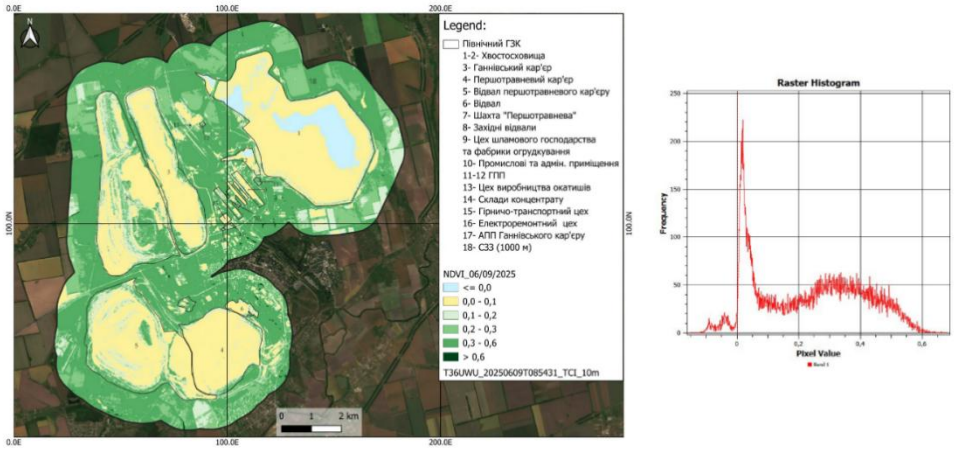


Рис. 3.11. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковій фазі вегетації частка пікселів з NDVI > 0,3 суттєво зростає порівняно з весняним знімком, гістограма набуває виразного двомодального характеру з чітким розділенням невегетуючих (NDVI < 0,1, оголений ґрунт кар'єрів

та хвостосховищ) та активно вегетуючих (NDVI 0,3-0,5, деревно-чагарниковий покрив СЗЗ) класів; саме це значення NDVI використано як вихідне для розрахунку вуглецевого депо.

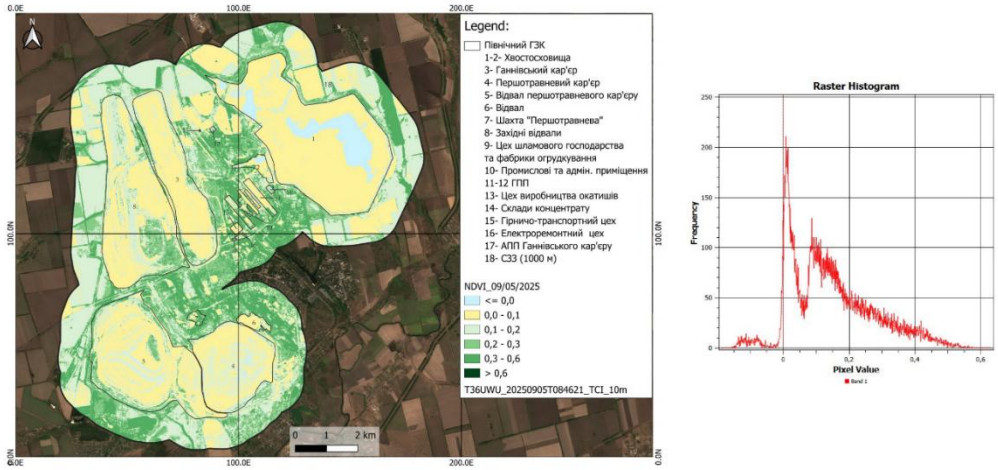


Рис. 3.12. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Восени спостерігається загальне зниження NDVI та звуження правого хвоста гістограми, що відображає початок пожовтіння листя. Просторова структура розподілу при цьому зберігається, захисні смуги залишаються візуально виділеними на тлі промислових поверхонь, підтверджуючи стійкість деревно-чагарникового покриву СЗЗ протягом усього вегетаційного сезону.

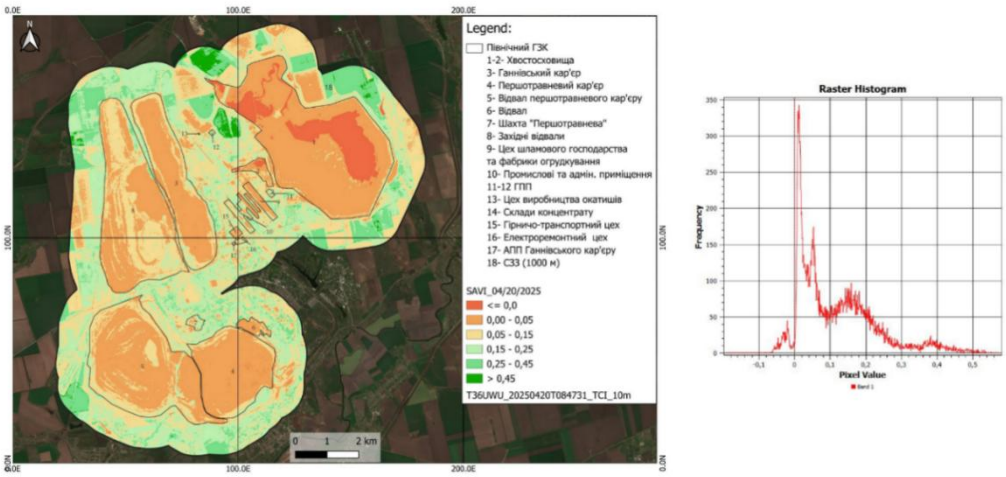


Рис. 3.13. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл SAVI відтворює просторову структуру NDVI з поправкою на вплив оголеного ґрунту. Знижені значення індексу на кар'єрних та відвальних ділянках демонструють, що без корекції на ґрунтовий фон спектральний сигнал рослинності на промислових майданчиках суттєво занижується.

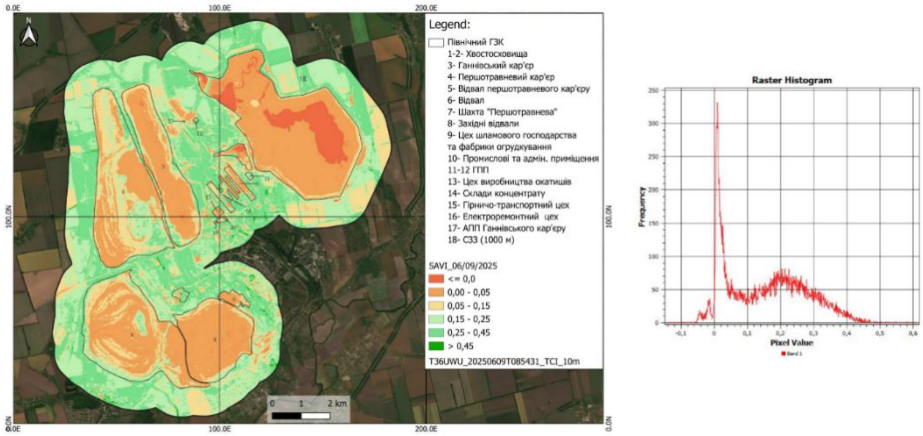


Рис. 3.14. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У червні значення SAVI 0,15-0,25 охоплюють більшість вегетуючих ділянок СЗЗ, що відповідає помірній щільності листкового пологу зрілих листяних насаджень степово-лісостепової зони; порівняно з NDVI гістограма SAVI є більш симетричною, що свідчить про ефективну корекцію ґрунтового фону.

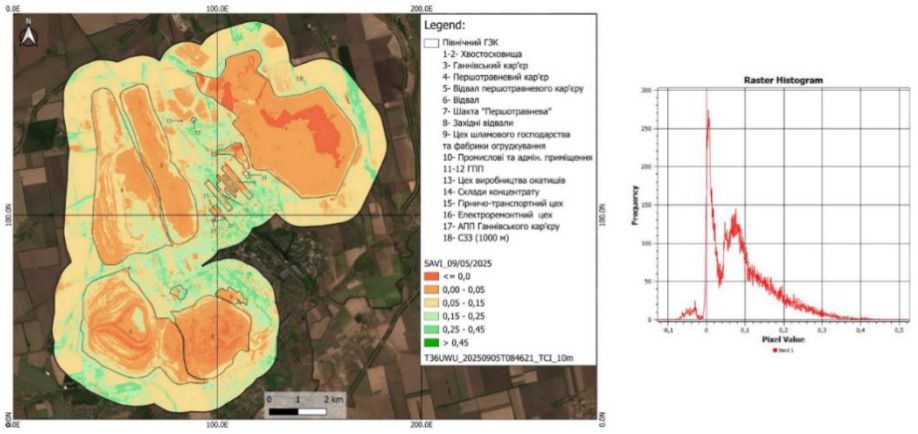


Рис. 3.15. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження SAVI є більш вираженим, ніж у NDVI, що пояснюється підвищеною чутливістю індексу до зменшення вологості листя в кінці вегетаційного сезону; захисні смуги по периметру хвостосховища при цьому зберігають відносно вищі значення порівняно з кар'єрними ділянками.

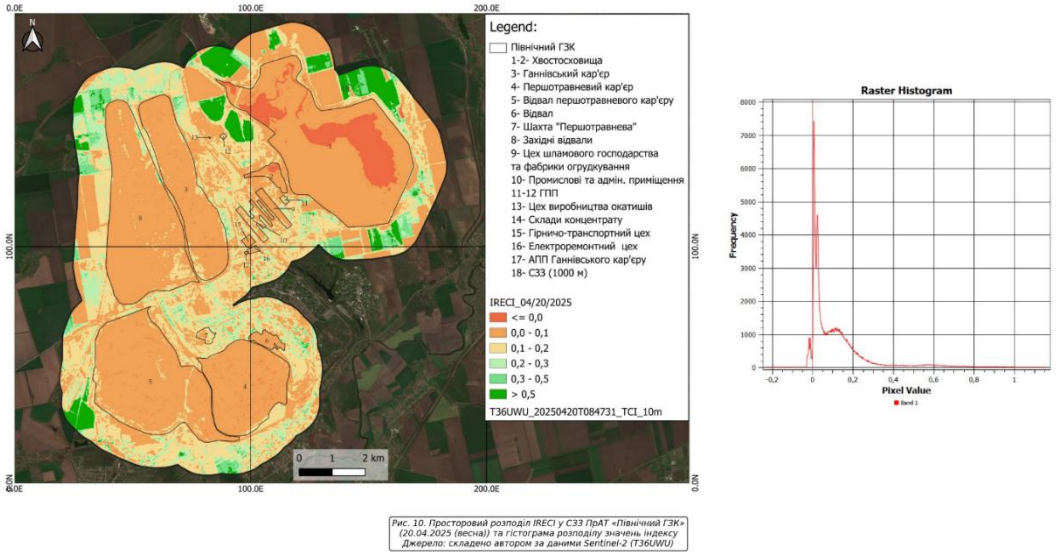


Рис. 3.16. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Навесні значення IRECI переважно не перевищують 0,2, а гістограма відображає низьку концентрацію хлорофілу на початку вегетації та підтверджує, що червоний край спектру є більш чутливим до фенологічної фази, ніж NDVI.

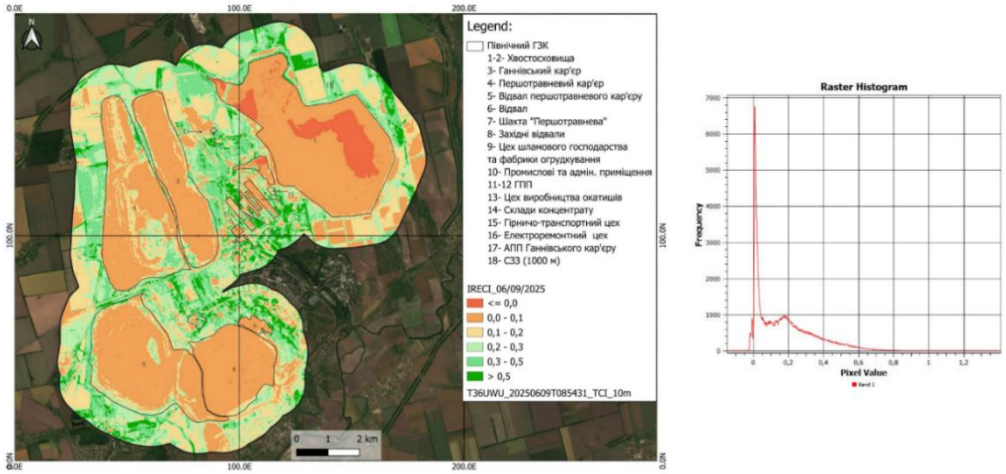


Рис. 3.17. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковий місяць ділянки з IRECI > 0,5 (темно-зелені) чітко окреслюють захисні смуги по периметру СЗЗ та заплавні деревостани, що вказує на найвищу фотосинтетичну активність та найкращий фізіологічний стан насаджень саме у цих зонах. Максимальне значення IRECI = 1,40 зафіксоване на ділянках з найбільш розвиненим деревостаном.

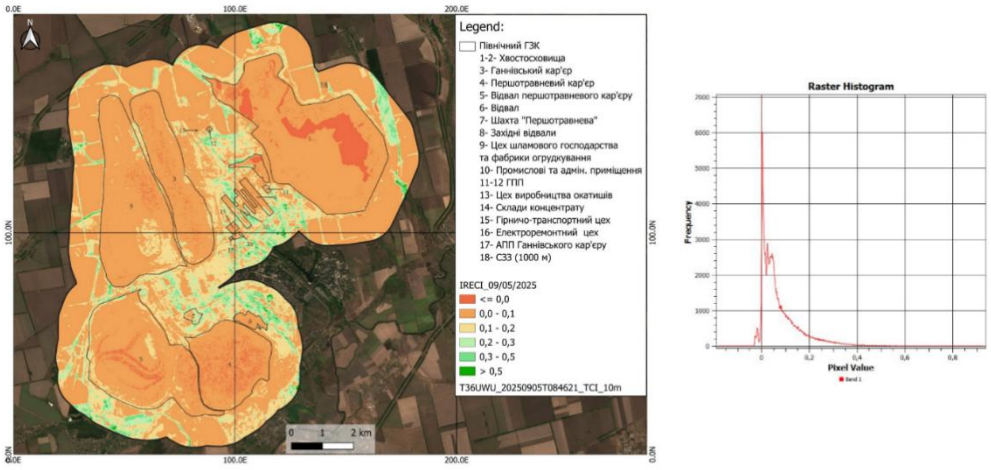


Рис. 3.18. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Північний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження IRECI є найбільш різким серед трьох індексів. Гістограма відображає швидке руйнування хлорофілу в листі при підготовці до листопаду і підтверджує, що IRECI є найчутливішим індикатором фенологічного стану деревостанів серед використаних у дослідженні вегетаційних індексів.

Принципово відмінну картину просторового розподілу вегетаційних індексів демонструє СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК», розташованого в степовій зоні Полтавської та Кіровоградської областей. На відміну від Північного ГЗК, де деревно-чагарниковий покрив займає 31,8 % площі СЗЗ і формує виразний просторовий контраст з промисловими поверхнями, частка деревно-чагарникового покриву Полтавського ГЗК становить лише 8,0 %, що безпосередньо відображається на значеннях і динаміці вегетаційних індексів. Результати зональної статистики вегетаційних індексів СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» за вегетаційний сезон 2025 р. наведено у таблиці 3.18.

Таблиця 3.18

Зональна статистика вегетаційних індексів СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК»

Індекс	Дата зйомки	Середнє	Медіана	Ст. відх.	Мін.	Макс.
NDVI	28.04.2025 р.	0,1627	0,1283	0,1576	-0,1902	0,6911
NDVI	29.07.2025 р.	0,1625	0,1327	0,1547	-0,1893	0,6815
NDVI	25.09.2025 р.	0,1577	0,1414	0,1434	-0,3526	0,6526
SAVI	28.04.2025 р.	0,1054	0,0781	0,1065	-0,0936	0,7629
SAVI	29.07.2025р.	0,1064	0,0868	0,1045	-0,1050	0,6161
SAVI	25.09.2025 р.	0,0975	0,0849	0,0904	-0,5051	0,7642
IRECI	28.04.2025 р.	0,0932	0,0478	0,1216	-0,0648	1,2207
IRECI	29.07.2025 р.	0,1114	0,0691	0,1277	-0,0552	1,6125
IRECI	25.09.2025 р.	0,0772	0,0519	0,0837	-0,1982	1,1127

Джерело: розраховано автором за даними Sentinel-2

Просторовий розподіл вегетаційних індексів NDVI, SAVI та IRECI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» за трьома фенологічними фазами вегетаційного сезону 2025 р. наведено на рис. 3.19. – 3.27. На відміну від Північного ГЗК, де гістограми розподілу мають виражений двомодальний характер із чітким розділенням вегетуючих та невегетуючих класів, для Полтавського ГЗК очікується переважання одномодального розподілу зі зміщенням до низьких значень індексів, що є прямим наслідком домінування оголеного ґрунту (50,1 % площі СЗЗ) та мінімальної частки деревно-чагарникового покриву.

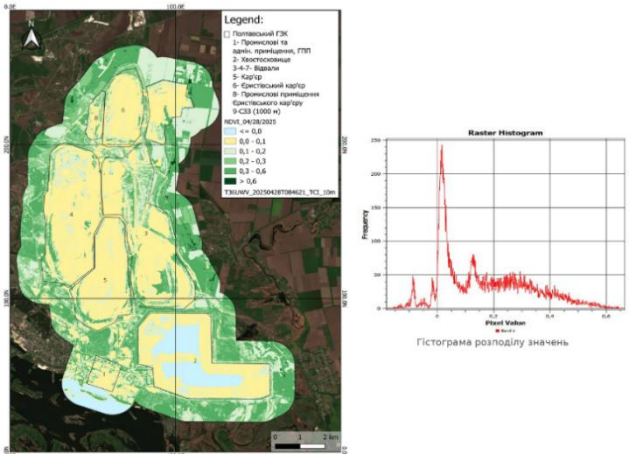
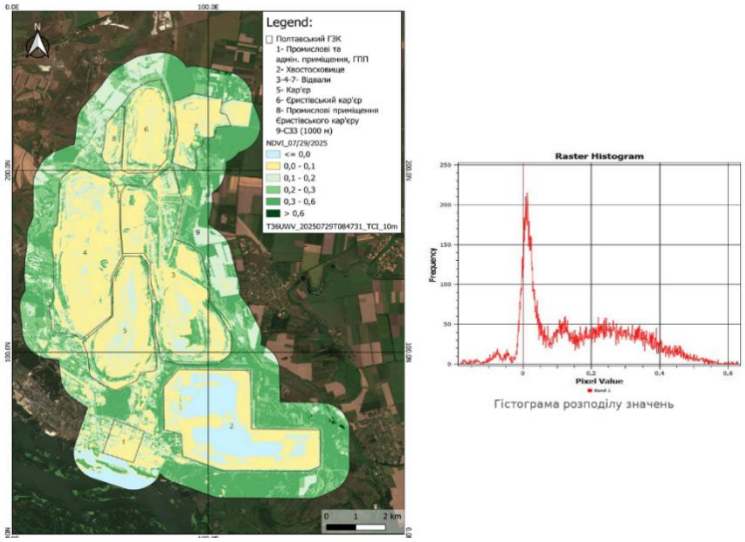


Рис. 3.19. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (28.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» характеризується домінуванням класу 0,0-0,1 (жовтий), що охоплює переважну частину площі СЗЗ і відображає масштабне поширення оголеного ґрунту на відвалах, кар'єрних майданчиках та хвостосховищі (зона 2). Пікселі з NDVI > 0,3 локалізовані переважно вздовж зовнішнього периметру СЗЗ (зона 9) та фрагментарно вздовж берегових смуг річки Ворскли і Дніпра у південній частині зони. Середнє значення NDVI 0,1627 при медіані 0,1283 свідчить про суттєву позитивну асиметрію розподілу і підтверджує, що більшість пікселів СЗЗ перебуває в зоні слабкої або відсутньої вегетації.



Гістограма розподілу значень

Рис. 3.20. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (29.07.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковий місяць вегетаційного сезону просторова структура розподілу NDVI залишається принципово подібною до весняної, що є визначальною відмінністю Полтавського ГЗК від Центрального та Північного. Сезонна амплітуда NDVI становить лише 0,0050 одиниці (0,1627 у квітні проти 0,1625 у липні), тоді як для двох інших підприємств амплітуда сягає 0,0839-0,0847. Ділянки з NDVI > 0,3 (світло- та темно-зелені пікселі) залишаються просторово фрагментованими. Зона хвостосховища (2) та відвали (3, 4, 7) стабільно утримують NDVI < 0,1.

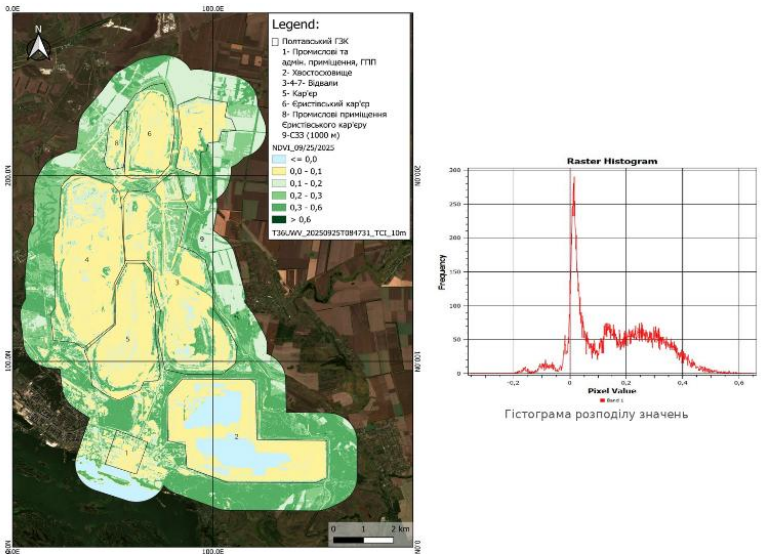


Рис. 3.21. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (25.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Восени значення зонального середнього NDVI незначно знижується до 0,1577 при одночасному зростанні медіани до 0,1414, що свідчить про незначне вирівнювання розподілу, скорочення кількості як найнижчих (оголений ґрунт влітку після зволоження), так і найвищих значень. Просторова структура карти залишається стабільною, захисні смуги вздовж периметру зони та заплавні ділянки зберігають відносно вищі значення NDVI на тлі промислових поверхонь, однак загальний фон СЗЗ продовжує домінувати класами 0,0-0,2.

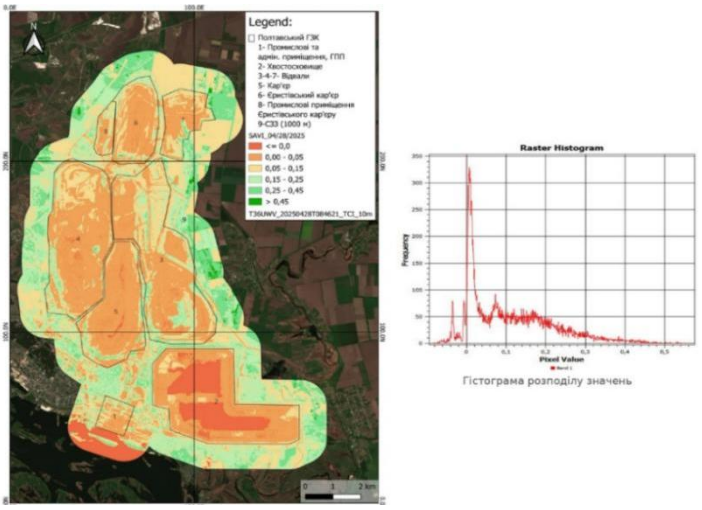


Рис. 3.22. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (28.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл SAVI відтворює просторову структуру NDVI з характерною поправкою на вплив оголеного ґрунту. Значення індексу у зонах кар'єрних майданчиків і хвостосховища (зона 2) суттєво знижуються порівняно з NDVI, оскільки SAVI зі стандартним коефіцієнтом L = 0,5 ефективно пригнічує спектральний внесок яскравого мінерального субстрату залізорудних відходів. Гістограма свідчить про ефективну корекцію ґрунтового фону. Пікселі з SAVI > 0,25 просторово співпадають з ділянками з NDVI > 0,3 і так само локалізовані переважно вздовж зовнішнього буферу СЗЗ та заплавних зон. У центральній частині промислового майданчика SAVI стабільно не перевищує 0,05. Порівняно з Північним ГЗК, де корекція ґрунтового фону через SAVI суттєво поліпшує виділення рослинності на кар'єрних ділянках, для Полтавського ГЗК ефект SAVI є менш диференціюючим через рівномірно низьку вегетацію по всій площі СЗЗ.

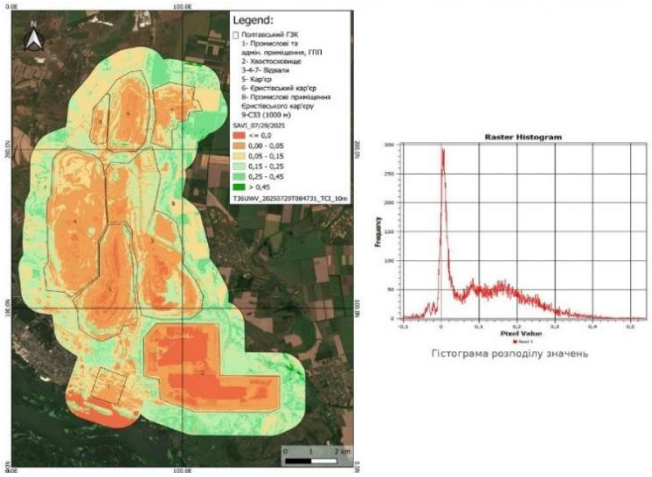
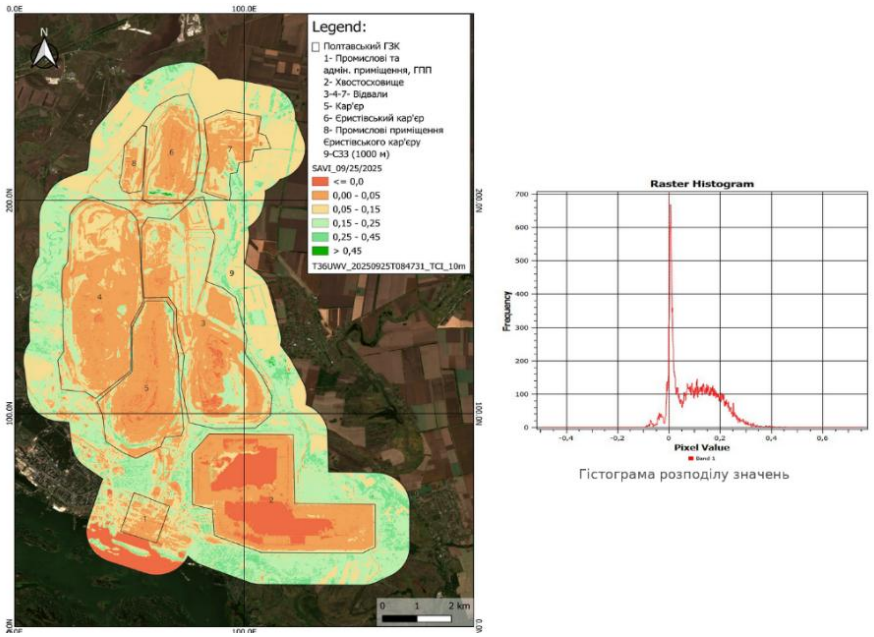


Рис. 3.23. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (29.07.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Літній розподіл SAVI характеризується незначним зростанням зонального середнього до 0,1064 (проти 0,1054 навесні), що фактично знаходиться в межах стандартного відхилення і не свідчить про статистично значущу сезонну динаміку. Просторово ділянки з SAVI 0,15-0,25 дещо розширились у зоні захисних смуг по периметру відвалів (зони 3, 4, 7) та вздовж річкових долин. Рівномірно низькі значення SAVI на значній частині площі СЗЗ додатково підтверджують обмеженість деревно-чагарникового покриву як джерела секвестраційного

потенціалу і обґрунтовують необхідність розширення площі насаджень СЗЗ як пріоритетного заходу підвищення вуглецево-компенсаційного потенціалу підприємства.



Гістограма розподілу значень

Рис. 3.24. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (25.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження SAVI є помірним, зональне середнє зменшується до 0,0975, медіана до 0,0849, що відображає загальне скорочення листкового покриву у вересні. Порівняно з NDVI, осіннє зниження SAVI є відносно більш вираженим, що пояснюється підвищеною чутливістю індексу до зменшення вмісту вологи в листі при підготовці до листопаду аналогічна закономірність спостерігається і для Північного ГЗК. Просторово зони з SAVI > 0,15 стискаються переважно до заплавних ділянок у південній частині СЗЗ та фрагментів захисних смуг по периметру, тоді як більша частина площі переходить до класу 0,00-0,05. Хвостосховище (зона 2) і кар'єрні поверхні залишаються стабільно в зоні ≤ 0,0. Мінімальне осіннє значення SAVI = -0,5051 є аномальним і може відображати вплив вологих поверхонь хвостосховища або ефекти атмосферної корекції на окремих пікселях, що підтверджується значним стандартним відхиленням 0,0904 при медіані 0,0849.

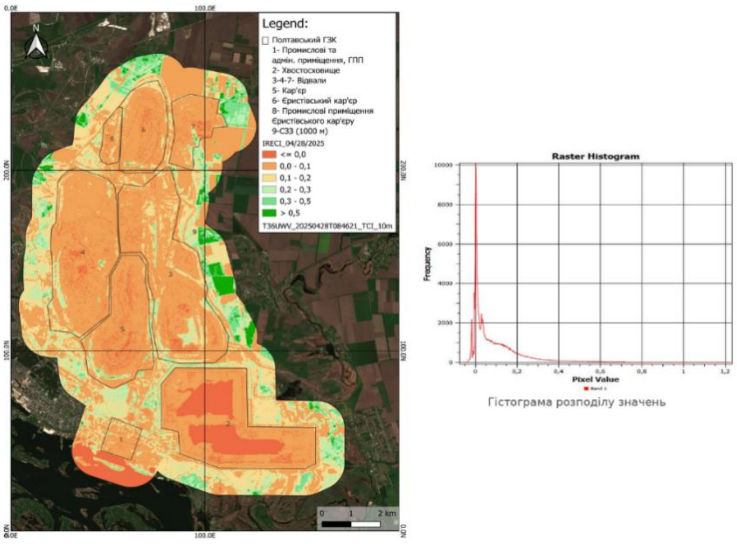


Рис. 3.25. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (28.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл IRECI у СЗЗ Полтавського ГЗК характеризується надзвичайно концентрованим лівим піком гістограми у діапазоні 0,00-0,05 при середньому значенні 0,0932 і медіані 0,0478. На карті ділянки з IRECI > 0,3 відсутні або представлені поодинокими пікселями, на відміну від Північного ГЗК, де вже навесні захисні смуги формують виразні смуги підвищених значень. Низькі весняні значення IRECI підтверджують мінімальну концентрацію хлорофілу в початковій фазі вегетації та свідчать про відсутність статистично значущого сигналу хлорофілу на рівні зональної статистики по всій площі СЗЗ.

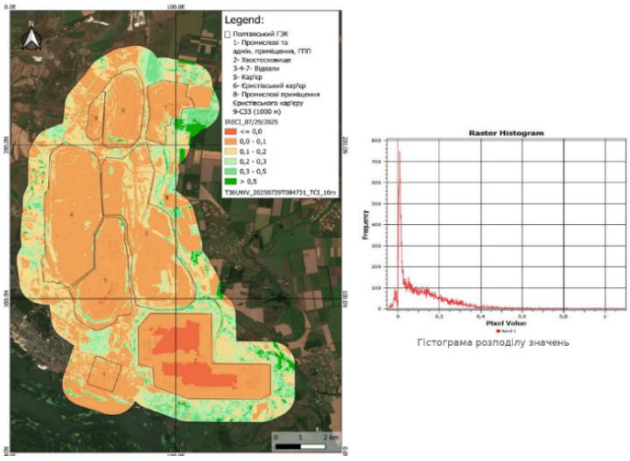
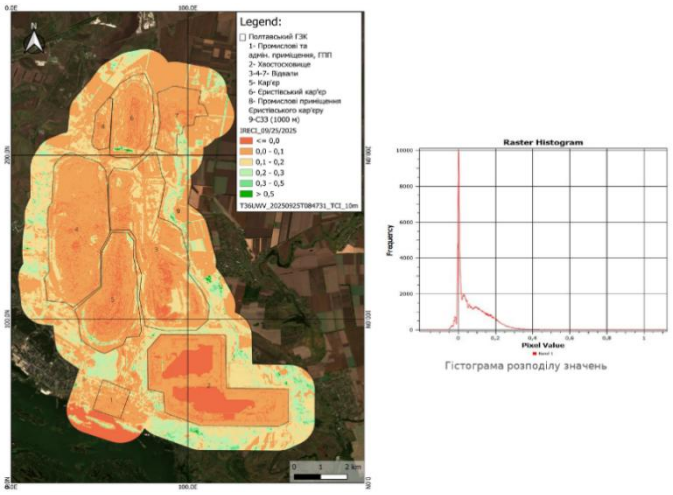


Рис. 3.26. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (29.07.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковий місяць вегетаційного сезону IRECI демонструє найбільше абсолютне зростання серед трьох індексів: середнє збільшується з 0,0932 до 0,1114, максимальне значення досягає 1,6125, найвищого серед усіх дат і індексів для Полтавського ГЗК. Просторово ділянки з IRECI > 0,5 локалізовані у заплавних зонах річок. Промислові поверхні (кар'єр 5, хвостосховище 2, відвали 3, 4, 7) залишаються в зоні IRECI ≤ 0,1. Ця просторова диференціація підтверджує, що IRECI є чутливішим до локальних концентрацій хлорофілу, ніж NDVI чи SAVI, і може слугувати більш точним інструментом для виділення деревостанів СЗЗ Полтавського ГЗК за умови застосування зональної статистики виключно по класу «Ліси» (клас 1), а не по всій площі СЗЗ.



Гістограма розподілу значень

Рис. 3.27. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Полтавський ГЗК» (25.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження IRECI є найбільш різким серед трьох індексів і трьох фенологічних фаз: середнє падає до 0,0772, медіана до 0,0519, максимальне значення скорочується з 1,6125 до 1,1127. Гістограма відображає масове руйнування хлорофілу в листі заплавних і штучних деревостанів при підготовці до листопаду аналогічна закономірність, спостережена для Північного ГЗК, підтверджує, що IRECI є універсально найчутливішим фенологічним індикатором серед використаних вегетаційних індексів незалежно від загальної частки деревного покриву в СЗЗ. Просторово зони з IRECI > 0,2 майже зникають з карти, і просторовий контраст між захисними смугами та промисловими поверхнями

суттєво нівелюється, що додатково підтверджує обмеженість застосування осінніх знімків для кількісної оцінки вуглецевого депо.

Принципово відмінну просторову структуру вегетаційних індексів демонструє СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК», який є найбільшим серед трьох досліджуваних та з найбільш розвиненим деревно-чагарниковим покривом (31,4 % площі). Результати зональної статистики вегетаційних індексів СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» за вегетаційний сезон 2025 р. наведено у таблиці 3.19 та представлені на рисунках 3.28. – 3.36.

Таблиця 3.19

Зональна статистика вегетаційних індексів СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК»

Індекс	Дата зйомки	Середнє	Медіана	Ст. відх.	Мін.	Макс.
NDVI	20.04.2025 р.	0,2173	0,2058	0,1600	-0,3325	0,6727
NDVI	09.06.2025 р.	0,2661	0,2857	0,1706	-0,2643	0,6960
NDVI	05.09.2025 р.	0,1814	0,1488	0,1333	-0,1802	0,6783
SAVI	20.04.2025 р.	0,1424	0,1265	0,1136	-0,2229	0,5920
SAVI	09.06.2025 р.	0,1824	0,1890	0,1226	-0,2015	0,6348
SAVI	05.09.2025 р.	0,1166	0,0929	0,0886	-0,1268	0,6160
IRECI	20.04.2025 р.	0,1451	0,0959	0,1632	-0,0764	1,1946
IRECI	09.06.2025 р.	0,2088	0,1750	0,1787	-0,0649	1,4321
IRECI	05.09.2025 р.	0,0993	0,0642	0,0975	-0,0698	1,2082

Джерело: розраховано автором за даними Sentinel-2



Рис. 3.28. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» характеризується більш рівномірним охопленням класів 0,1-0,3 порівняно з Полтавським ГЗК. Домінує клас NDVI 0,1-0,2 (жовто-зелений), що відображає початкову фазу розгортання листкового пологу на значній частині площі СЗЗ. Ділянки з NDVI > 0,4 локалізовані переважно вздовж захисних смуг по периметру виробничих майданчиків, у балкових деревостанах та заплавних зонах. Середнє значення NDVI 0,2173 при медіані 0,2058 свідчить про відносно симетричний розподіл і значущу частку вегетуючих поверхонь у загальній площі СЗЗ, на відміну від Полтавського ГЗК, де позитивна асиметрія є суттєво вираженою. Промислові поверхні кар'єрів та відвалів стабільно утримують NDVI < 0,1.

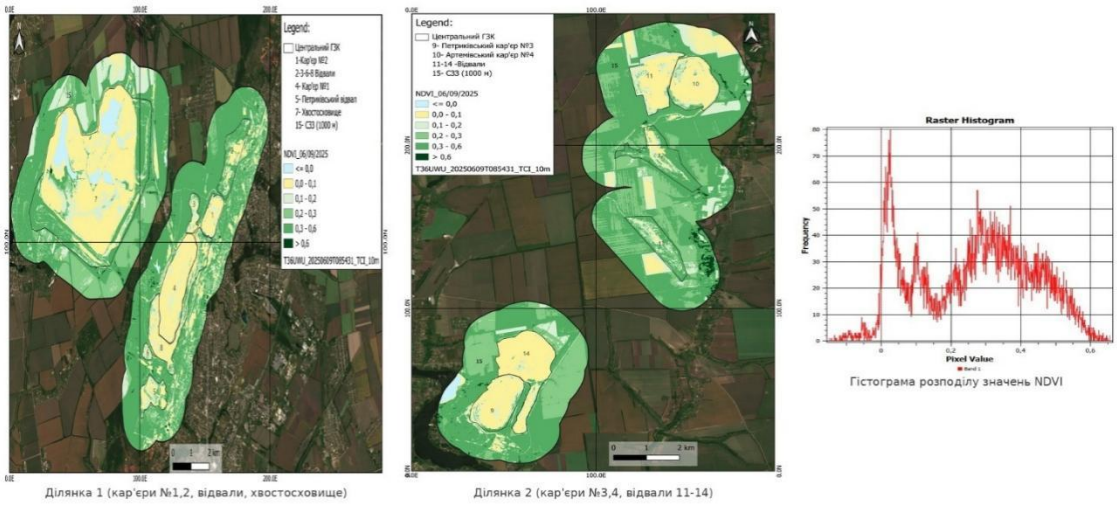


Рис. 3.29. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковий місяць вегетаційного сезону гістограма розподілу NDVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» набуває чітко вираженого двомодального характеру з розділенням невегетуючих (NDVI < 0,1, кар'єри та відвали) та активно вегетуючих (NDVI 0,3-0,5) класів. Середнє значення NDVI 0,2661 при медіані 0,2857 свідчить про те, що більше половини пікселів СЗЗ перебуває у зоні помірної та активної вегетації. Це є принциповою відмінністю від Полтавського ГЗК, де аналогічний показник становить лише 0,1625. Ділянки з NDVI > 0,5 формують суцільні смуги вздовж захисних насаджень та балкових деревостанів. Саме це значення NDVI

використано як вихідне для розрахунку вуглецевого депо. Сезонна амплітуда NDVI становить 0,0847, що є найвищим значенням серед трьох досліджуваних підприємств.

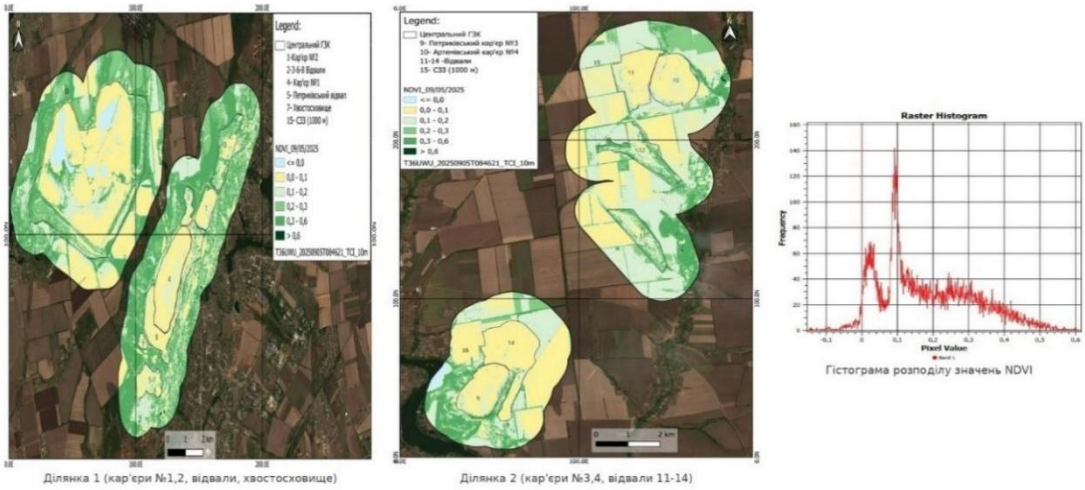


Рис. 3.30. Просторовий розподіл NDVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Восени зональне середнє NDVI знижується до 0,1814, медіана до 0,1488, що відображає загальне пожовтіння листя та скорочення листкового пологу. Осіннє зниження є більш різким, ніж на Полтавському ГЗК, що є прямим наслідком більшої частки листяних деревостанів і вираженішого фенологічного циклу Центрального ГЗК. Мінімальне значення NDVI = −0,1802 зафіксоване на окремих пікселях водних об’єктів та вологих поверхонь хвостосховищ.

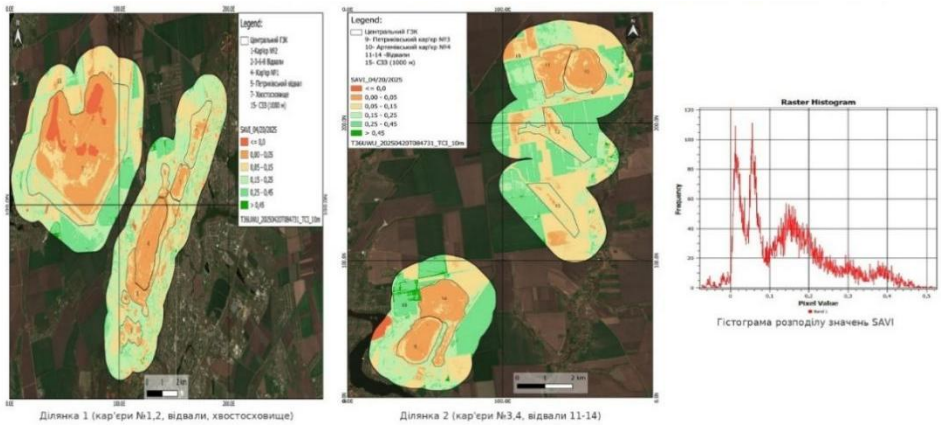


Рис. 3.31. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Весняний розподіл SAVI відтворює просторову структуру NDVI з поправкою на вплив оголеного ґрунту. Середнє значення SAVI 0,1424 при медіані 0,1265 підтверджує, що корекція на ґрунтовий фон (L = 0,5) ефективно знижує спектральний внесок мінерального субстрату кар'єрних поверхонь і відвалів. Ділянки з SAVI > 0,25 просторово збігаються з ділянками найбільш розвиненого деревного покриву. На відміну від Полтавського ГЗК, де ефект SAVI є мало диференціюючим через рівномірно низьку вегетацію, для Центрального ГЗК корекція ґрунтового фону суттєво поліпшує просторове виділення захисних смуг на тлі промислових поверхонь.

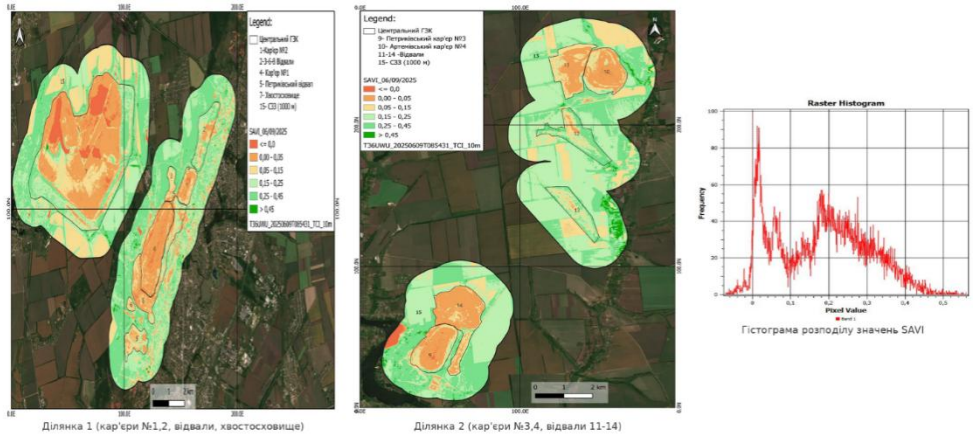


Рис. 3.32. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У червні значення SAVI 0,15-0,30 охоплюють більшість вегетуючих ділянок СЗЗ, що відповідає помірній і високій щільності листкового пологу зрілих листяних насаджень. Середнє значення SAVI 0,1824 при медіані 0,1890 свідчить про достатньо симетричний розподіл без вираженої асиметрії. Порівняно з NDVI гістограма SAVI є більш рівномірною, що підтверджує ефективну корекцію ґрунтового фону по всій площі СЗЗ. Захисні смуги по периметру промислових майданчиків чітко виділяються на картах SAVI як суцільні смуги з найвищими значеннями, а балкові та заплавні деревостани формують ізольовані кластери підвищених значень у межах загальної площі СЗЗ.

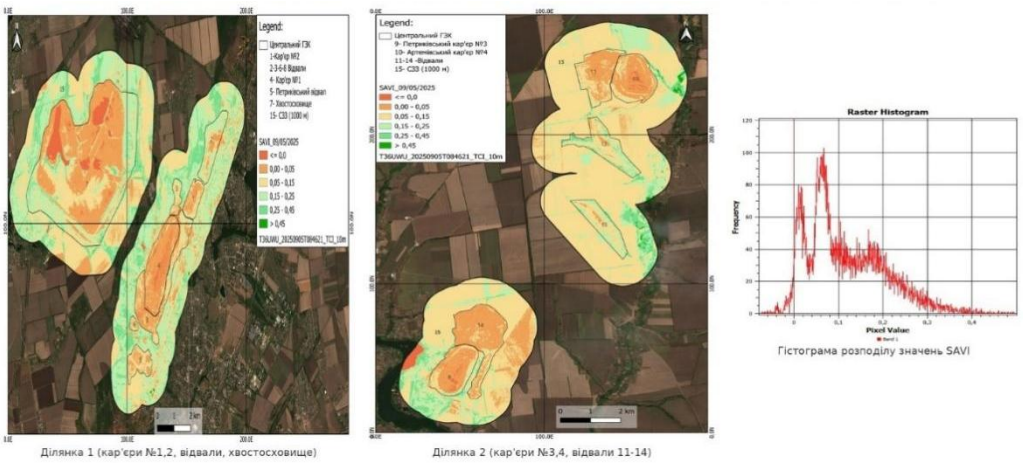


Рис. 3.33. Просторовий розподіл SAVI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження SAVI є більш вираженим порівняно з NDVI: зональне середнє зменшується до 0,1166, медіана до 0,0929. Як і для Полтавського та Північного ГЗК, підвищена чутливість SAVI до зменшення вологості листя у вересні призводить до більш різкого осіннього спаду порівняно з NDVI. Захисні смуги по периметру хвостосховищ і відвалів зберігають відносно вищі значення SAVI на тлі кар'єрних поверхонь, підтверджуючи структурну стійкість деревостанів СЗЗ. Мінімальне осіннє значення SAVI = −0,1268 є помірним і не містить аномалій, характерних для Полтавського ГЗК (−0,5051), що вказує на більш рівномірну атмосферну корекцію знімків.

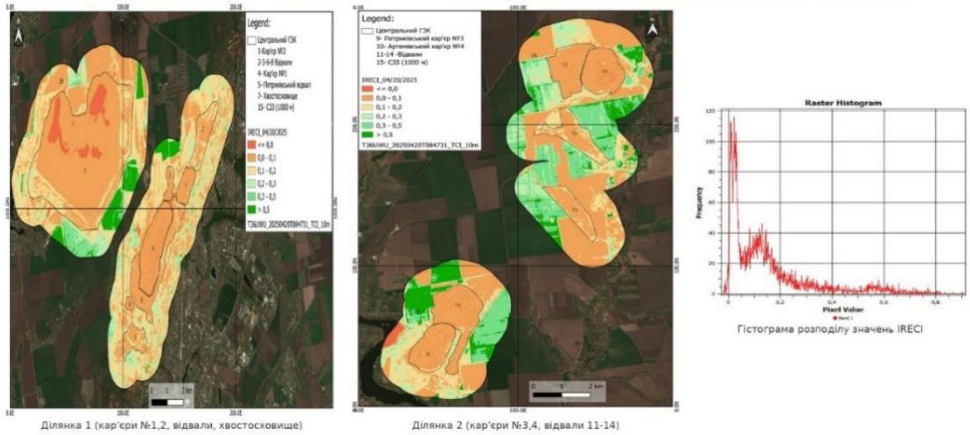


Рис. 3.34. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (20.04.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Навесні значення IRECI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» переважно не перевищують 0,3, а гістограма відображає низьку концентрацію хлорофілу на початку вегетації. Середнє значення 0,1451 при медіані 0,0959 свідчить про виражену правосторонню асиметрію: більшість пікселів СЗЗ ще не вступила у фазу активного фотосинтезу. Порівняно з Полтавським ГЗК (середнє 0,0932), весняне значення IRECI Центрального ГЗК є вищим, що відповідає більшій частці деревного покриву. Ця закономірність підтверджує, що IRECI є більш чутливим до фенологічної фази, ніж NDVI, і відображає ранні відмінності у фотосинтетичному статусі деревостанів різних підприємств.

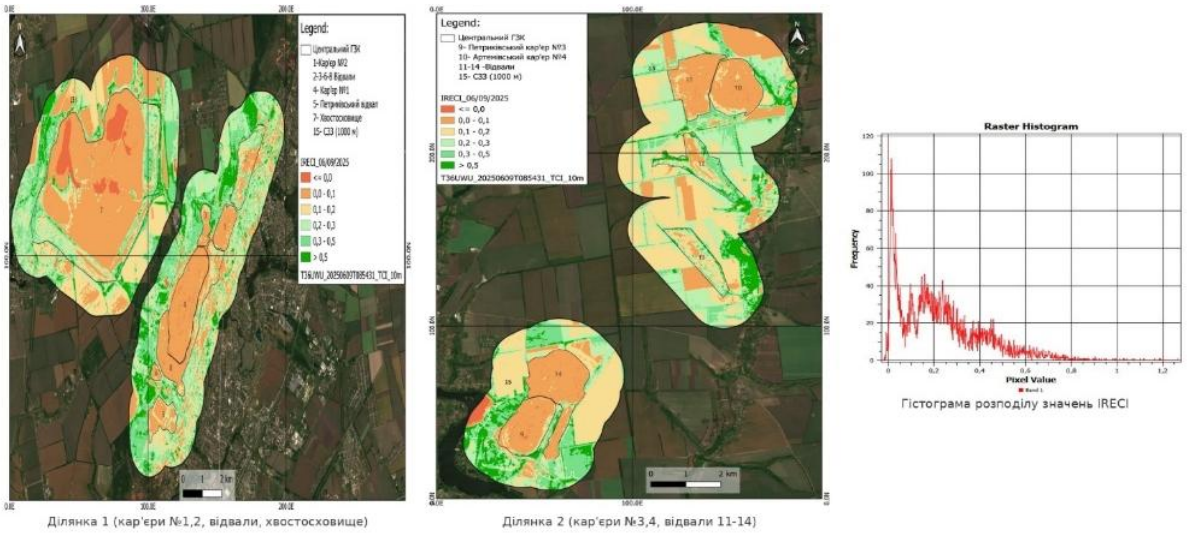


Рис. 3.35. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (09.06.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

У піковий місяць ділянки з IRECI > 0,5 чітко окреслюють захисні смуги по периметру СЗЗ, балкові деревостани та заплавні угруповання, що вказує на найвищу фотосинтетичну активність та найкращий фізіологічний стан насаджень. Середнє значення IRECI 0,2088 при максимумі 1,4321 є значущо вищим, ніж для Полтавського ГЗК (середнє 0,1114), що відповідає більшій частці деревного покриву Центрального ГЗК. Двомодальність гістограми виражена найкраще серед усіх трьох індексів: нижня мода (≈0,05) відповідає промисловим поверхням, верхня (≈0,20-0,30) деревно-чагарниковому покриву СЗЗ. Максимальне значення IRECI = 1,43 зафіксоване на ділянках з найбільш розвиненим деревостаном.



Рис. 3.36. Просторовий розподіл IRECI у СЗЗ ПрАТ «Центральний ГЗК» (05.09.2025 р.) та гістограма розподілу значень індексу (розроблено автором за даними Sentinel-2)

Осіннє зниження IRECI є найбільш різким серед трьох індексів: середнє падає до 0,0993, медіана до 0,0642, максимальне значення скорочується з 1,4321 до 1,2082. Гістограма відображає масове руйнування хлорофілу в листі при підготовці до листопаду. Аналогічна закономірність, спостережена для Полтавського та Північного ГЗК, підтверджує, що IRECI є універсально найчутливішим фенологічним індикатором серед використаних вегетаційних індексів незалежно від загальної частки деревного покриву в СЗЗ.

Порівняльна характеристика NDVI за вегетаційний сезон по трьох підприємствах наведена у таблиці 3.20.

Таблиця 3.20

Порівняльна характеристика NDVI санітарно-захисних зон досліджуваних підприємств, вегетаційний сезон 2025 р.

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
1	2	3	4
NDVI весна (квітень)	0,1627	0,2173	0,1813
NDVI літо (червень–липень)	0,1625	0,2661	0,2301

Продовження таблиці 3.20

1	2	3	4
NDVI осінь (вересень)	0,1577	0,1814	0,1462
Середнє за сезон	0,1610	0,2216	0,1859
Сезонна амплітуда	0,0050	0,0847	0,0839
Дата піку NDVI	28.04	09.06	09.06

Джерело: розраховано автором

Порівняльний аналіз таблиці 3.20 виявляє принципову відмінність між підприємствами за характером сезонної динаміки NDVI. Центральний та Північний ГЗК демонструють виражений одновершинний фенологічний цикл із сезонною амплітудою 0,0847 та 0,0839 відповідно, що є типовим для зрілих листяних деревостанів степово-лісостепової зони [149, 150]. Натомість Полтавський ГЗК характеризується практично нульовою амплітудою NDVI 0,0050, що є прямим наслідком домінування оголеного ґрунту (50,1 % площі СЗЗ). Саме тому для Полтавського ГЗК застосовано верхнє обмеження NDVI_дер на рівні фактичного максимуму 0,6811 замість результату балансової корекції.

На підставі скоригованих значень NDVI, розрахованих LAI та алометричних рівнянь Лакиди здійснено кількісну оцінку вуглецевого депо деревно-чагарникового покриву трьох досліджуваних підприємств [151, 152, 153]. Зведені результати розрахунку наведено у таблиці 3.21.

Таблиця 3.21

Результати розрахунку вуглецевого депо деревно-чагарникового покриву санітарно-захисних зон досліджуваних підприємств, 2025 р.

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
1	2	3	4
Площа лісового покриву (клас 1), га	777,57	2 644,72	1 056,35
Площа чагарникового покриву (клас 2), га	120,24	6 360,54	2 407,51
Поправочний коефіцієнт kv	0,0797	0,3145	0,3181

Продовження таблиці 3.21

1	2	3	4
NDVI скоригований (ліси)	0,6811	0,6860	0,6050
NDVI скоригований (чагарники)	0,5789	0,5830	0,5140
LAI ліси, м²/м²	4,808	4,845	4,237
LAI чагарники, м²/м²	2,694	2,715	2,370
AGB ліси, т/га	64,9	65,3	57,8
AGB чагарники, т/га	20,2	20,3	18,1
AGB загальна, т	52 893	302 135	104 629
BGB загальна, т (R=0,26)	13 752	78 555	27 204
Загальна фітомаса (ТВ), т	66 645	380 690	131 833
Вуглецеве депо, т С	31 323	178 924	61 961
Вуглецеве депо, т CO_2-екв.	114 767	655 578	227 025
Питоме депо, т С/га	34,9	19,9	17,9

Джерело: розраховано автором

Результати розрахунку засвідчують суттєву диференціацію вуглецевого депо між підприємствами як за абсолютними, так і за питомими показниками. ПрАТ «Центральний ГЗК» акумулює найбільший обсяг вуглецю, що складає 178 924 т С (655 578 т CO_2-екв.). ПрАТ «Північний ГЗК» посідає друге місце за загальним депо – 61 961 т С (227 025 т CO_2-екв.). ПрАТ «Полтавський ГЗК» накопичує найменше абсолютне депо – 31 323 т С (114 767 т CO_2-екв.), внаслідок мінімальної площі деревно-чагарникового покриву (897,81 га, або 8,0 % СЗЗ). Сумарне вуглецеве депо деревно-чагарникового покриву СЗЗ трьох досліджуваних підприємств становить 272 208 т С, або 997 370 т CO_2-еквіваленту. Накопичене вуглецеве депо СЗЗ у 3,3 рази перевищує річний обсяг прямих викидів трьох ГЗК разом взятих (299 448 т CO_2 у 2025 р.). Проте депо є статичним показником (акумульований запас), тоді як для оцінки реального компенсаційного ефекту необхідно визначити щорічний приріст цього депо, тобто інтенсивність секвестрації.

3.7. Оцінка річної секвестрації вуглецю деревно-чагарниковим покривом санітарно-захисних зон

Встановлені параметри вуглецевого депо характеризують статичний запас вуглецю в буферних екосистемах, проте для оцінки реального компенсаційного потенціалу СЗЗ стосовно поточних викидів підприємств необхідним є кількісне визначення річної секвестрації, динамічного показника щорічного приросту вуглецевого депо. За результатами моделювання i-Tree Eco загальне вуглецеве депо дерев модельної ділянки становить 21,41 т С (78,5 т CO_2-екв.), річна секвестрація – 0,625 т С/рік (2,29 т CO_2-екв./рік) [154, 155]. Зведену характеристику депо та секвестрації за видами наведено у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22

Вуглецеве депо та річна секвестрація за видами деревостану модельної ділянки (i-Tree Eco)

Вид	N, шт.	Депо, т С	Депо, %	Секвест., т С/рік	Секвестрація, %
1	2	3	4	5	6
Акація біла (*Robinia pseudoacacia*)	15	6,51	30,9	0,190	30,4
Верба плакуча (*Salix babylonica*)	14	6,63	31,5	0,070	11,2
Береза повисла (*Betula pendula*)	20	2,6	12,2	0,121	19,4
Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*)	10	2,3	10,6	0,068	10,9
Тополя біла (*Populus alb*a)	15	1,2	5,4	0,073	11,7
Дуб звичайний (*Quercus robur*)	5	0,8	3,5	0,032	5,1
Каштан кінський (*Aesculus hippocastanum*)	5	0,5	2,5	0,022	3,5
Інші (6 видів Клен гостролистий (*Acer platanoides L.*), Тополя канадська (*Populus deltoides W.Bartram ex Marshall*), Липа дрібнолиста (*Tilia cordata Mill.*), Липа широколиста (*Tilia platyphyllos Scop.*), Горобина звичайна (*Sorbus aucuparia L.*), Бузок звичайний (*Syringa vulgaris* L.))	25	1,0	3,0	0,049	7,8
Разом	**109**	**21,4**	**100,0**	**0,625**	**100,0**

Джерело: розраховано автором

Зіставлення результатів i-Tree Eco з нормативним методом потребує урахування двох методологічних відмінностей. По-перше, географічна відмінність між модельною ділянкою та об'єктами дослідження не впливає на коректність верифікації, оскільки зіставлення здійснюється не за абсолютними показниками продуктивності деревостанів, а за питомою секвестрацією на одиницю площі крони домінуючої породи. Акація біла (*Robinia pseudoacacia*) характеризується широкою екологічною амплітудою і зберігає стабільні алометричні співвідношення між морфометричними параметрами та фітомасою незалежно від кліматичної зони зростання. По-друге, для забезпечення порівнянності з результатами i-Tree Eco нормативний показник було приведено до площі проєктивного покриття та скориговано з урахуванням коефіцієнта відкрито зростаючих дерев, застосованого у програмній моделі. Скориговане значення становить 0,98 т C/га покриття крон за рік і є зіставним із результатом i-Tree Eco 1,21 т C/га покриття крон за рік. Насадження СЗЗ гірничо-збагачувальних підприємств формують суцільні захисні смуги з типовою щільністю 300-500 дерев/га, тому застосування коефіцієнта 0,8 до них є невиправданим. Після корекції на коефіцієнт вільностоячого зростання (open-grown factor) питома секвестрація нормативного методу (1,756 т C/га/рік × 0,70 × 0,8 = 0,98 т C/га крон/рік для степової зони) є близькою до значення i-Tree Eco (1,21 т C/га крон/рік), що свідчить про задовільну узгодженість двох незалежних підходів [156, 157]. Порівняльну характеристику методів наведено у таблиці 3.23.

Таблиця 3.23

Порівняльна характеристика результатів i-Tree Eco (модельна ділянка) та нормативного методу розрахунку річної секвестрації вуглецю

Показник	i-Tree Eco	Нормативний метод
1	2	3
Метод оцінки	Польова інвентаризація (DBH) + i-Tree Eco v6	$\Delta V \times WD \times BEF \times (1+R) \times CF$ (Лакида, МГЕЗК)
Об'єкт дослідження	109 дерев, 13 видів	Деревно-чагарниковий покрив СЗЗ трьох ГЗК
Площа / кількість	0,515 га покриття крон / 109 дерев	897 – 9 005 га деревного покриву

Продовження таблиці 3.23

1	2	3
Вуглецеве депо	21,41 т С (78,5 т CO_2-екв.)	31 323 – 178 924 т С по ГЗК
Річна секвестрація	0,625 т С/рік (2,29 т CO_2-екв./рік)	1 471 – 12 045 т С/рік по ГЗК
Питоме депо, т С/га	41,6 т С/га покриття крон	17,9 – 34,9 т С/га (залежно від ГЗК)
Питома секвестрація, т С/га/рік	1,21 т С/га покриття крон/рік	1,639 – 1,928 т С/га/рік (степ / лісостеп)
Коефіцієнт open-grown (i-Tree)	× 0,8 (міські поодинокі дерева)	Не застосовується (густі насадження СЗЗ)
Джерело коефіцієнтів	USDA Forest Service, i-Tree Eco	Лакида П.І. (2002, 2010); МГЕЗК (2006)

Джерело: розраховано автором

Аналізуючи дані таблиці 3.23, варто зазначити, що результати польової дендрологічної інвентаризації з обробкою в i-Tree Eco підтверджують адекватність нормативного методу для оцінки вуглецевого депо та секвестрації насаджень СЗЗ гірничо-збагачувальних підприємств. Незважаючи на суттєву різницю масштабів, питомі показники обох методів демонструють задовільну збіжність: розрахункова секвестрація 1,21 т С/га крон/рік за i-Tree Eco перебуває в одному порядку величин із нормативними значеннями 1,639 – 1,928 т С/га/рік, отриманими незалежно за методикою Лакиди П.І. та МГЕЗК. Поєднання нормативного підходу, верифікації через сезонну динаміку NDVI та незалежної польової інвентаризації забезпечує взаємну перевірку результатів і підвищує достовірність оцінки вуглево-компенсаційного потенціалу СЗЗ [158, 159, 160, 161, 162]. Таким чином, тристороння методологічна перевірка дозволяє з достатньою впевненістю перейти від верифікації методу до його прямого застосування для розрахунку фактичних показників секвестрації трьох досліджуваних підприємств. Результати розрахунку річної секвестрації вуглецю деревно-чагарниковим покривом СЗЗ трьох досліджуваних підприємств за 2025 рік наведено у таблиці 3.24.

Таблиця 3.24

Результати розрахунку річної секвестрації вуглецю санітарно-захисними зонами досліджуваних підприємств

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
Площа лісового покриву, га	777,57	2 644,72	1 056,35
Площа чагарникового покриву, га	120,24	6 360,54	2 407,51
ΔV ліси, м³/га/рік	3,23	3,80	3,80
ΔV чагарники, м³/га/рік	1,785	2,100	2,100
Секвестрація лісами, т С/га/рік	1,756	2,066	2,066
Секвестрація чагарниками, т С/га/рік	0,879	1,035	1,035
Річна секвестрація лісами, т С/рік	1 365,4	5 463,5	2 182,2
Річна секвестрація чагарниками, т С/рік	105,7	6 581,2	2 491,0
Річна секвестрація загальна, т С/рік	1 471,1	12 044,7	4 673,3
Річна секвестрація, т CO_2-екв./рік	5 390,1	44 131,8	17 123,0
Питома секвестрація, т С/га/рік	1,639	1,338	1,349
Прямі викиди Scope 1 (2025), т CO_2	133 008	75 961	90 478
Коефіцієнт компенсації, %	4,1	58,1	18,9

Джерело: розраховано автором

ПрАТ «Центральний ГЗК» демонструє найвищу річну секвестрацію 12 044,7 т С/рік (44 131,8 т CO_2-екв./рік), що зумовлено найбільшою площею деревно-чагарникового покриву (9 005,26 га). Коефіцієнт компенсації становить 58,1 %. СЗЗ щорічно поглинає майже 3/5 від обсягу прямих викидів підприємства. ПрАТ «Північний ГЗК» забезпечує річну секвестрацію 4 673,3 т С/рік (17 123 тCO_2- екв./рік) з коефіцієнтом компенсації 18,9 %. Питома секвестрація 1,349 т С/га/рік є близькою до показника Центрального ГЗК (1,338 т С/га/рік), що підтверджує однорідність нормативної бази розрахунку для підприємств лісостепово-степової зони Дніпропетровської області. ПрАТ «Полтавський ГЗК» характеризується найнижчою абсолютною річною секвестрацією 1 471,1 т С/рік (5 390,1 т CO_2-екв./рік) та найнижчим коефіцієнтом компенсації 4,1 %.

Сумарна річна секвестрація деревно-чагарникового покриву СЗЗ трьох досліджуваних підприємств становить 18 189,1 т C/рік, або 66 645 т CO_2-еквіваленту на рік. Загальний коефіцієнт компенсації становить 22,3 %. СЗЗ щорічно поглинають близько чверті прямих викидів ГЗК. Встановлена вуглепоглинальна функція СЗЗ може використовуватися як внутрішній показник екологічного менеджменту підприємства, проте не замінює технологічного скорочення вбудованих викидів продукції, що підлягають декларуванню відповідно до вимог CBAM [163].

Коефіцієнт компенсації суттєво відрізняється між підприємствами від 4,1 % для Полтавського ГЗК до 58,1 % для Центрального. Ця відмінність визначається двома чинниками, більшою площею деревно-чагарникового покриву на Центральному та Північному ГЗК і меншими абсолютними обсягами викидів цих підприємств (75 961 і 90 487 т CO_2 проти 133 008 т CO_2). Зіставлення результатів дозволяє встановити відношення річної секвестрації до накопиченого депо. Для Полтавського ГЗК 4,7 % на рік, для Центрального 6,7 % на рік, для Північного 7,5 % на рік. Ці показники відповідають теоретичним значенням відносної продуктивності зрілих листяних деревостанів (5-8 % від загального депо щорічно), а відхилення Полтавського ГЗК у бік нижньої межі є очікуваним з урахуванням застосованого зонального коригування. Отримані значення річної секвестрації є консервативними оцінками з двох причин. По-перше, розрахунок враховує лише деревно-чагарниковий покрив (класи 1 і 2), залишаючи поза обліком секвестраційну функцію трав'яного покриву (клас 3). По-друге, нормативний приріст відповідає середньому показнику для зрілих насаджень II-III бонітету. Насадження на рекультивованих ділянках або молоді самосівні деревостани можуть мати вищий приріст у фазі активного росту.

Для поглибленого аналізу внутрішньовидових закономірностей секвестрації та обґрунтування оптимального видового складу насаджень СЗЗ проведено регресійний аналіз залежності річної секвестрації вуглецю від діаметру стовбура на висоті 1,3 м (DBH) для домінуючих деревних порід модельної ділянки (n=109). Використання DBH як предиктора обґрунтоване його високою кореляцією з надземною біомасою дерева та доступністю вимірювання у польових умовах без

спеціального обладнання [164, 165]. Для кожного з п'яти видів з достатнім обсягом вибірки (n≥10) побудовано степеневу регресійну модель виду $C = a \times DBH^b$ методом найменших квадратів у логарифмічному просторі (рис. 3.37, табл. 3.25)

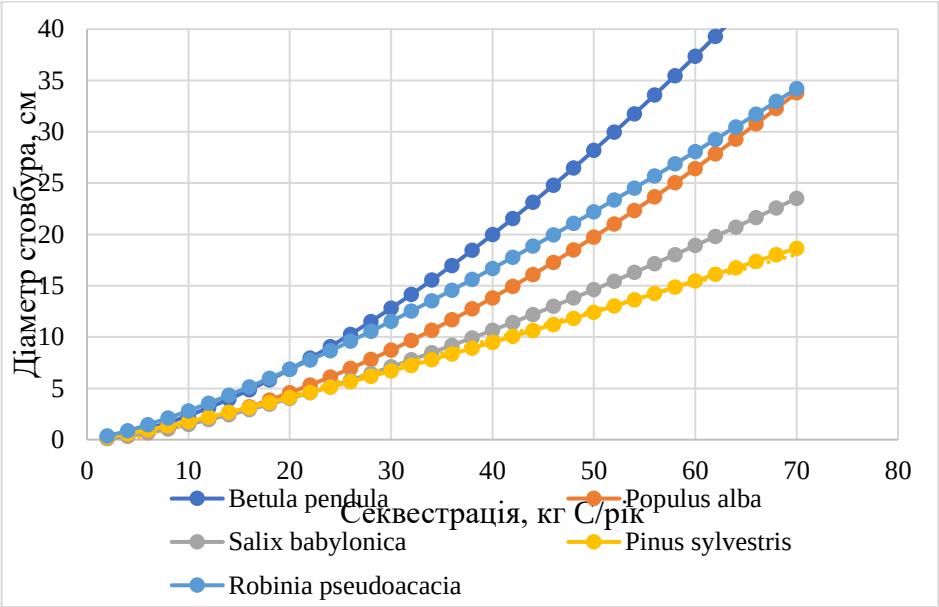


Рис. 3.37. Залежність річної секвестрації вуглецю від діаметру стовбура деревних порід СЗЗ (степенева модель $C = a \times DBH^b$, i-Tree Eco v6, n=109)

Таблиця 3.25

Параметри регресійних моделей секвестрації

Вид	n	a	b	R^2	RMSE (кг C/рік)	Рівняння
Акація біла (*Robinia pseudoacacia*)	15	0,14700	1,2827	0,932	2,58	$C = 0{,}147 \times DBH^{1{,}283}$
Береза повисла (*Betula pendula*)	20	0,06712	1,5441	0,981	1,05	$C = 0{,}067 \times DBH^{1{,}544}$
Тополя біла (*Populus alba*)	15	0,03816	1,5974	0,881	0,82	$C = 0{,}038 \times DBH^{1{,}597}$
Верба плакуча (*Salix babylonica*)	14	0,05809	1,4131	0,866	1,37	$C = 0{,}058 \times DBH^{1{,}413}$
Сосна звичайна (*Pinus sylvestris*)	10	0,10952	1,2093	0,983	0,63	$C = 0{,}110 \times DBH^{1{,}209}$

Джерело: розраховано автором

Аналіз отриманих регресійних моделей свідчить про статистично значущу нелінійну залежність між DBH та річною секвестрацією для всіх досліджених порід (R^2 = 0,866-0,983). Показник степеня b варіює від 1,21 сосна звичайна (*Pinus sylvestris*) до 1,60 тополя біла (*Populus alba*), що означає непропорційне зростання секвестрації зі збільшенням діаметру. Подвоєння DBH збільшує річну

секвестрацію у 2,3 – 3,0 рази залежно від виду. Це підтверджує пріоритетність збереження та формування великодіаметрових деревостанів у насадженнях СЗЗ порівняно зі створенням рівновеликих площ молодняків. Найвищий абсолютний рівень секвестрації при значеннях DBH понад 30 см демонструє акація біла (*Robinia pseudoacacia* (R^2=0,932, b=1,283), що підтверджує її роль як основної карбон-акумулюючої породи для степово-лісостепової зони. Береза повисла *(Betula pendula*) характеризується найкрутішим нахилом кривої (b=1,544, R^2=0,981), що свідчить про найвищу чутливість секвестрації до приросту діаметру, що робить березу найбільш перспективною супутньою породою у змішаних насадженнях СЗЗ за критерієм довгострокового секвестраційного потенціалу. Сосна звичайна (*Pinus sylvestris)* відзначається найвищою точністю моделі (R^2=0,983) при помірному абсолютному рівні секвестрації, що є типовим для хвойних порід з більш передбачуваною алометрією.

Для порівняльної оцінки видів незалежно від розміру дерев та обсягу вибірки розраховано показник питомої секвестраційної ефективності (річну секвестрацію на 100 см² поперечного перерізу стовбура (кг С/рік на 100 см² DBH)). Цей показник дозволяє зіставити секвестраційний потенціал порід різного розміру і є безпосередньою основою для ранжування видів при проектуванні видового складу насаджень СЗЗ (рис. 4.32).

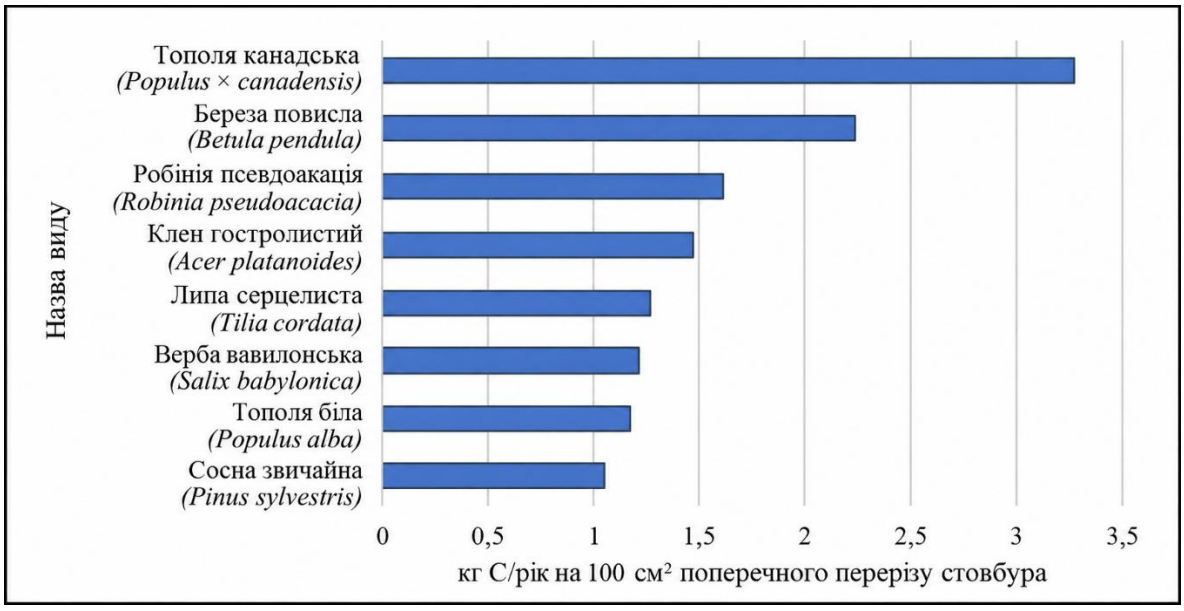


Рис. 3.38 Питома секвестраційна ефективність деревних порід для насаджень СЗЗ

Рейтинг питомої секвестраційної ефективності виявив суттєву диференціацію між видами: від 1,042 кг С/рік на 100 см² DBH у сосни звичайної (*Pinus sylvestris)* до 3,263 у тополі канадської (*Populus deltoides)*. Серед видів із достатнім обсягом вибірки найвищу питому ефективність демонструє береза повисла (*Betula pendula)* (2,237 кг/рік на 100 см²), що в 1,4 рази перевищує показник акації білої (*Robinia pseudoacacia)* (1,610). Водночас абсолютна секвестрація на ділянці у акації білої (*Robinia pseudoacacia)* є найвищою (186,0 кг С/рік сумарно) завдяки більшим середнім розмірам дерев (DBH сер. = 30,2 см проти 16,2 см у берези).

Найкращі показники секвестраційної ефективності та абсолютного вкладу у вуглецеве депо серед усіх досліджених видів демонструє акація біла (*Robinia pseudoacacia)*, що на перший погляд, робить її очевидним кандидатом для пріоритетного використання в подальшому озелененні санітарно-захисних зон. Однак останні десятиліття чисельні наукові дослідження ставлять під сумнів доцільність подальшого широкого використання акації білої (*Robinia pseudoacacia* L.) у захисному лісорозведенні України, оскільки цей вид офіційно визнаний інвазійним і тимчасово перебував під забороною використання для відтворення лісів і захисних насаджень (наказ Міндовкілля № 184 від 03.04.2023 р.), яка втратила чинність 19.10.2023 р. (наказ № 671) внаслідок гострої дискусії між природоохоронною та лісівничою науковими спільнотами. Отримані в межах цього дослідження результати щодо найвищої абсолютної секвестрації акації білої (186,0 кг С/рік на ділянці) та статистично надійної регресійної моделі (R^2=0,932) є об'єктивним відображенням фактичного стану вже сформованих насаджень СЗЗ, закладених у 1960 – 1980-х рр., і не можуть бути переглянуті чи відкинуті, оскільки вони ґрунтуються на реальних польових вимірах і характеризують справжній вуглево-компенсаційний потенціал існуючих буферних екосистем. Водночас широка екологічна амплітуда, здатність до фіксації азоту та інтенсивне вегетативне розмноження кореневими паростками, які забезпечують акації білій виключну стійкість до техногенних умов і пояснюють її домінування на досліджених об'єктах, є водночас тими самими властивостями, що зумовлюють її здатність до неконтрольованого поширення і витіснення аборигенних видів степово-

лісостепової зони. Ця суперечність визначає принципову відмінність між оцінкою існуючого стану та проєктуванням нових насаджень.

Отримані результати формують наукову основу для розробки рекомендацій щодо оптимального видового складу насаджень СЗЗ залізорудних підприємств.

3.8. Сценарний аналіз підвищення вуглепоглинального потенціалу санітарно-захисних зон та рекомендації щодо оптимізації насаджень

Результати кількісної оцінки вуглецевого депо та річної секвестрації характеризують існуючий стан деревно-чагарникового покриву СЗЗ трьох досліджуваних підприємств. Однак для формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо підвищення вуглецево-компенсаційного потенціалу необхідно перейти від опису поточного стану до прогностичного моделювання. А саме визначити, яким чином цілеспрямовані зміни видового складу та площі насаджень впливатимуть на секвестрацію вуглецю в довгостроковій перспективі [166, 167, 168, 169].

Модель вуглепоглинального потенціалу СЗЗ базується на поєднанні трьох методологічних блоків, розроблених у попередніх підрозділах, а саме нормативного методу розрахунку річної секвестрації за МГЕЗК з коефіцієнтами Лакиди, результатів регресійного аналізу для домінуючих видів, рейтингу питомої секвестраційної ефективності порід [170]. Вхідними параметрами моделі є площа потенційно придатних для озеленення ділянок СЗЗ; рекомендований видовий склад насаджень, прогнозний вік деревостанів на горизонті 25 років, що відповідає нормативному строку досягнення зрілості захисних насаджень згідно з ДСП-173-96 (зі змінами, наказ МОЗ № 40 від 13.01.2026 р.). Площа потенційно придатних для додаткового озеленення ділянок визначена як різниця між нормативною часткою деревно-чагарникового покриву СЗЗ для підприємств I-II класу шкідливості (не менше 40 % площі СЗЗ згідно з ДСП-173-96) та фактичною часткою деревно-чагарникового покриву за результатами класифікації Sentinel-2. Результати розрахунку потенційного дефіциту озеленення наведено у таблиці 3.26.

Таблиця 3.26

Оцінка дефіциту деревно-чагарникового покриву СЗЗ відносно нормативних вимог

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
1	2	3	4
Площа СЗЗ, га	11 269,60	28 637,53	10 890,10
Фактична частка деревно-чагарникового покриву, %	8,0	31,4	31,8
Нормативна частка, % (ДСП-173-96)	40,0	40,0	40,0
Дефіцит озеленення, %	32,0	8,6	8,2
Дефіцит озеленення, га	3 606,3	2 462,8	894,0
Пріоритетність додаткового озеленення	висока	середня	середня

Джерело: розраховано автором

Аналіз таблиці 3.26 свідчить про принципово різний рівень забезпеченості деревно-чагарниковим покривом між підприємствами. ПрАТ «Полтавський ГЗК» має найбільший абсолютний дефіцит озеленення 3 606,3 га, або 32,0 % площі СЗЗ. Центральний та Північний ГЗК мають близькі між собою показники дефіциту (8,6 та 8,2 % відповідно), хоча в абсолютних цифрах Центральний ГЗК потребує залучення значно більших площ (2 462,8 га проти 894,0 га) через масштаб підприємства [171].

З огляду на практичну спрямованість дослідження та потребу галузі у відтворюваному інструменті планування озеленення, застосовному не лише до трьох досліджуваних підприємств, а й до інших гірничо-збагачувальних комбінатів України зі спорідненими природно-кліматичними умовами, запропоновано уніфікований базовий видовий склад насаджень СЗЗ. Такий підхід є свідомим переходом розробки стандартизованого галузевого протоколу, який може бути адаптований іншими підприємствами. Уніфікований склад враховує сукупність вимог, виявлених емпірично в межах дослідження, високу секвестраційну ефективність, толерантність до техногенного навантаження, азотфіксувальну функцію та відсутність інвазійного статусу (таблиця 3.27).

Таблиця 3.27

Рекомендований видовий склад насаджень СЗЗ залізорудних підприємств

Вид	Частка в насадженні, %	Обґрунтування
Береза повисла (*Betula pendula* Roth.)	30	Найвища питома секвестраційна ефективність, класичний піонерний вид для техногенних субстратів, толерантний до важких металів
Дуб звичайний (*Quercus robur* L.)	25	Найвища стійкість до пилового стресу серед листяних аборигенних порід, формує стабільний довгостроковий вуглецевий резервуар
Тополя біла (*Populus alba* L.)	15	Висока адаптивність до техноземів, заповнення прогалин у перші роки формування насадження
Вільха клейка (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.)	15	Азотфіксувальний вид, толерантна до перезволожених ділянок (хвостосховища, дренажні канали)
Ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.)	10	Природний компонент лісостепових і байракових угруповань
Сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.)	5	Цілорічна секвестраційна функція незалежно від фенологічної фази

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи дані таблиці 3.27 слід зазначити, що при формуванні видового складу враховано наукові застереження, що випливають з аналізу міжнародного досвіду фітомеліорації техногенних ландшафтів [172, 173]. Виключення акації білої (*Robinia pseudoacacia* L.) з рекомендованого складу через її інвазійний статус спричиняє втрату важливої екосистемної функції, а саме фіксації атмосферного азоту, що є критичною для бідних техногенних субстратів зон I – II. Для компенсації цієї функції до складу введено вільху клейку (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), яка є аборигенним азотфіксувальним видом, симбіотично пов'язаним з актиномицетами роду *Frankia*, який додатково демонструє високу толерантність до перезволожених техногенних субстратів, зокрема прилеглих до хвостосховищ ділянок.

Запропонований видовий склад забезпечує реалізацію принципу багатофункціонального буфера, береза повисла (*Betula pendula* Roth.) максимізує питомий секвестраційний потенціал і слугує основною піонерною породою для найважчих техногенних умов, дуб звичайний (*Quercus robur* L.) та ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.) відтворюють природну структуру байракових лісів

лісостепової зони, вільха клейка забезпечує азотфіксувальну функцію на перезволожених ділянках, а тополя біла (*Populus alba* L.), верба плакуча (*Salix babylonica* L.) та сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L.) доповнюють екологічну диференціацію за умовами зволоження і виконують пилогазозахисну функцію [174].

Для прогнозування секвестраційного потенціалу на 25 років розроблено три сценарії залежно від інтенсивності заходів озеленення: базовий (збереження існуючого стану без змін), помірний (озеленення 50 % дефіцитної площі) та оптимальний (озеленення 100 % дефіцитної площі до нормативного рівня 40 %). Слід зазначити, що базовий сценарій передбачає збереження поточного рівня секвестрації незмінним протягом 25 років, що є оптимістичним, а не нейтральним припущенням. Існуючі насадження СЗЗ трьох підприємств мають вік 50 – 65 років і перебувають у стані зрілого або перестійного деревостану, для якого характерне поступове зниження інтенсивності приросту. Таким чином, фактична динаміка секвестрації за відсутності активних заходів озеленення з високою ймовірністю буде нижчою за наведені в базовому сценарії значення, що додатково підвищує пріоритетність реалізації помірного або оптимального сценаріїв. Результати сценарного моделювання наведено у таблиці 3.28.

Таблиця 3.28

Прогнозний приріст річної секвестрації вуглецю СЗЗ залежно від сценарію озеленення

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
Існуюча річна секвестрація, т С/рік	1 471,1	12 044,7	4 673,3
Базовий сценарій (без змін)			
Секвестрація через 25 років, т С/рік	1 471,1	12 044,7	4 673,3
Коефіцієнт компенсації, %	4,1	58,1	18,9
Помірний сценарій (50% дефіцитної площі)			
Додаткова площа озеленення, га	1 803,2	1 231,4	447,0
Приріст секвестрації, т С/рік	2 704,8	2 216,5	804,6
Загальна секвестрація, т С/рік	4 175,9	14 261,2	5 477,9
Коефіцієнт компенсації, %	11,5	68,8	22,2
Оптимальний сценарій (100% дефіцитної площі)			
Додаткова площа озеленення, га	3 606,3	2 462,8	894,0
Приріст секвестрації, т С/рік	5 409,5	4 433,0	1 609,2
Загальна секвестрація, т С/рік	6 880,6	16 477,7	6 282,5
Коефіцієнт компенсації, %	19,0	79,5	25,4

Джерело: розраховано автором

Аналіз даних таблиці 3.28 засвідчує суттєву відмінність сценаріїв озеленення між підприємствами, якщо для ПрАТ «Центральний ГЗК» уже помірний сценарій забезпечує компенсацію понад 2/3 прямих викидів (68,8 %), то для ПрАТ «Полтавський ГЗК» навіть оптимальний сценарій підвищує коефіцієнт компенсації лише до 19,0 %. Це підтверджує, що ефективність екосистемної компенсації визначається не стільки інтенсивністю заходів озеленення, скільки вихідною площею деревно-чагарникового покриву та обсягом прямих викидів конкретного підприємства. Наведені відсоткові показники компенсації не відображають абсолютний масштаб залишкового вуглецевого навантаження, тому для коректної інтерпретації результатів доцільно зіставити їх безпосередньо з обсягами прямих викидів підприємств (таблиця 3.29).

Таблиця 3.29

Абсолютний некомпенсований залишок прямих викидів CO_2 залежно від сценарію озеленення

Показник	**Полтавський ГЗК**	**Центральний ГЗК**	**Північний ГЗК**
Прямі викиди Scope 1, т CO_2	133 008	75 961	90 478
Некомпенсований залишок, базовий сценарій, т CO_2	127 618	31 829	73 355
Некомпенсований залишок, оптимальний сценарій, т CO_2	107 798	15 587	67 459
Скорочення некомпенсованого залишку, т CO_2	19 820	16 242	5 896

Джерело: розраховано автором

Аналіз абсолютних показників засвідчує, що навіть за умови повної реалізації оптимального сценарію озеленення жодне з трьох підприємств не досягає повної вуглецевої нейтральності виключно за рахунок екосистемної компенсації. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК» некомпенсований залишок скорочується лише на 19 820 т CO_2, що становить менше 15 % від загального обсягу прямих викидів підприємства. Сценарний аналіз демонструє принципово різний потенціал підвищення секвестрації залежно від підприємства. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК» реалізація оптимального сценарію збільшить коефіцієнт компенсації з 4,1 % до 19,0 %. Однак навіть при повному виконанні нормативних вимог підприємство

залишатиметься в зоні низького компенсаційного потенціалу через домінування викидів (133 008 т CO_2). Для ПрАТ «Центральний ГЗК» оптимальний сценарій забезпечує коефіцієнт компенсації 79,5%, що відповідає рівню «переважної компенсації» СЗЗ поглинатиме близько 4/5 прямих викидів підприємства. Для ПрАТ «Північний ГЗК» оптимальний сценарій збільшує коефіцієнт компенсації до 25,4 %, що відповідає рівню «часткової компенсації».

Реалізація запропонованих сценаріїв потребує диференційованого підходу до планування заходів озеленення з урахуванням просторових обмежень, існуючої інфраструктури та виробничої діяльності підприємств. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК» пріоритетними напрямами є залісення вільних смуг уздовж периметру хвостосховища та відвалів (потенційна площа до 1 200 га), розширення захисних смуг вздовж транспортних коридорів та залізничних під'їзних колій (до 800 га), формування буферних насаджень по периметру санітарно-захисної зони (до 1 606 га). Просторова організація деревно-чагарникових насаджень СЗЗ у вигляді чотирьох функціональних зон відображена на рис. 3.39.

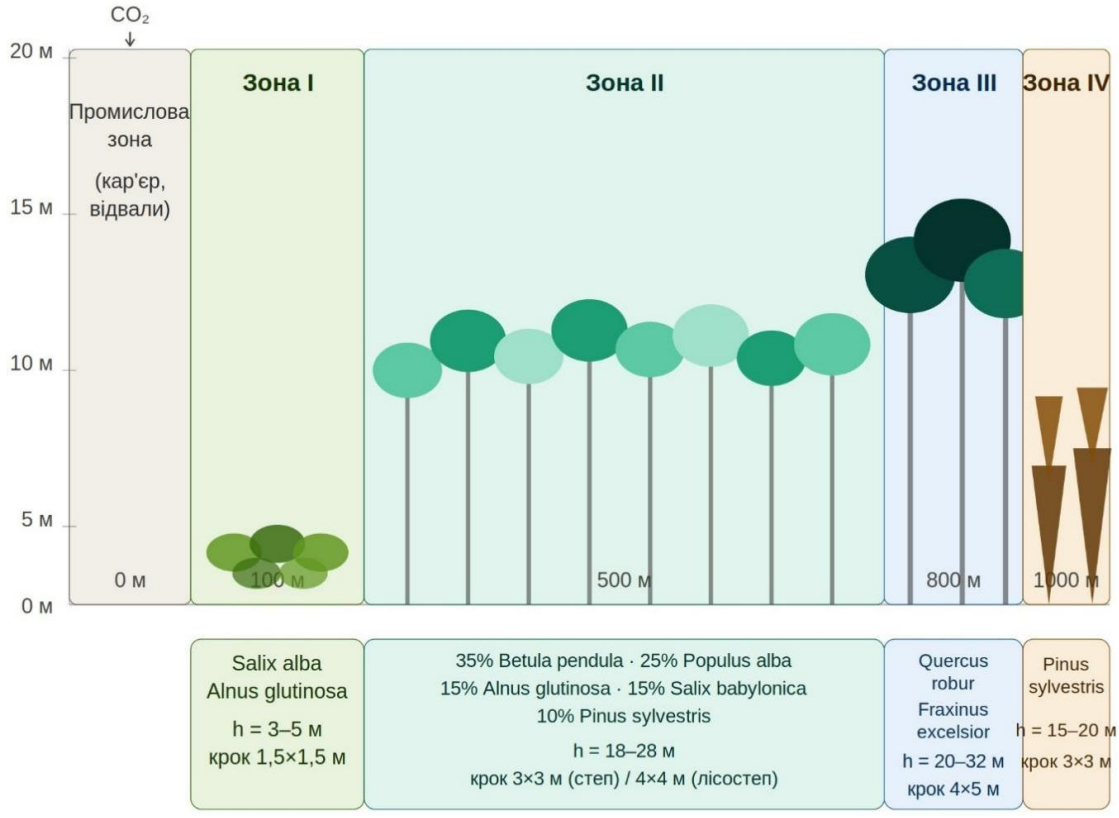


Рис. 3.39. Схема розміщення деревних насаджень у поперечному перерізі санітарно-захисної зони гірничо-збагачувального підприємства (розроблено автором)

Аналізуючи рис.3.39. варто зазначити, що просторова організація насаджень у вигляді чотирьох послідовних зон реалізує принцип поступового ускладнення структури деревостану від джерела техногенного навантаження до периферії санітарно-захисної зони.

Зона I (0 – 100 м від межі промислової зони) формується низькорослим чагарниковим бар'єром із верби білої (*Salix alba* L.) та вільхи клейкої (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) висотою 3 – 5 м з рекомендованим кроком посадки 1,5×1,5 м. Розташування цієї зони безпосередньо біля джерела викидів зумовлене найвищою стійкістю обраних видів до екстремального техногенного навантаження, запиленості, ущільнення ґрунту та коливань вологості, характерних для прилеглих до кар'єрів і відвалів територій. Функціональне призначення зони це первинна затримка промислового пилу та механічний захист нижчих ярусів насадження від прямого вітрового переносу забруднювачів. Наявність вільхи клейкої в цій зоні додатково забезпечує азотфіксувальну функцію, що є критично важливою для бідних на органічну речовину техногенних субстратів.

Зона II (100 – 500 м) є основним вуглеакумулюючим масивом і визначальним елементом всієї запропонованої моделі. Видовий склад поєднує п'ять видів у різних пропорціях: береза повисла (*Betula pendula* Roth., 35 %) як основна порода з найвищою питомою секвестраційною ефективністю, тополя біла (*Populus alba* L., 25 %) як швидкоростучий компонент, вільха клейка (*Alnus glutinosa*, 15 %) для підтримання азотного балансу, верба плакуча (*Salix babylonica* L., 15 %) для ділянок з підвищеним зволоженням та сосна звичайна (*Pinus sylvestris* L., 10 %) для забезпечення цілорічної секвестраційної функції. Прогнозована висота зрілого деревостану становить 18 – 28 м при кроці посадки 3×3 м для степових умов (Полтавський ГЗК) та 4×4 м для лісостепових (Центральний і Північний ГЗК), що відображає вищу потенційну густоту насаджень у більш сприятливих за вологозабезпеченістю умовах. Саме ця зона, завдяки найбільшій просторовій протяжності та найвищій питомій продуктивності деревостану, формує близько 70 – 75 % прогнозного приросту секвестрації при реалізації оптимального сценарію озеленення, що визначає її пріоритетність при плануванні практичних заходів розширення насаджень.

Зона III (500 – 800 м) виконує функцію відтворення природної структури байракових лісів, характерних для лісостепової зони Криворізького залізорудного басейну. Видовий склад на основі дуба звичайного (*Quercus robur* L.) та ясена звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) з кроком посадки 4×5 м і прогнозованою висотою 20 – 32 м забезпечує формування найбільш довговічного і стабільного вуглецевого резервуару серед усіх чотирьох зон, хоча темпи накопичення депо в перші десятиліття є нижчими порівняно з піонерними видами зони II. Для Полтавського ГЗК, де природні байракові угруповання відсутні, ця зона функціонально замінюється розширеним масивом видів зони II з акцентом на вербу плакучу в межах прилеглих заплавних ділянок.

Зона IV (800 – 1000 м) формує зовнішній хвойний бар'єр із сосни звичайної висотою 15 – 20 м при кроці посадки 3×3 м. Розміщення хвойної породи на периферії СЗЗ, де рівень техногенного навантаження є мінімальним, забезпечує цілорічну захисну і секвестраційну функцію незалежно від фенологічної фази, компенсуючи сезонне зниження фотосинтетичної активності листяних ярусів зон I – III у безлистяний період.

Загальний аеродинамічний профіль насадження це поступове зростання висоти деревостану від 3– 5 м (зона I) до максимуму 20 – 32 м (зона III) з подальшим помірним зниженням до 15 – 20 м (зона IV) створює умови для максимізації турбулентного осадження зваженого пилу в межах захисної смуги, одночасно забезпечуючи просторову та видову диференціацію секвестраційної функції відповідно до екологічних особливостей кожної зони [175].

Таким чином, запропонована чотиризонна просторова модель насаджень санітарно-захисних зон реалізує принцип багатофункціонального буфера, який поєднує три взаємодоповнюючі завдання, максимізацію вуглево-секвестраційного потенціалу, забезпечення пилогазозахисної функції та відновлення екологічної стійкості техногенно порушених ландшафтів без розширення інвазійного компонента флори. Диференційований підхід до підбору видового складу за зонами дозволяє узгодити фізіологічну стійкість окремих порід із градієнтом техногенного навантаження від найбільш толерантних піонерних видів безпосередньо біля джерела забруднення до довговічних аборигенних едифікаторів

на периферії, що забезпечує не лише ефективність поглинання вуглецю в коротко- і середньостроковій перспективі, а й довгострокову стабільність буферної екосистеми як цілісного природно-антропогенного утворення.

Отримані результати засвідчують, що буферні екосистеми санітарно-захисних зон гірничо-збагачувальних підприємств мають значний, проте принципово обмежений компенсаційний потенціал стосовно прямих викидів парникових газів. Навіть за умови повної реалізації оптимального сценарію озеленення жодне з трьох досліджуваних підприємств не досягає повної вуглецевої нейтральності виключно за рахунок екосистемної секвестрації, що підтверджує необґрунтованість розгляду природної компенсації як самостійної альтернативи технологічній декарбонізації. Водночас диференційований за зонами видовий склад насаджень, очищений від інвазійних видів та доповнений азотфіксувальним компонентом, формує методологічно обґрунтований і екологічно безпечний інструмент підвищення секвестраційної ефективності буферних екосистем, придатний для практичного впровадження на гірничо-збагачувальних підприємствах України в умовах наростання регуляторного тиску механізмів CBAM та EU ETS.

Висновки до розділу 3.

За результатами дослідження, проведеного у розділі 3, сформульовано такі висновки.

1. На підставі детального аналізу технологічних процесів виробництва залізорудних окатишів ідентифіковано два принципово різних механізми утворення прямих викидів CO_2 на досліджуваних підприємствах: паливний від спалювання природного газу в нагрівальному та технологічному обладнанні (метод М1), та процесний від термічної декарбонізації карбонатних мінералів шихти та вигоряння органічного вуглецю сировини при температурах 1 200 – 1 350°С (метод М4). Встановлено, що єдиною стадією, де реалізуються обидва механізми одночасно, є термічна обробка окатишів у випалювальних агрегатах.

2. За результатами проведених досліджень ідентифіковано та класифіковано за функціональними групами повний перелік джерел прямих викидів CO_2 трьох досліджуваних підприємств. Незважаючи на суттєву відмінність у кількості

джерел, спільною закономірністю є концентрація переважної частки прямих викидів Scope 1 у групі термічної обробки окатишів при незначній кількості одиниць відповідного обладнання, що відповідає загальногалузевій тенденції і підтверджує методологічну доцільність виділення випалювальних агрегатів як пріоритетних об'єктів вуглецевого менеджменту.

3. Визначальним чинником структурних відмінностей між підприємствами є тип виробленої продукції. Виробництво офлюсованих окатишів на ПрАТ «Полтавський ГЗК» та ПрАТ «Центральний ГЗК» зумовлює суттєву частку процесних викидів від декарбонізації вапняку, яка у 2023 р. склала 32,5 % та 44,6 % загального обсягу відповідно. Натомість виробництво неофлюсованих окатишів марки А1 на ПрАТ «Північний ГЗК» з мінімальною витратою вапняку (менше 0,6 % загальних викидів) визначає природний газ як практично єдине суттєве джерело прямих викидів (88,5 – 91,1 %), що принципово відрізняє стратегічний профіль декарбонізації цього підприємства від двох інших.

4. Розраховано прямі викиди CO_2 (Scope 1) трьох досліджуваних підприємств за методами М1 та М4 у розрізі матеріальних потоків за 2023 – 2025 рр.: ПрАТ «Полтавський ГЗК» – 234 304, 111 481 та 133 008 т CO_2; ПрАТ «Центральний ГЗК» – 57 710, 65 795 та 75 961 т CO_2; ПрАТ «Північний ГЗК» – 59 924, 81 627 та 90 478 т CO_2 відповідно. Сукупні викиди трьох підприємств становили 351 937 т CO_2 у 2023 р., скоротилися до 258 902 т (-26,4 %) у 2024 р. та частково відновилися до 299 448 т у 2025 р.

5. Динамічний аналіз виявив принципово різноспрямовані тенденції між підприємствами. ПрАТ «Полтавський ГЗК» демонструє значне скорочення обсягів виробництва у 2024 – 2025 рр. з різкою зміною рецептури шихти (питома витрата вапняку скоротилася у 5,7 рази), що є індикатором адаптації до умов воєнного часу. ПрАТ «Центральний ГЗК» стабільно нарощує виробництво офлюсованих окатишів з підвищеним вмістом вапняку в шихті. ПрАТ «Північний ГЗК» демонструє найвищу позитивну динаміку серед трьох підприємств: зростання викидів на 51,0 % за 2023 – 2025 рр. при одночасному зниженні питомого вуглецевого сліду до 27,4 кг CO_2/т окатишів у 2025 р. (-31,3 % відносно 2023 р.), що відображає ефект

нарощування масштабів виробництва при відносно сталих питомих витратах палива.

6. Питомий вуглецевий слід трьох підприємств у 2023 р. становив 39,0 – 39,9 кг CO_2/т окатишів і відповідає галузевому діапазону 35 – 45 кг CO_2/т, характерному для виробників, що не застосовують технологій глибокої декарбонізації. Порівняльний аналіз із провідними світовими виробниками (LKAB, Vale, Cleveland-Cliffs) засвідчує наявність значного потенціалу зниження питомих викидів, досяжного через впровадження найкращих доступних технологій та енергоефективних рішень.

7. Оцінка ризиків достовірності розрахунку виявила три групи ризиків, а саме методологічні, операційні та регуляторні. Основним джерелом методологічної невизначеності є застосування коефіцієнтів вмісту вуглецю рівня точності 1, відхилення яких від фактичного хімічного складу конкретних родовищ може становити ±30 – 50 % для карбонатних порід, що при частці вапняку 33 – 50 % у загальному обсязі викидів зумовлює результуючу похибку 4 – 28 % для Полтавського та Центрального ГЗК. Найвищий залишковий операційний ризик після застосування контрольних заходів залишається на ПрАТ «Центральний ГЗК» і пов'язаний з ручним введенням даних (161 т CO_2, рівень «середній»).

8. Встановлено, що буферні екосистеми трьох досліджуваних підприємств суттєво відрізняються за часткою деревно-чагарникового покриву. За результатами класифікації мультиспектральних знімків Sentinel-2 методом Random Forest встановлено, що деревно-чагарниковий компонент Полтавського ГЗК займає лише 8,0 % площі СЗЗ проти 31,4 % на Центральному та 31,8 % на Північному ГЗК. Визначальним чинником є природно-географічний контекст, степова зона Полтавського ГЗК обмежує природне деревне покриття, тоді як лісостепово-степова зона Криворізького басейну забезпечує розвиток байракових лісів і заплавних угруповань.

9. Аналіз сезонної динаміки вегетаційних індексів NDVI, SAVI та IRECI за трьома фенологічними фазами вегетаційного сезону 2025 р. виявив принципову відмінність між підприємствами. На Центральному та Північному ГЗК спостерігається виражений одновершинний фенологічний цикл із сезонною

амплітудою NDVI 0,0839 – 0,0847. Полтавський ГЗК демонструє практично нульову амплітуду NDVI (0,0050), що є прямим наслідком домінування оголеного ґрунту (50,1 % площі СЗЗ) і маскування сезонного сигналу деревостанів зональним усередненням. Серед трьох використаних індексів IRECI є найчутливішим фенологічним індикатором незалежно від частки деревного покриву в СЗЗ.

10. Розрахунок вуглецевого депо деревно-чагарникового покриву за ланцюжком NDVI→LAI→AGB→BGB з використанням алометричних рівнянь Лакиди П.І. та балансової корекції NDVI_дер засвідчив суттєві відмінності між підприємствами. ПрАТ «Центральний ГЗК» акумулює 178 924 т С (655 578 т CO_2-екв.), ПрАТ «Північний ГЗК» 61 961 т С (227 025 т CO_2-екв.), ПрАТ «Полтавський ГЗК» 31 323 т С (114 767 т CO_2-екв.). Найвище питоме депо (34,9 т С/га) зафіксовано для Полтавського ГЗК завдяки концентрації деревостанів у найсприятливіших мікроумовах заплавних ділянок.

11. Річна секвестрація вуглецю деревно-чагарниковим покривом СЗЗ, розрахована за нормативним методом МГЕЗК з коефіцієнтами Лакиди П.І., становить для ПрАТ «Центральний ГЗК» 12 044,7 т С/рік (44 131,8 т CO_2-екв./рік), для ПрАТ «Північний ГЗК» 4 673,3 т С/рік (17 123 т CO_2-екв./рік), для ПрАТ «Полтавський ГЗК» 1 471,1 т С/рік (5 390,1 т CO_2-екв./рік). Сумарна річна секвестрація трьох СЗЗ становить 18 189,1 т С/рік. Коефіцієнт компенсації прямих викидів Scope 1 складає 58,1 % для Центрального, 18,9 % для Північного та 4,1 % для Полтавського ГЗК, середній по трьох підприємствах 22,3 %. Зіставлення абсолютних показників засвідчило, що навіть за найвищого коефіцієнта компенсації некомпенсований залишок прямих викидів становить десятки тисяч тонн CO_2 щорічно, що підтверджує принципову обмеженість екосистемної компенсації як самостійного інструменту досягнення вуглецевої нейтральності.

12. Достовірність нормативного методу підтверджено незалежною польовою дендрологічною інвентаризацією зелених насаджень 13 видів модельної ділянки з обробкою в програмному комплексі i-Tree Eco v6. Питоме депо за i-Tree Eco (41,6 т С/га) є близьким до розрахованого нормативним методом (40,7 – 19,9 т С/га залежно від підприємства та частки деревостану в СЗЗ). Після корекції на коефіцієнт відкрито зростаючих дерев питома секвестрація нормативного методу

(0,98 т С/га крон/рік) задовільно узгоджується з результатами i-Tree Eco (1,21 т С/га крон/рік), що підтверджує методологічну обґрунтованість застосованого підходу.

13. Регресійний аналіз залежності $C = a \times DBH^b$ для п'яти домінуючих порід ($n = 109$, $R^2 = 0,866 – 0,983$) засвідчив непропорційне зростання річної секвестрації зі збільшенням діаметру стовбура, подвоєння DBH збільшує секвестрацію у 2,3 – 3,0 рази залежно від виду. Найвищу абсолютну секвестрацію серед досліджених порід демонструє акація біла (*Robinia pseudoacacia*), однак з огляду на її інвазійний статус в Україні цей вид виключено з рекомендованого видового складу перспективних насаджень. Найвищу питому секвестраційну ефективність серед аборигенних альтернатив (2,237 кг С/рік на 100 см² DBH) демонструє береза повисла (*Betula pendula*), що визначило її обрання як основної піонерної породи для подальшого озеленення.

14. На підставі оцінки дефіциту озеленення відносно нормативних вимог ДСП-173-96 (зі змінами, наказ МОЗ № 40 від 13.01.2026 р.) та результатів регресійного аналізу розроблено сценарну модель підвищення вуглево-компенсаційного потенціалу СЗЗ. Оптимальний сценарій (озеленення 100 % дефіцитної площі) забезпечує зростання коефіцієнта компенсації до 19,0 % для Полтавського, 79,5 % для Центрального та 25,4 % для Північного ГЗК. Розроблено стандартизований уніфікований видовий склад насаджень, очищений від інвазійних видів (*Robinia pseudoacacia, Elaeagnus angustifolia*) та доповнений азотфіксувальним компонентом (*Alnus glutinosa*) для компенсації втраченої екосистемної функції. Запропонована чотиризонна просторова структура насаджень з диференційованим видовим складом реалізує принцип багатофункціонального буфера і забезпечує синергію вуглецево-секвестраційної та пилогазозахисної функцій СЗЗ в умовах техногенного навантаження залізорудних підприємств.

РОЗДІЛ 4
РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОПТИМІЗАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВОГО БАЛАНСУ ТЕРИТОРІЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

4.1. Вуглецевий баланс досліджуваних гірничо-збагачувальних комбінатів

Річний вуглецевий баланс гірничо-збагачувального підприємства у межах цього дослідження визначається як різниця між річними прямими викидами CO_2 від виробничої діяльності та річною секвестрацією CO_2 деревно-чагарниковим покривом санітарно-захисної зони [176, 177]. Комплексна оцінка цього балансу формує кількісну основу для розробки стратегій декарбонізації та обґрунтування природоохоронних заходів. Відповідно до методологічних меж дослідження, встановлених у розділі 2, вуглецевий баланс трьох досліджуваних підприємств розраховується в межах прямих викидів CO_2 (Scope 1) у рамках облікових доменів ВД01 (спалювання палива в установках із загальною номінальною тепловою потужністю понад 20 МВт) та ВД02 (випалювання або спікання металевої руди).

Як компенсаційна складова балансу враховується річна секвестрація вуглецю деревно-чагарниковим покривом СЗЗ, розрахована за нормативним методом МГЕЗК із застосуванням алометричних коефіцієнтів Лакиди П.І. та верифікована польовими даними i-Tree Eco. Зведені результати вуглецевого балансу трьох досліджуваних підприємств за 2023 – 2025 рр. наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Вуглецевий баланс санітарно-захисних зон досліджуваних ГЗК

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК	Разом
1	2	3	4	5
Прямі викиди CO_2, т CO_2/рік				
2023 р.	234 303,71	57 709,51	59 924,25	351 937
2024 р.	111 480,55	65 795,17	81 626,53	258 902

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
2025 р.	133 008,41	75 961,13	90 478,44	299 448
Річна секвестрація вуглецю СЗЗ, т CO_2-екв./рік				
Ліси, т С/рік	1 365,4	5 463,5	2 182,2	9 011,1
Чагарники, т С/рік	105,7	6 581,2	2 491,0	9 177,9
Загальна секвестрація, т С/рік	1 471,1	12 044,7	4 673,3	18 189,1
Загальна секвестрація, т CO_2-екв./рік	5 390	44 132	17 123	66 645
Нетто-вуглецевий баланс				
Прямі викиди Scope 1, т CO_2	133 008	75 961	90 478	299 447
Секвестрація СЗЗ, т CO_2-екв.	5 390	44 132	17 123	66 645
Некомпенсовані нетто-баланс, т CO_2-екв.	127 618	31 829	73 355	232 803
Коефіцієнт компенсації, %	4,1	58,1	18,9	22,3

Джерело: розроблено автором

Аналіз даних таблиці 4.1 засвідчує принципову відмінність вуглецевого балансу між трьома досліджуваними підприємствами як за абсолютними показниками, так і за структурою формуючих компонентів. Загальна тенденція є спільною для всіх підприємств, прямі викиди Scope 1 перевищують річну секвестрацію СЗЗ. Всі підприємства характеризуються додатними некомпенсованими нетто-викидами. Разом з тим ступінь цього дефіциту та динаміка його зміни у 2023 – 2025 рр. між підприємствами суттєво різняться. ПрАТ «Полтавський ГЗК» характеризується найбільшим абсолютним дефіцитом. У 2025 р. некомпенсовані нетто-викиди становлять 127 618 т CO_2-екв./рік при коефіцієнті компенсації лише 4,1 %. Основним чинником такого результату є поєднання двох факторів, значного обсягу прямих викидів Scope 1 (133 008 т CO_2/рік у 2025 р., хоча це лише 56,8 % від рекордного рівня 2023 р. – 234 304 т CO_2) та мінімальної серед трьох підприємств площі деревно-чагарникового покриву СЗЗ (897,81 га, або 8,0 % від загальної площі СЗЗ 11 269,60 га секве). Водночас різке скорочення викидів у 2024 р. до 111 481 т CO_2 (-52,4 % від 2023 р.) і часткове відновлення у 2025 р. відображає реальну зміну виробничої програми підприємства в умовах воєнного часу.

ПрАТ «Центральний ГЗК» демонструє принципово інший характер балансу, коефіцієнт компенсації становить 58,1 %, що є найвищим серед трьох досліджуваних підприємств. Це означає, що СЗЗ щорічно поглинає майже три п'ятих від обсягу прямих викидів підприємства. Такий результат зумовлений одночасною дією двох чинників: відносно помірним рівнем прямих викидів (75 961 т CO_2/рік у 2025 р.) та найбільшою серед трьох об'єктів площею деревно-чагарникового покриву СЗЗ (9 005,26 га, або 31,4 % від загальної площі зони 28 637,53 га). Слід відзначити, що попри стабільне зростання абсолютних викидів упродовж 2023 – 2025 рр. (+31,6 %), коефіцієнт компенсації залишається найвищим серед трьох підприємств завдяки значному секвестраційному потенціалу СЗЗ. Показник некомпенсованих нетто-викидів у 2025 р. становить -31 829 т CO_2-екв./рік, що є найнижчим абсолютним дефіцитом серед досліджуваних підприємств.

ПрАТ «Північний ГЗК» посідає проміжну позицію за коефіцієнтом компенсації (18,9 %) при некомпенсованих нетто-викидах -73 355 т CO_2-екв./рік у 2025 р. Характерною особливістю підприємства є ннайвищий темп зростання абсолютних викидів серед трьох ГЗК: зростання з 59 924 т CO_2 у 2023 р. до 90 478 т CO_2 у 2025 р. (+51,0 %), що відображає зростання обсягів виробництва та реалізації продукції. Площа деревно-чагарникового покриву СЗЗ (3 463,86 га, або 31,8 % від загальної площі зони 10 890,10 га) є порівнянною з Центральним ГЗК за відносними показниками, однак значно меншою в абсолютному вираженні, що і визначає нижчий коефіцієнт компенсації. Питома секвестрація (1,349 т С/га/рік) практично ідентична показнику Центрального ГЗК (1,338 т С/га/рік), підтверджуючи однорідність методологічної бази для підприємств лісостепово-степової зони Дніпропетровської області.

У сукупності некомпенсовані нетто-викиди трьох підприємств у 2025 р. становлять -232 803 т CO_2-екв./рік при загальному коефіцієнті компенсації 22,3 %. Це означає, що буферні екосистеми СЗЗ щорічно поглинають близько чверті прямих викидів Scope 1 трьох ГЗК. Динаміка балансу упродовж 2023 – 2025 рр. демонструє суперечливі тенденції, якщо у Полтавського ГЗК нетто-дефіцит різко скоротився у 2024 р. внаслідок падіння виробництва, то у Центрального та

Північного ГЗК він стабільно зростав відповідно до нарощування виробничих потужностей. Накопичене вуглецеве депо СЗЗ трьох підприємств у сукупності становить 997 370 т CO_2-екв., що у 3,3 рази перевищує річний обсяг прямих викидів, однак є статичним показником і не може використовуватися для оцінки поточного компенсаційного ефекту.

Отримані результати вуглецевого балансу дозволяють сформулювати ключові висновки щодо природи вуглецевого дефіциту та шляхів його скорочення. По-перше, визначальним чинником коефіцієнта компенсації є не продуктивність наявних деревостанів (питома секвестрація у всіх трьох підприємств знаходиться в діапазоні 1,3 – 1,6 т С/га/рік), а площа деревно-чагарникового покриву СЗЗ та абсолютний обсяг прямих викидів підприємства. По-друге, підвищення коефіцієнта компенсації для Полтавського ГЗК вимагає насамперед розширення площі насаджень СЗЗ як найефективнішого заходу з мінімальними інвестиціями, тоді як для Центрального та Північного ГЗК пріоритетними є технологічні заходи скорочення викидів. По-третє, всі три підприємства потенційно можуть суттєво підвищити коефіцієнт компенсації шляхом комбінування заходів скорочення викидів із розширенням буферних екосистем СЗЗ до нормативного рівня озеленення.

4.2. Відбір та оцінка пріоритетних НДТМ для оптимізації вуглецевого балансу

Відбір пріоритетних найкращих доступних технологій та методів (НДТМ) для оптимізації вуглецевого балансу досліджуваних гірничо-збагачувальних комбінатів здійснено у чотири послідовні етапи: ідентифікація потенційних НДТМ на основі галузевих довідкових документів, формування системи критеріїв оцінки, багатокритеріальна оцінка та ранжування НДТМ, диференційований відбір пріоритетів для кожного підприємства з урахуванням структури його викидів. Нормативно-методологічну основу відбору становлять: довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (BREF) для виробництва чавуну та сталі, Директива 2010/75/ЄС про промислові викиди, методологія

МГЕЗК [178]. Додатково використано аналіз граничної кривої вартості скорочення викидів (MACC) за методикою McKinsey та систематизований світовий досвід провідних виробників залізорудних окатишів LKAB (Швеція), Vale (Бразилія) та Cleveland-Cliffs (США) [179].

Система критеріїв оцінки НДТМ структурована за трьома групами з відповідними ваговими коефіцієнтами, що відображають пріоритети декарбонізації в умовах євроінтеграції та вимог механізму CBAM (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Система критеріїв багатокритеріальної оцінки НДТМ

№	Критерій оцінки	Ваговий коефіцієнт	Шкала оцінки	Обґрунтування
Група 1. Екологічна ефективність (сумарна вага 0,40)				
1.1	Потенціал зниження викидів CO_2, %	0,20	1 – 5 балів	Ключовий параметр декарбонізаційного потенціалу
1.2	Відповідність цільовим категоріям викидів підприємства	0,20	1 – 5 балів	Забезпечує адресність заходу для конкретного ГЗК
Група 2. Технічна здійсненність (сумарна вага 0,30)				
2.1	Рівень технологічної готовності	0,15	1 – 5 балів	Відображає готовність технології до промислового впровадження
2.2	Складність інтеграції в існуючу технологічну схему	0,15	1 – 5 балів (обернена)	Враховує обмеження модернізації діючих ліній
Група 3. Економічна доцільність (сумарна вага 0,30)				
3.1	Питома вартість скорочення викидів, €/т CO_2	0,15	1 – 5 балів (обернена)	Відображає економічну привабливість заходу
3.2	Термін окупності капіталовкладень, років	0,15	1–5 балів (обернена)	Критичний в умовах обмеженого інвестиційного ресурсу

Джерело: розроблено автором

Аналізуючи дані таблиці варто зазначити, що групі екологічної ефективності присвоєно сумарну вагу 0,40, оскільки саме зниження викидів CO_2 є кінцевою метою оптимізації вуглецевого балансу та безпосередньо визначає CBAM-навантаження на продукцію. Рівна вага критеріїв 1.1 та 1.2 (по 0,20) відображає принцип адресності, адже технологія з високим загальним потенціалом, але невідповідна цільовим категоріям викидів конкретного підприємства, не може

вважатися пріоритетною. Групі технічної здійсненності призначено вагу 0,30 з урахуванням специфіки умов воєнного часу, коли обмежений доступ до зовнішнього інжинірингу та складність залучення міжнародних підрядників підвищують значущість рівня технологічної готовності. Вага групи економічної доцільності 0,30 відображає реальні інвестиційні обмеження підприємств, що функціонують в умовах зниженого завантаження потужностей.

На першому етапі ідентифіковано сім НДТМ, що мають доведений потенціал скорочення викидів CO_2 при виробництві залізорудних окатишів та технологічну придатність до умов українських ГЗК. Результати багатокритеріальної оцінки наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати багатокритеріальної оцінки НДТМ

№	НДТМ	К 1.1	К 1.2	К 2.1	К 2.2	К 3.1	К 3.2	Зважена оцінка
	Ваговий коефіцієнт	0,20	0,20	0,15	0,15	0,15	0,15	max = 5,00
1	Регенеративні пальникові системи	4	5	5	3	3	3	3,85
2	Комплексна рекуперація тепла відхідних газів	4	5	5	3	3	2	3,70
3	Системи прогнозного автоматизованого управління (MPC)	3	5	4	4	5	5	4,15
4	Система енергоменеджменту	2	5	5	5	5	5	4,25
5	Часткове заміщення природного газу біомасою (5 – 10%)	2	4	4	4	4	4	3,60
6	Оптимізація складу шихти зі зниженням витрат вапняку	4	3	4	4	5	5	3,95
7	Валкові преси високого тиску для подрібнення сировини	2	3	4	3	3	3	2,90

Джерело: розроблено автором

Аналіз результатів оцінки виявляє чітку ієрархію НДТМ за інтегральним показником привабливості. Найвищу зважену оцінку отримала система енергоменеджменту (4,25 бали), що зумовлено поєднанням максимальних значень за критеріями технічної здійсненності та економічної доцільності. Впровадження стандарту не потребує капіталоємних технічних перетворень і забезпечує від'ємну

питому вартість скорочення викидів за рахунок економії паливно-енергетичних ресурсів. На другій позиції системи прогнозного автоматизованого управління МРС (4,15 бали), які також характеризуються відносно низькими капіталовкладеннями при значному потенціалі оптимізації теплових режимів випалювальних агрегатів. Регенеративні пальникові системи (3,85 бали) та оптимізація складу шихти (3,95 бали) забезпечують вищий абсолютний потенціал скорочення викидів, ніж ISO 50001 і МРС, проте поступаються їм за критеріями економічної доцільності через вищу капіталоємність або технологічну специфіку впровадження. Комплексна рекуперація тепла відхідних газів (3,70 бали) та часткове заміщення природного газу біомасою (3,60 бали) утворюють середній кластер. Валкові преси (2,90 бали) отримали найнижчу оцінку серед розглянутих НДТМ, оскільки їх ефект реалізується переважно у скороченні Scope 2 (електроенергія), що виходить за межі встановлених методологічних меж дослідження. Таким чином, п'ять НДТМ із зваженою оцінкою ≥ 3,70 балів (ISO 50001, МРС, регенеративні пальники, оптимізація шихти, рекуперація тепла) утворюють пріоритетний портфель заходів для детального аналізу на рівні окремих підприємств.

Загальна оцінка НДТМ є необхідною, але недостатньою умовою для формування стратегії декарбонізації конкретного підприємства. Критерій 1.2 (відповідність цільовим категоріям викидів) набуває вирішального значення при диференційованому відборі, оскільки структура Scope 1 суттєво відрізняється між трьома досліджуваними ГЗК. Ця структурна диференціація безпосередньо визначає релевантність та пріоритетність НДТМ для кожного підприємства. Так, оптимізація складу шихти зі зниженням витрат вапняку є НДТМ першого пріоритету для Центрального ГЗК (де вапняк формує понад половину викидів), важливим заходом для Полтавського ГЗК (третина викидів у 2023 р.) і практично нерелевантною для Північного ГЗК (частка вапняку незначна). Водночас технології скорочення газових викидів (регенеративні пальники, рекуперація тепла, МРС, біомаса) мають найвищий абсолютний ефект на Полтавському та Північному ГЗК [180]. Результати диференційованого відбору наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Диференційований відбір пріоритетних НДТМ для досліджуваних підприємств

НДТМ	ПрАТ «Полтавський ГЗК»	ПрАТ «Центральний ГЗК»	ПрАТ «Північний ГЗК»	Пріоритет впровадження
ISO 50001 – система енергоменеджменту	Пріоритет 1. Охоплює всі джерела ВД01 (котли, нагрівачі, різаки). Потенціал: 6 650 – 10 640 т CO_2/рік	Пріоритет 1. 40 котлів ВД01 + 1 обпалювальна машина. Потенціал: 3 800 – 6 077 т CO_2/рік	Пріоритет 1. 14 котлів ВД01 + 2 машини LURGI. Потенціал: 4 524 – 7 238 т CO_2/рік	Всі три підприємства – вищий
МРС – системи прогнозного управління	Пріоритет 1. 4 трубчасті печі – різнорідні теплові профілі. Потенціал: 8 400 – 15 750 т CO_2/рік	Пріоритет 1. Єдина ОК-324 – найбільший ефект від МРС. Потенціал: 2 520 – 4 725 т CO_2/рік	Пріоритет 1. Дві машини LURGI синхронізований контроль. Потенціал: 6 480 – 12 150 т CO_2/рік	Всі три підприємства – вищий
Регенеративні пальникові системи	Пріоритет 2. 4 трубчасті печі з індивідуальними пальниками. Потенціал: 21 000 – 31 500 т CO_2/рік	Пріоритет 2. Пальники ОК-324 можлива поетапна заміна. Потенціал: 6 300 – 9 450 т CO_2/рік	Пріоритет 2. Пальники LURGI 552A та 552B. Потенціал: 16 200 – 24 300 т CO_2/рік	Всі три підприємства – вищий
Комплексна рекуперація тепла відхідних газів	Пріоритет 2. Кільцеві охолоджувачі значний тепловий потенціал. Потенціал: 15 750 – 26 250 т CO_2/рік	Пріоритет 2. Охолоджувальна зона ОК-324. Потенціал: 4 725 – 7 875 т CO_2/рік	Пріоритет 2. Охолоджувальна зона LURGI. Потенціал: 12 150 – 20 250 т CO_2/рік	Всі три підприємства – вищий
Оптимізація складу шихти зі зниженням вапняку	Пріоритет 1. Частка вапняку у 2023 р. – 32,5% викидів. Потенціал: 4 500 – 6 000 т CO_2/рік	Пріоритет 1 (найвищий). Частка вапняку 50,1 – 51,2% викидів. Потенціал: 11 700 – 15 600 т CO_2/рік	Не актуально. Частка вапняку < 0,6% викидів. Потенціал: < 200 т CO_2/рік	ПГЗК, ЦГЗК вищий; ПІВНІГЗК не застосовується
Часткове заміщення природного газу біомасою (5 – 10%)	Пріоритет 3. Досвід впровадження є (лушпиння соняшнику). Потенціал: 5 250 – 10 500 т CO_2/рік	Пріоритет 3. Потребує відповідного обладнання. Потенціал: 1 575 – 3 150 т CO_2/рік	Пріоритет 3. Найбільший абсолютний ефект завдяки домінуванню газу. Потенціал: 4 050 – 8 100 т CO_2/рік	Всі три підприємства – середній
Валкові преси для подрібнення сировини	Пріоритет 4. 5 млинових трактів + сушильні барабани. Ефект: Scope 2	Пріоритет 4. 4 млини Ш-50. Ефект: Scope 2	Пріоритет 4. Мінімальна підготовка шихти. Менш пріоритетно	Всі три підприємства – нижчий (Scope 2)

Джерело: розроблено автором

Аналіз диференційованого відбору (табл. 4.4) виявляє принципові відмінності у конфігурації пріоритетного набору НДТМ між підприємствами. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК» пріоритетний набір першого рівня складається з п'яти НДТМ: ISO 50001, МРС, регенеративні пальники, рекуперація тепла та оптимізація шихти. Висока кількість джерел ВД01 обумовлює максимальний потенціал від

впровадження ISO 50001 серед трьох підприємств. Для ПрАТ «Центральний ГЗК» визначальною є унікальна структура викидів з домінуванням вапняку (51,2 % у 2025 р.), що висуває оптимізацію складу шихти на позицію НДТМ найвищого пріоритету з найбільшим абсолютним потенціалом серед усіх заходів для цього підприємства. Для ПрАТ «Північний ГЗК» основним об'єктом управління викидами є природний газ, що формує 91,1 % Scope 1. Це визначає найвищий серед трьох підприємств абсолютний потенціал від впровадження регенеративних пальників та рекуперації тепла. Оптимізація шихти є практично нерелевантною для цього підприємства, оскільки воно виробляє виключно неофлюсовані окатиші без застосування вапняку як флюсуючого компонента.

Для кількісного обґрунтування доцільності впровадження відібраних НДТМ здійснено розрахунок потенціалу скорочення прямих викидів CO_2 в абсолютному вираженні для кожного підприємства. Зведені результати наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Зведений потенціал скорочення прямих викидів CO_2 від впровадження пріоритетних НДТМ (на основі Scope 1, 2025 р.)

НДТМ	ПГЗК, т CO_2/рік		ЦГЗК, т CO_2/рік		ПІВНІГЗК, т CO_2/рік		Період
	мін.	макс.	мін.	макс.	мін.	макс.	
1. ISO 50001	6 650	10 640	3 800	6 077	4 524	7 238	2025 – 2027 рр.
2. МРС системи	8 400	15 750	2 520	4 725	6 480	12 150	2025 – 2027 рр.
3. Оптимізація шихти (зниження вапняку)	4 500	6 000	11 700	15 600	< 200	< 200	2025 – 2027 рр.
4. Регенеративні пальникові системи	21 000	31 500	6 300	9 450	16 200	24 300	2027 – 2029 рр.
5. Рекуперація тепла відхідних газів	15 750	26 250	4 725	7 875	12 150	20 250	2027 – 2029 рр.
6. Біомаса 5 – 10%	5 250	10 500	1 575	3 150	4 050	8 100	2029 – 2034 рр.
Разом (НДТМ 1 – 6, без врахування синергії)	61 550	100 640	30 620	46 877	43 404	72 038	
Частка від Scope 1 2025 р., %	46,3	75,7	40,3	61,7	48,0	79,6	

Джерело: розроблено автором

Аналіз даних таблиці 4.5 засвідчує значний сукупний потенціал скорочення прямих викидів CO_2 при послідовному впровадженні шести пріоритетних НДТМ. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК» сумарний потенціал становить 61 550 – 100 640 т CO_2/рік, що відповідає 46,3 – 75,7 % поточного обсягу Scope 1. Найбільший внесок забезпечують регенеративні пальникові системи (21 000 – 31 500 т CO_2/рік) та

рекуперація тепла (15 750 – 26 250 т CO_2/рік) завдяки домінуванню природного газу у структурі викидів [181].

Для ПрАТ «Центральний ГЗК» сумарний потенціал становить 30 620 – 46 877 т CO_2/рік (40,3 – 61,7 % Scope 1). Визначальним заходом є оптимізація шихти (11 700 – 15 600 т CO_2/рік) найвищий абсолютний внесок серед усіх НДТМ для цього підприємства, що відображає унікальну структуру його викидів з домінуванням карбонатних процесних викидів. За максимальний оцінок ефективності одночасне впровадження ISO 50001 та МРС та оптимізації складу шихти може скоротити прямі викиди Центрального ГЗК приблизно до 49,6 600 т CO_2/рік, внаслідок чого коефіцієнт компенсації може зрости орієнтовно до 89%.

Для ПрАТ «Північний ГЗК» сумарний потенціал є найбільшим в абсолютному вираженні серед трьох підприємств 43 404 – 72 038 т CO_2/рік (48,0 – 79,6 % Scope 1), що зумовлено великим абсолютним обсягом газових викидів. Регенеративні пальники (16 200 – 24 300 т CO_2/рік) та рекуперація тепла (12 150 – 20 250 т CO_2/рік) формують майже 65 % сумарного потенціалу.

Слід зазначити, що наведені діапазони потенціалу характеризують сумарний потенціал окремих НЖТМ без урахування можливого перекриття їхніх ефектів. Тому отримані значення слід розглядати як орієнтовно верхні оцінки, а не як гарантований сукупний результат одночасного впровадження заходів.

Таким чином, результати відбору та оцінки пріоритетних НДТМ підтверджують, що технологічний потенціал скорочення прямих викидів CO_2 є достатнім для суттєвого покращення вуглецевого балансу всіх трьох досліджуваних підприємств.

4.3. Моделювання сценаріїв оптимізації вуглецевого балансу промислових територій

Для оцінки ефективності стратегій декарбонізації залізорудних гірничо-збагачувальних комбінатів розроблено динамічну балансову модель вуглецевого балансу на період 2025 – 2055 рр. Модель описує динаміку різниці між прямими

викидами парникових газів Scope 1 та вуглепоглинальною здатністю буферних екосистем [182, 183, 184].

Розрахунок виконано за методикою, викладеною в підрозділі 2.5. Базовими вхідними даними моделі є верифіковані показники розділів 3 і 4 дисертації, зведені у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Вхідні параметри моделі сценарного прогнозування вуглецевого балансу (базовий 2025 рік)

Показник	Полтавський ГЗК	Центральний ГЗК	Північний ГЗК
Прямі викиди (E_0), т CO_2/рік	133 008	75 961	90 478
Поточна секвестрація СЗЗ (S_0), т CO_2-екв./рік	5 390	44 132	17 123
Базовий коефіцієнт компенсації ($Kcomp_0$), %	4,1	58,1	18,9
Норма секвестрації нових насаджень, т С/га/рік	1,5	1,8	1,8
Площа нових насаджень, га	3 606,3	2 462,8	894,0

Джерело: розроблено автором

Аналіз даних таблиці 4.6 виявляє суттєву відмінність вихідних позицій трьох підприємств за ключовими параметрами моделі. Полтавський ГЗК характеризується найвищим рівнем прямих викидів (133 008 т CO_2/рік) у поєднанні з найнижчою поточною секвестрацією (5 390 т CO_2-екв./рік), що формує найгірше співвідношення E_0/S_0 серед трьох підприємств і обумовлює його мінімальний базовий коефіцієнт компенсації (4,1%). Натомість Центральний ГЗК демонструє протилежну конфігурацію: найнижчий рівень викидів (75 961 т CO_2/рік) при найвищій поточній секвестрації (44 132 т CO_2-екв./рік), що забезпечує йому найвищий стартовий $Kcomp_0$ (58,1%) і, відповідно, найкращі вихідні передумови для досягнення вуглецевої нейтральності в межах прогнозного горизонту. Площа нових насаджень для Полтавського ГЗК (3 606,3 га) є найбільшою серед трьох підприємств, водночас норма секвестрації для нього найнижча (1,5 т С/га/рік проти 1,8 т С/га/рік для двох інших). Це поєднання найбільшого дефіциту озеленення при найменшій продуктивності насаджень пояснює, чому навіть значне абсолютне розширення площі насаджень забезпечує для цього підприємства лише обмежений

приріст коефіцієнта компенсації порівняно з Центральним та Північним ГЗК, де менша за абсолютною величиною площа нових насаджень (2 462,8 га та 894,0 га відповідно) поєднується з вищою нормою секвестрації лісостепової зони.

Таким чином, вихідні параметри моделі підтверджують встановлену в розділі 4 закономірність, а саме розбіжність компенсаційного потенціалу між підприємствами визначається не лише масштабом запланованих заходів озеленення, а насамперед комбінацією початкового рівня викидів, наявної бази секвестрації та природно-кліматичних обмежень продуктивності насаджень, що і формує основу для подальшого сценарного моделювання динаміки вуглецевого балансу.

Враховуючи встановлену відмінність вихідних позицій, подальше моделювання динаміки вуглецевого балансу здійснено для п'яти альтернативних сценаріїв, що відображають різні комбінації технологічних та екосистемних заходів декарбонізації:

1. Сц1 Базовий сценарій $E = E_0 = \text{const}$, $S = S_0 = \text{const}$;

2. Сц2 Зростання виробництва – E зростає на 2 % щорічно при незмінній питомій вуглеємності;

3. Сц3 Лише озеленення $E = E_0 = \text{const}$, S збільшується від нових насаджень;

4. Сц4 НДТМ + озеленення поєднує поетапне зниження E через найкращі доступні технології та зростання S;

5. Сц5 Довгостроковий розширює Сц4 на 2025 – 2055 рр. з впровадженням CCS/H_2 після 2035 р.

На Рис. 5.1 представлено динаміку вуглецевого балансу ВБ(t) для трьох підприємств за чотирма сценаріями на період 2025 – 2035 рр.

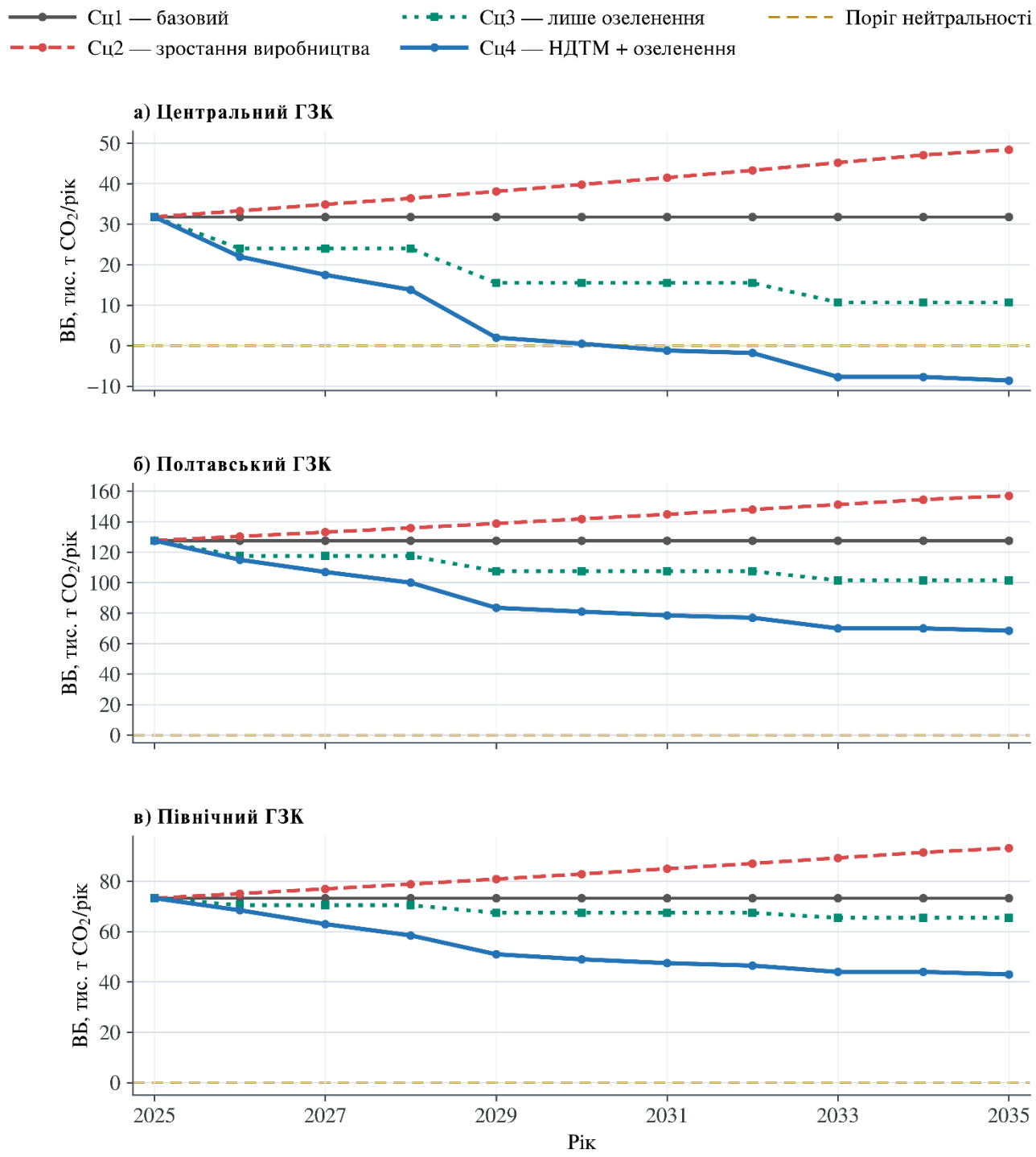


Рис. 4.1. Динаміка вуглецевого балансу ВБ(t) за сценаріями Сц1 – Сц4

Аналіз рис. 4.1 свідчить, що Сц2 (зростання виробництва) призводить до поступового збільшення абсолютних викидів на 20 – 22 % до 2035 р., незважаючи на низьку питому вуглеємність. Сц4 забезпечує найбільш суттєве покращення ВБ завдяки синергії технологічної та екосистемної декарбонізації.

Динаміку коефіцієнта компенсації Kcomp(t) наведено на рис. 4.2.

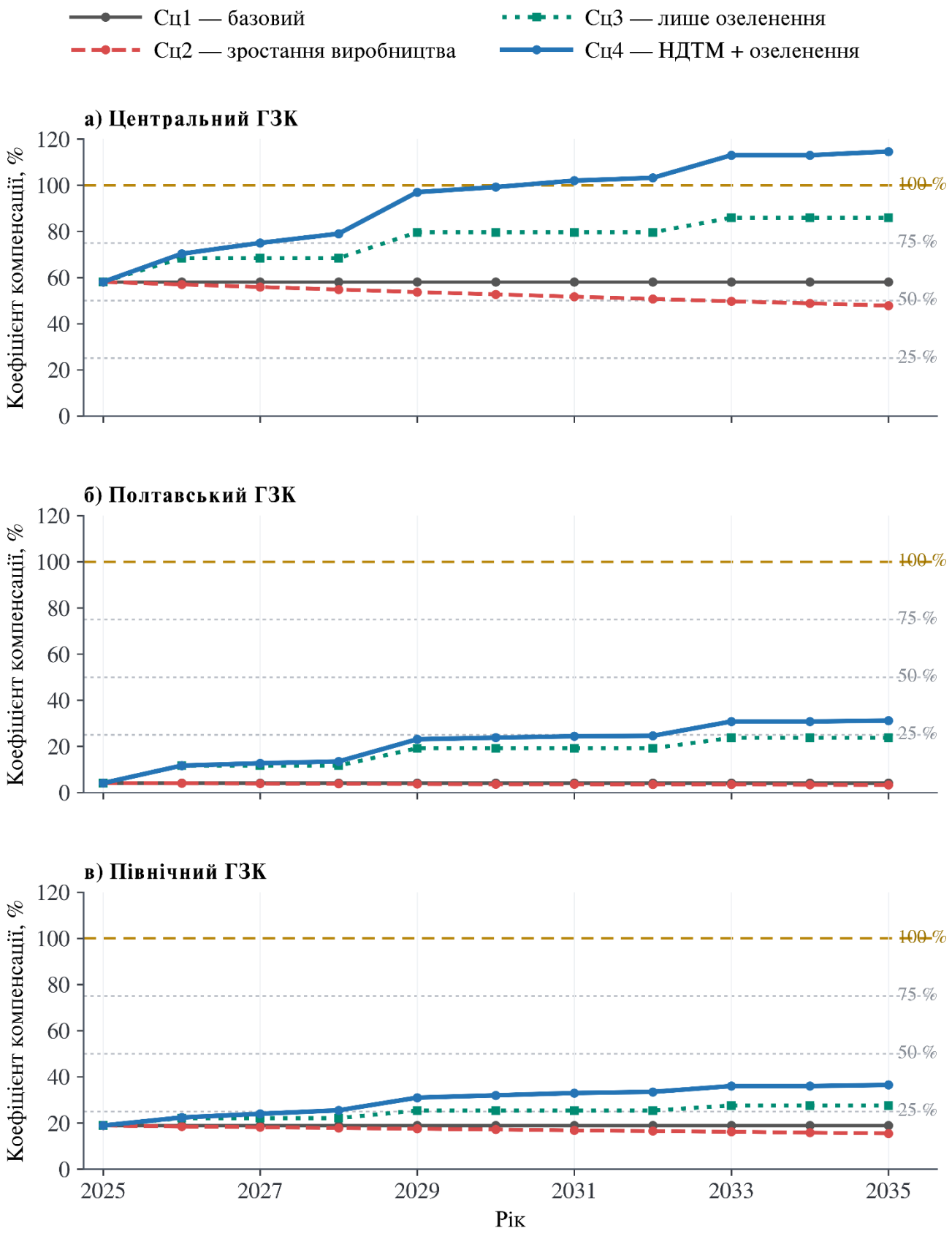


Рис. 4.2. Динаміка коефіцієнта компенсації Kcomp(t) за сценаріями Сц1 – Сц4

Аналіз рисунка 4.2 виявляє принципову відмінність у траєкторіях коефіцієнта компенсації між трьома підприємствами. Для Центрального ГЗК сценарій Сц4 демонструє стійке зростання Kcomp(t) із перетином порогу «переважної компенсації» (75 %) вже у 2029 р. та подальшим виходом за межу повної компенсації (100 %) у 2030 – 2031 рр., досягаючи 114,6 % до 2035 р.

Натомість для Полтавського та Північного ГЗК жодний з розглянутих сценаріїв до 2035 р. не наближається навіть до порогу часткової компенсації (25 %) по лінії Сц1 – Сц2, а Сц4 для обох підприємств стабілізується в діапазоні 31 – 37 %, що суттєво нижче за відповідний показник Центрального ГЗК. Розходження траєкторій Сц3 і Сц4 після 2029 р. для всіх трьох підприємств засвідчує накопичувальний характер ефекту НДТМ, який реалізується поступово відповідно до прийнятого графіка впровадження. Принципово важливим є контраст між Сц2 (зростання виробництва) та рештою сценаріїв для Центрального ГЗК лінія Сц2 демонструє стійке знижування Kcomp(t) з 58,1 % до 47,8 % попри незмінну питому вуглеємність, що ілюструє ефект «розмивання» компенсаційного потенціалу за відсутності компенсаційного розширення площі насаджень пропорційно зростанню обсягів виробництва. Для Полтавського та Північного ГЗК аналогічна тенденція виражена слабше в абсолютних величинах, однак зберігає той самий напрямок, підтверджуючи універсальність встановленої закономірності, екстенсивне зростання виробництва без супутніх компенсаційних заходів систематично знижує коефіцієнт компенсації незалежно від вихідного рівня секвестраційного потенціалу підприємства. На Рис. 4.3 показано довгострокову траєкторію вуглецевого балансу за Сц4 та Сц5 на період до 2055 р.

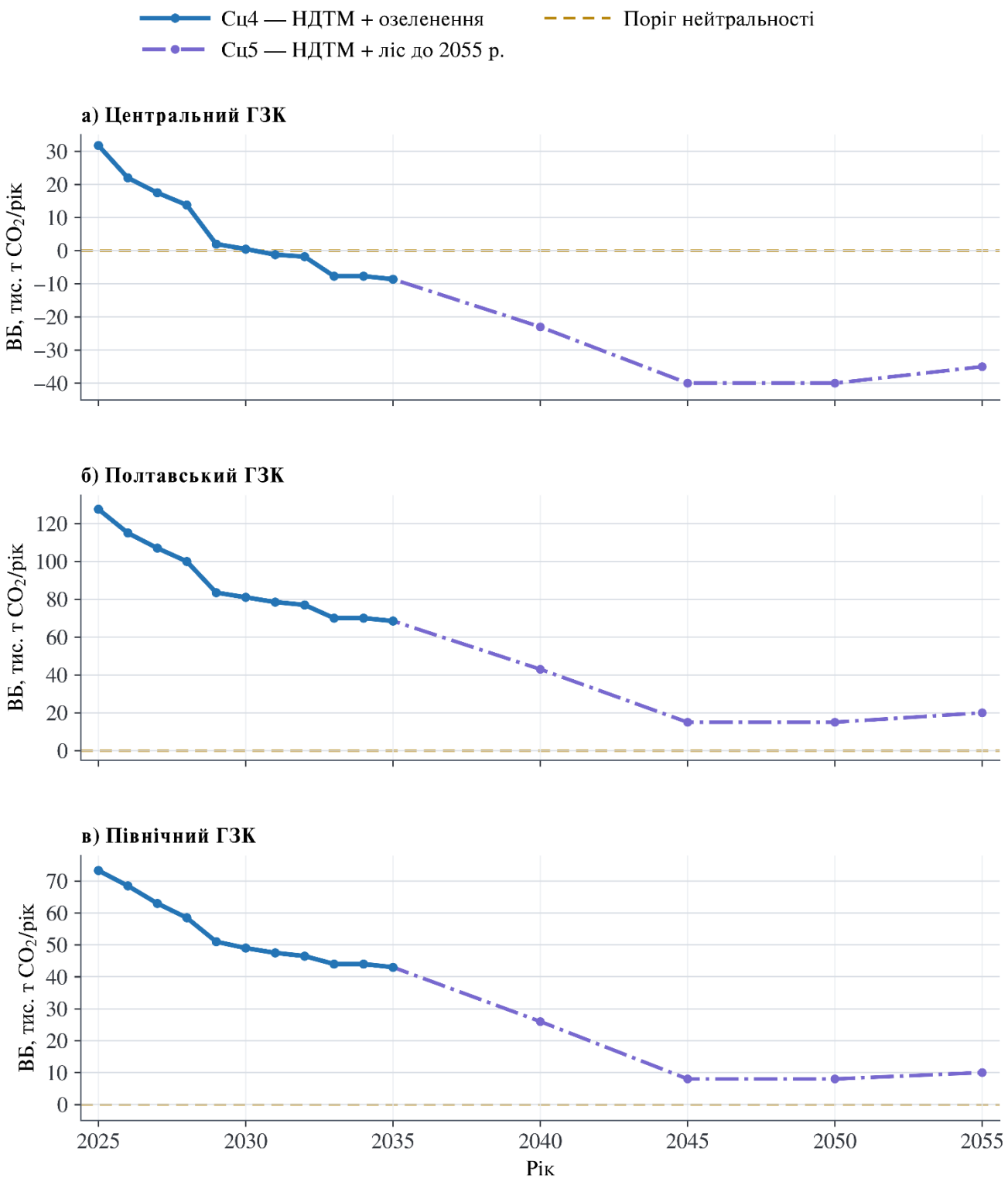


Рис. 4.3. Довгострокова траєкторія ВБ(t) за Сц4 та Сц5

Аналіз довгострокової траєкторії вуглецевого балансу на рисунку 4.3 засвідчує принципово різні часові горизонти досягнення вуглецевої нейтральності для трьох досліджуваних підприємств. Для Центрального ГЗК лінія ВБ(t) перетинає порогове значення нейтральності (ВБ = 0) орієнтовно у 2030 – 2031 рр., після чого

баланс стабільно утримується у від'ємній зоні, досягаючи мінімуму близько -40 тис. т CO_2/рік у 2044 – 2048 рр. Невелике зростання ВБ(t) у 2048 – 2055 рр. (з -40 до приблизно -37 тис. т CO_2/рік) ймовірно відображає вихід приросту секвестрації нових насаджень на плато зрілого деревостану на тлі продовження зростання обсягів виробництва, закладеного у припущеннях сценарію Сц5.

Для Полтавського та Північного ГЗК траєкторія має принципово інший характер, стійке монотонне скорочення дефіциту впродовж 2025 – 2045 рр. з подальшою стабілізацією на рівні, близькому до нульового, але не нижче порогу нейтральності. Полтавський ГЗК наближається до ВБ(t) ≈ 15 тис. т CO_2/рік у 2045 – 2050 рр. з незначним зростанням до близько 20 тис. т CO_2/рік до 2055 р., тоді як Північний ГЗК стабілізується на рівні приблизно 8 – 10 тис. т CO_2/рік за той самий період. Це означає, що навіть за умови повного розгортання технологій CCS та водневих технологій після 2035 р. (закладеного у Сц5), жодне з цих двох підприємств не досягає вуглецевої нейтральності у межах розглянутого горизонту до 2055 р., залишаючись у зоні залишкового вуглецевого дефіциту.

Спільною рисою для всіх трьох підприємств є злам траєкторії в період 2035 – 2045 рр., що відповідає моменту впровадження технологій CCS/H_2 за умовами Сц5 і проявляється як суттєве прискорення темпів скорочення ВБ(t) порівняно з попереднім періодом, коли динаміка визначалася виключно заходами НДТМ та розширенням насаджень (Сц4). Це підтверджує критичну роль технологій глибокої декарбонізації для досягнення довгострокових цілей вуглецевої нейтральності, тоді як комбінація НДТМ і екосистемної компенсації забезпечує лише часткове, хоча й суттєве, скорочення дефіциту на горизонті до 2035 р. Розбіжність між лінією Сц4 (без CCS/H_2) та Сц5 (з CCS/H_2), що стає візуально помітною після 2035 р. на графіках усіх трьох підприємств, кількісно ілюструє додатковий ефект технологій глибокої декарбонізації понад потенціал, закладений у комбінації традиційних НДТМ та озеленення СЗЗ [185, 186, 187, 188, 189].

Розрахункові значення коефіцієнта компенсації Kcomp, отримані за результатами сценарного моделювання, ґрунтуються на фіксованому наборі вхідних параметрів і не враховують природну невизначеність вихідних даних, зумовлену похибками інвентаризації викидів, точністю верифікації секвестрації та

варіативністю кліматичних умов приживлюваності насаджень [190, 191, 192, 193]. Для визначення параметрів, які найбільшою мірою впливають на стійкість отриманих прогнозів, проведено аналіз чутливості методом «торнадо» [194]. Кожен із шести вхідних параметрів моделі послідовно варіювався в межах власної оціночної невизначеності (підрозділ 2.5) за фіксації решти параметрів на базовому рівні, після чого фіксувався відповідний розмах зміни Kcomp(2035) за сценарієм Сц4. Результати аналізу, ранжовані за ступенем впливу для кожного підприємства, наведено на рис. 4.4.

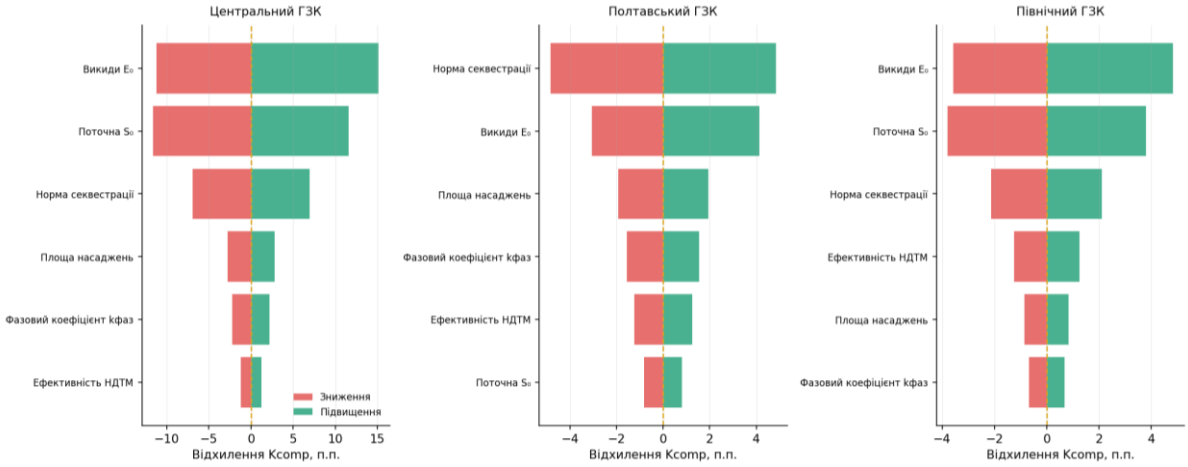


Рис. 4.4. Аналіз чутливості Kcomp до параметрів моделі

Аналіз рисунка 4.4 виявляє принципову відмінність у структурі чутливості Kcomp між трьома підприємствами, що безпосередньо узгоджується зі встановленими в розділі 4 особливостями їхніх буферних екосистем. Для Центрального та Північного ГЗК найбільш впливовим параметром є базові викиди E_0. Поточна секвестрація S_0 посідає другу позицію за впливом для обох підприємств, що підтверджує важливість якості верифікаційних процедур i-Tree Eco, застосованих у підрозділі 4.3. Принципово іншу картину демонструє Полтавський ГЗК, найвпливовішим параметром тут є норма секвестрації нових насаджень, а не базові викиди. Це прямо узгоджується з висновком підрозділу 4.4 про те, що визначальним лімітуючим чинником компенсаційного потенціалу цього підприємства є не продуктивність, а площа деревостану, оскільки існуючий вуглецевий баланс Полтавського ГЗК майже повністю формується за рахунок майбутнього приросту насаджень (закладеного в норму секвестрації), а не наявної

бази S_0, що й зумовлює найвищу чутливість моделі саме до цього параметра. Спільною для всіх трьох підприємств закономірністю є низька чутливість Kcomp до ефективності впровадження НДТМ r(t) та фазового коефіцієнта k_фаз, які послідовно займають останні позиції рейтингу. Це свідчить про відносну стійкість прогнозних значень Kcomp до короткострокових ризиків затримки технологічної модернізації, характерних для умов воєнного часу, і вказує на те, що першочергові зусилля з підвищення точності прогнозу варто зосередити саме на верифікації базових показників E_0 та S_0, а не на деталізації параметрів технологічної ефективності. Для отримання статистично обґрунтованої оцінки стійкості прогнозу застосовано метод Монте-Карло (N = 1000 ітерацій) відповідно до методики, викладеної в підрозділі 2.5. На кожній ітерації всі шість вхідних параметрів моделі (викиди E_0, поточна секвестрація S_0, норма секвестрації, ефективність НДТМ r(t), площа насаджень та фазовий коефіцієнт k_фаз) одночасно й незалежно варіювалися за нормальним розподілом у межах власної оціночної невизначеності, після чого для кожної ітерації обчислювалося результуюче значення Kcomp (2035). Отримані за результатами 1000 ітерацій розподіли ймовірностей Kcomp (2035) для трьох досліджуваних підприємств наведено на рисунку 4.5.

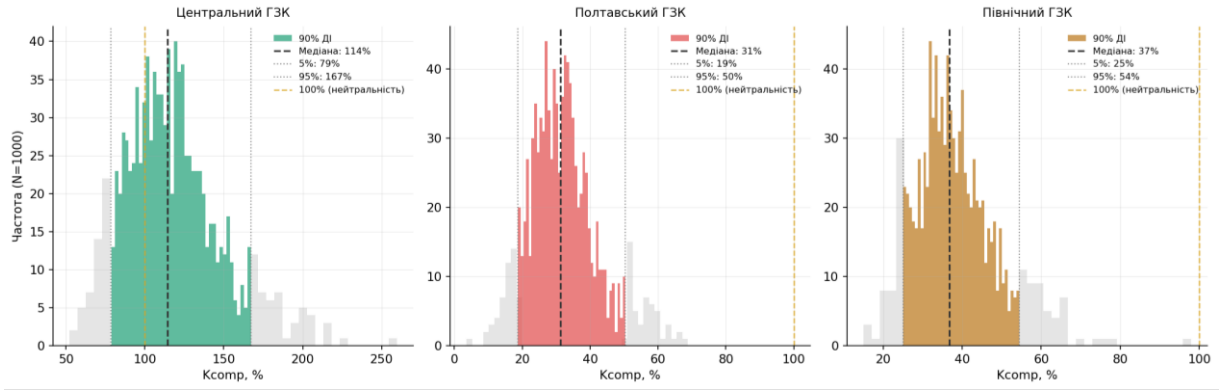


Рис. 4.5. Розподіл Kcomp(2035) за результатами Монте Карло

Аналіз отриманих розподілів Kcomp (2035) підтверджує принципову відмінність у ступені невизначеності прогнозу між трьома підприємствами. Для Центрального ГЗК медіанне значення розподілу становить 114 %. Це означає, що медіанне значення перевищує поріг повної компенсації, однак нижня межа

інтервалу становить 79%, тому за несприятливого поєднання параметрів повна компенсація може бути досягнута.

Для Полтавського та Північного ГЗК медіани розподілів (31 % та 37 % відповідно) та їхні 90 % довірчі інтервали (19 – 50 % та 25 – 54 %). За прийнятних параметрів сценарію Сц4 ці підприємства мають низьку ймовірність досягнення повної компенсації до 2035 р.

Узагальнюючи результати підрозділу 4.3, можна стверджувати, що проведене сценарне моделювання з оцінкою невизначеності встановило принципову відмінність траєкторій вуглецевого балансу трьох досліджуваних підприємств. Центральний ГЗК демонструє статистично надійну перспективу досягнення вуглецевої нейтральності вже в межах середньострокового горизонту (2030 – 2031 рр.) завдяки поєднанню помірного рівня викидів і значного секвестраційного потенціалу СЗЗ, що підтверджено як детермінованим розрахунком, так і результатами ймовірнісного аналізу. Для Полтавського та Північного ГЗК комбінація НДТМ та розширення насаджень (Сц4) забезпечує суттєве, але недостатнє для досягнення нейтральності скорочення вуглецевого дефіциту, що обумовлює необхідність реалізації довгострокової стратегії Сц5 з впровадженням технологій CCS та водневих рішень після 2035 р. Аналіз чутливості додатково встановив, що пріоритетним напрямом підвищення точності майбутніх прогнозів є уточнення базових показників викидів та поточної секвестрації, тоді як параметри технологічної ефективності НДТМ мають відносно обмежений вплив на кінцевий результат моделювання.

4.4. Науково-практичні рекомендації щодо системи моніторингу та управління вуглецевим балансом

Результати комплексного дослідження вуглецевого балансу трьох залізорудних ГЗК, свідчать про те, що ефективне управління балансом між викидами парникових газів та секвестрацією буферних екосистем СЗЗ неможливе без функціонування спеціалізованої системи збору, верифікації та аналізу відповідних даних. Практика проведення інвентаризації викидів на досліджуваних

підприємствах виявив низку системних недоліків: фрагментованість первинного обліку між різними службами (екологічна, виробничо-технічна, лабораторна), відсутність уніфікованої методології розрахунку карбонового балансу на рівні підприємства та відсутність зв'язку між показниками вуглецевого балансу і управлінськими рішеннями щодо технологічної модернізації. З огляду на зазначені недоліки, розроблено науково-практичні рекомендації щодо побудови інтегрованої системи моніторингу та управління вуглецевим балансом. Концептуальна модель ґрунтується на чотирирівневій архітектурі, що охоплює весь ланцюг від первинного вимірювання до зовнішнього розкриття інформації [195] (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Чотирирівнева архітектура системи моніторингу та управління вуглецевим балансом

Рівень	Назва рівня	Суб'єкт відповідальності	Об'єкт моніторингу	Основні функції
1	2	3	4	5
I	Первинний (інструментальний)	Відповідальний за джерело викидів (начальник цеху / відділення)	Первинні лічильники палива, витратоміри газу, ваги сировини	Зняття показників лічильників, заповнення первинних журналів обліку, збереження метрологічних свідоцтв
II	Розрахунковий (цеховий)	Еколог / керівник виробничого підрозділу	Сукупні витрати палива та сировини по підрозділу	Розрахунок викидів за методом M1/M4, щомісячне зведення по підрозділу
III	Зведено-аналітичний	Відділ охорони навколишнього середовища підприємства	Сукупні викиди Scope 1 по підприємству; дані обліку вхідних матеріальних потоків	Зведення даних з усіх підрозділів, верифікація розрахунків, формування річного звіту, внутрішній аудит
III	Зведено-аналітичний	Відділ охорони навколишнього середовища підприємства	Сукупні викиди Scope 1 по підприємству; дані обліку вхідних матеріальних потоків	Зведення даних з усіх підрозділів, верифікація розрахунків, формування річного звіту, внутрішній аудит

Джерело: розроблено автором

Наведена чотирирівнева архітектура забезпечує принцип «каскадної відповідальності», кожен наступний рівень отримує верифіковані агреговані дані від попереднього і не дублює функції вимірювання, а здійснює їх аналіз, зведення та передачу далі. Принциповим елементом системи моніторингу та управління вуглецевим балансом є інтеграція двох потоків даних, про викиди Scope 1 та про секвестрацію СЗЗ, в єдиний інформаційний контур [196].

Якість усієї системи моніторингу визначається якістю первинних даних, зібраних на Рівні І. Ключовою вимогою є забезпечення метрологічної простежуваності вимірювань, тобто наявності документально підтвердженого ланцюга повірок від кожного вимірювального приладу до національного стандарту. Відповідно до методології системи моніторингу, звітності, верифікації та вимог ISO 14064-1:2018, для кожної категорії первинних даних встановлюються конкретні процедури збору, відповідальні особи та вимоги до точності (табл. 4.8).

Таблиця 4.8

Процедури збору первинних даних для розрахунку вуглецевого балансу

№	Категорія даних	Джерело даних	Метод вимірювання	Періодичність	Відповідальний	Вимога до точності / невизначеності
А. Дані для розрахунку викидів Scope 1						
А1	Витрати природного газу по кожній установці ВД01/ВД02	Лічильники газу (метрологічно повірені)	Прямий вимір (М1)	Щодобово	Начальник цеху, еколог	Невизначеність ≤ 2,5 %
А2	Маса вапняку, завантаженого в установку	Ваги на конвеєрних стрічках подачі	Прямий вимір (М4)	Щодобово	Начальник відділення, еколог	Невизначеність ≤ 5,0 %
А3	Хімічний склад вапняку (вміст $CaCO_3$, $MgCO_3$)	Лабораторний аналіз (хімлабораторія підприємства)	Хімічний аналіз (метод М4)	Щомісячно (або при зміні партії)	Начальник лабораторії	Акредитована лабораторія; похибка ≤ 1,0 %
А4	Нижча теплота згоряння природного газу (НТЗ)	Паспорт якості від газопостачальника /хроматографічний аналіз	Сертифікат якості або власний аналіз	Щомісячно	Еколог	Сертифікований постачальник або акредитована лабораторія
А5	Маса та склад біопалива (лушпиння соняшнику)	Ваги на приймальному майданчику; сертифікати якості	Прямий вимір + документальний	При кожній поставці	Склад сировини, еколог	Документ про сталий характер біомаси (для виключення з викидів)
Б. Дані для розрахунку секвестрації СЗЗ						
Б1	Площа деревно-чагарникового покриву СЗЗ за типами	Дешифрування знімків Sentinel-2; польова верифікація	NDVI/SAVI/IRECI класифікація Random Forest	Щорічно (вегетаційний сезон)	Залучений еколог-дистанційник	Точність класифікації ≥ 85 % (загальна); каппа ≥ 0,80
Б2	Дендрометричні показники модельних дерев	Польові виміри	Суцільний або вибірковий облік (n ≥ 30 дерев/вид)	Раз на 5 років	Залучений фахівець-дендролог	Відповідно до методики Лакиди П.І.

Джерело: розроблено автором

Критичним аспектом процедур збору даних є забезпечення незмінності та цілісності зафіксованих значень. Рекомендується впровадження принципу «подвійного підпису» для первинних журналів обліку, показники лічильників підписуються особою, що знімає показання, та підтверджуються черговим інженером або начальником зміни. Це унеможливлює неавторизовані зміни первинних даних.

Для даних категорії А3 (хімічний склад вапняку) особливу увагу слід приділити репрезентативності проб, зразки для аналізу мають відбиратися пропорційно до обсягів поставок кожної партії, а не лише при першому надходженні від нового постачальника. Зміна постачальника вапняку або родовища видобутку потребує позачергового хімічного аналізу з оформленням відповідного акту в системі обліку. Ця вимога є особливо актуальною для ПрАТ «Центральний ГЗК», де вапняк формує понад 51 % обсягу Scope 1 і найменша похибка у визначенні його складу суттєво впливає на загальний розрахунок балансу.

Щодо даних категорії Б (секвестрація СЗЗ), рекомендується закріпити щорічний моніторинг площі деревно-чагарникового покриву на основі знімків Sentinel-2 у вегетаційний сезон (липень – серпень) як стандартну процедуру [197]. Польовий дендрометричний облік виконується раз на п'ять років і є основою для оновлення регресійних моделей розрахунку секвестрації. Допустима розбіжність між алометричним методом та верифікацією за допомогою i-Tree Eco не повинна перевищувати 15 %; у разі перевищення цього порогу необхідне переведення польового обліку на рівень суцільного перерахунку для відповідної ділянки СЗЗ.

Ефективність системи моніторингу та управління вуглецевим балансом безпосередньо залежить від чіткого розподілу відповідальності між структурними підрозділами підприємства. Проведене дослідження свідчить, що найбільш поширеною причиною невідповідностей є не технічні помилки розрахунків, а організаційні, а саме нечіткі межі відповідальності між службами, що призводить до дублювання або, навпаки, провалів у зборі окремих категорій даних.

Для підприємств, що не мають окремої служби сталого розвитку, рекомендується у найближчій перспективі розглянути питання про введення

посади менеджера з питань кліматичних ризиків та звітності або покладення відповідних функцій на заступника директора з екологічних питань з чітким визначенням повноважень у посадовій інструкції. Ця рекомендація узгоджується з вимогами Директиви (ЄС) 2022/2464 (CSRD) щодо забезпечення достовірності нефінансової звітності на рівні управлінської відповідальності [198, 199].

Важливим організаційним елементом є встановлення чіткого графіку передачі даних між рівнями: дані Рівня I передаються екологу цеху щодня до 8:00 наступного дня; щомісячне зведення по підрозділу формується екологом цеху до 5-го числа місяця, що настає за звітним; зведений квартальний звіт ООНС формується до 20-го числа місяця, що настає за звітним кварталом; річний звіт МЗВ підготовлюється до 28 лютого наступного календарного року для своєчасного подання в рамках процедур CBAM.

Розроблена система забезпечує формування даних, необхідних одночасно для кількох регуляторних і корпоративних вимог, що суттєво підвищує її практичну цінність. Принцип «одноразового збору багаторазового використання» даних дозволяє уникнути дублювання процедур та зменшити адміністративне навантаження на підрозділи підприємства.

У сфері підтримання та розширення площі деревно-чагарникового покриву рекомендується щорічно планувати заходи з відновлення загиблих насаджень СЗЗ у обсязі, що не допускає скорочення загальної площі деревно-чагарникового покриву нижче рівня, зафіксованого за результатами моніторингу поточного року [202, 203]. При розробці нових ділянок кар'єрів або виробничих об'єктів, що призводять до вилучення земель СЗЗ, передбачати компенсаційне залісення на рівновеликих або більших за площею ділянках в межах нормативного контуру СЗЗ, включати показник площі деревно-чагарникового покриву до переліку цільових екологічних показників діяльності підприємства з щорічним звітуванням перед керівництвом. Для ПрАТ «Полтавський ГЗК», де коефіцієнт компенсації становить лише 4,1 %. Рекомендується розробити окрему програму поетапного збільшення площі насаджень СЗЗ з цільовим збільшенням коефіцієнта компенсації до 10 % протягом п'яти років.

Отже, впровадження запропонованої системи моніторингу та управління вуглецевим балансом дозволить досліджуваним підприємствам перейти від епізодичного, фрагментованого обліку до систематичного, верифікованого та управлінськи орієнтованого процесу. Це забезпечить не лише виконання регуляторних вимог CBAM та CSRD, але й створить інформаційну основу для обґрунтованого прийняття рішень щодо пріоритизації інвестицій у декарбонізацію.

Висновки до розділу 4

За результатами дослідження, проведеного у розділі 4, сформульовано такі висновки.

1. Встановлено принципову відмінність вуглецевого балансу між трьома досліджуваними підприємствами як за абсолютними показниками, так і за структурою формуючих компонентів. Найбільші некомпенсовані нетто-викиди характерні для ПрАТ «Полтавський ГЗК» (нетто-баланс −127 618 т CO_2-екв./рік, коефіцієнт компенсації 4,1 %) внаслідок поєднання найвищих прямих викидів (133 008 т CO_2/рік у 2025 р.) з мінімальною площею деревно-чагарникового покриву СЗЗ (897,81 га, 8,0 % площі зони). Найвищий коефіцієнт компенсації демонструє ПрАТ «Центральний ГЗК» (58,1 %) завдяки поєднанню помірного рівня викидів (75 961 т CO_2/рік) з найбільшою площею буферних насаджень (9 005,26 га, 31,4 %). Доведено, що визначальним чинником коефіцієнта компенсації є не продуктивність наявних деревостанів (питома секвестрація варіює в межах лише 1,3 – 1,6 т С/га/рік для всіх підприємств), а площа деревно-чагарникового покриву та абсолютний обсяг прямих викидів.

2. Розроблено та обґрунтовано систему багатокритеріальної оцінки НДТМ за трьома групами критеріїв (екологічна ефективність 0,40, технічна здійсненність 0,30, економічна доцільність 0,30), яка дозволила ранжувати сім потенційних технологічних заходів. Найвищу зважену оцінку отримали система енергоменеджменту (4,25 бали) та системи прогнозного автоматизованого управління MPC (4,15 бали) завдяки оптимальному поєднанню технічної здійсненності та економічної доцільності. Встановлено принципові відмінності у пріоритетності НДТМ для кожного підприємства, оптимізація складу шихти є першочерговим заходом для Центрального ГЗК (51,2% викидів від вапняку), тоді

як для Північного ГЗК пріоритетними є технології скорочення газових викидів (91,1% Scope 1 формує природний газ).

3. Кількісно обґрунтовано сукупний потенціал скорочення прямих викидів CO_2 від впровадження шести пріоритетних НДТМ, що становить 46,3 – 75,7 % Scope 1 для Полтавського ГЗК, 40,3 – 61,7 % для Центрального ГЗК та 48,0 – 79,6 % для Північного ГЗК. Встановлено, що для Центрального ГЗК за максимальних оцінок ефективності впровадження ISO 50001, MPC та оптимізації складу шихти коефіцієнт компенсації Центрального ГЗК може зрости до 89%, перевищення порогу 100% потребує реалізації додаткових технологічних заходів.

4. Розроблено динамічну балансову модель вуглецевого балансу на період 2025 – 2055 роки для п'яти альтернативних сценаріїв декарбонізації. Встановлено, що Центральний ГЗК за сценарієм Сц4 (НДТМ + озеленення) досягає порогу переважної компенсації (75 %) вже у 2029 р. та переходу до позитивного нетто-балансу у 2030 – 2031 рр., досягаючи Kcomp = 114,6% до 2035 р. Для Полтавського та Північного ГЗК аналогічний сценарій забезпечує стабілізацію коефіцієнта компенсації лише в діапазоні 31 – 37 %, що обумовлює необхідність реалізації довгострокової стратегії Сц5 з впровадженням технологій CCS/H_2 після 2035 р., однак навіть за цих умов жодне з двох підприємств не досягає повної вуглецевої нейтральності в межах горизонту до 2055 р.

5. Методом аналізу чутливості «торнадо» та імовірнісним моделюванням Монте-Карло (N = 1000 ітерацій) встановлено статистичну надійність прогнозу для Центрального ГЗК. 90 % довірчий інтервал Kcomp (2035) становить 79 – 167 % (медіана 114 %), що підтверджує високу ймовірність досягнення вуглецевої нейтральності навіть за песимістичних умов. Для Полтавського та Північного ГЗК довірчі інтервали (19 – 50 % та 25 – 54 % відповідно) повністю розташовані нижче порогу нейтральності, що свідчить про стійку відсутність шансів її досягнення в межах сценарію Сц4 незалежно від комбінації вхідних параметрів. Визначено, що найбільший вплив на невизначеність прогнозу для Центрального та Північного ГЗК чинять базові викиди E_0, тоді як для Полтавського ГЗК визначальним є параметр норми секвестрації нових насаджень.

6. Розроблено науково-практичні рекомендації щодо побудови чотирирівневої системи моніторингу та управління вуглецевим балансом (інструментальний, розрахунковий, зведено-аналітичний, корпоративний рівні), що реалізує принцип каскадної відповідальності та усуває встановлені системні недоліки інвентаризації викидів, а саме фрагментованість первинного обліку, відсутність уніфікованої методології розрахунку та зв'язку з управлінськими рішеннями. Визначено конкретні процедури збору первинних даних з диференційованими вимогами до точності вимірювань (від ±1,0 % для хімічного аналізу вапняку до ±5,0 % для масових потоків сировини) та запропоновано організаційний механізм передачі даних між рівнями системи з чітко визначеними строками.

7. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо підтримання та розширення площі деревно-чагарникового покриву СЗЗ, включно з принципом недопущення скорочення наявної площі насаджень, компенсаційним залісенням при вилученні земель та цільовим показником підвищення коефіцієнта компенсації до 10% протягом п'яти років для ПрАТ «Полтавський ГЗК». Встановлено, що запропонована система моніторингу одночасно забезпечує виконання вимог CBAM, CSRD та ESRS E1/E2 за принципом «одноразового збору багаторазового використання» даних, що суттєво підвищує її практичну цінність для досліджуваних підприємств.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота вирішує актуальну науково-прикладну проблему розробки методичних засад інтегрованої оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, що поєднують інвентаризацію прямих викидів CO_2 та оцінку річної секвестрації деревно-чагарниковим покривом буферних екосистем з ймовірнісно-сценарним моделюванням шляхів досягнення вуглецевої нейтральності.

1. Систематизацію нормативно-правової бази та міжнародних стандартів у сфері моніторингу викидів парникових газів виконано шляхом узгодження національного законодавства (Закон України № 377-IX від 12.12.2019 р., Постанова КМУ № 880 від 23.09.2020 р., Постанова КМУ № 960 від 23.09.2020 р.) з вимогами ISO 14064-1:2018, методологій МГЕЗК (2006, 2019) та регуляторних механізмів ЄС (EU ETS, CBAM). Встановлено, що чинна система МЗВ України є функціонально сумісною з методологією EU ETS, проте потребує розширення на два рівні точності, переходу від галузевих коефіцієнтів за замовчуванням Типу I (рівень 1) до лабораторних коефіцієнтів рівня 3 для карбонатних матеріалів та впровадження систем безперервних вимірювань.

2. Порівняльна характеристика технологічних процесів і детальна ідентифікація джерел викидів CO_2 на трьох досліджуваних підприємствах виявила принципову відмінність між ними за кількістю, структурою та типом джерел прямих викидів. На всіх трьох підприємствах встановлено, що домінуючим джерелом прямих викидів Scope 1 є термічна обробка залізорудних окатишів, де паливні викиди від спалювання природного газу (метод M1) та процесні викиди від декарбонізації карбонатних матеріалів шихти (метод M4) реалізуються одночасно. Визначальним чинником структурних відмінностей між підприємствами встановлено тип виробленої продукції, а саме виробництво офлюсованих окатишів на Полтавському та Центральному ГЗК зумовлює частку процесних викидів від декарбонізації вапняку 32,5 – 50,3 % загального обсягу, тоді як виробництво

неофлюсованих окатишів на Північному ГЗК визначає природний газ практично єдиним суттєвим джерелом викидів 88,5 – 91,1 %.

3. Розраховано прямі викиди CO_2 (Scope 1) трьох досліджуваних підприємств за методами М1 та М4 у розрізі шести матеріальних потоків (П01 – П06) за 2023 – 2025 рр. Отримано наступні результати: ПрАТ «Полтавський ГЗК» 234 304 т, 111 481 т та 133 008 т CO_2; ПрАТ «Центральний ГЗК» 57 710 т, 65 795 т та 75 961 т CO_2; ПрАТ «Північний ГЗК» 59 924 т, 81 627 т та 90 478 т CO_2 відповідно. Питомий вуглецевий слід у 2023 р. становив 39,0 – 39,9 кг CO_2/т окатишів для всіх трьох підприємств, що вдвічі перевищує показник галузевого лідера LKAB (19 – 22 кг CO_2/т) і засвідчує значний потенціал декарбонізації. Матриця ризиків якості даних виявила, що основним джерелом методологічної невизначеності є застосування коефіцієнтів вмісту вуглецю рівня точності 1 для вапняку, відхилення яких від фактичного хімічного складу може становити ±30 – 50 % і обумовлює результуючу похибку 4 – 28 % для Полтавського та Центрального ГЗК.

4. Дистанційну оцінку стану рослинного покриву СЗЗ трьох ГЗК виконано на основі мультиспектральних знімків Sentinel-2 MSI Level-2A з розрахунком трьох спектральних індексів NDVI, IRECI, SAVI та класифікацією земного покриву методом Random Forest (коефіцієнт Каппа 0,81). Встановлено, що частка деревно-чагарникового покриву становить лише 8,0 % площі СЗЗ Полтавського ГЗК (897,81 га), 31,4 % Центрального ГЗК (9 005,26 га) та 31,8 % Північного ГЗК (3 463,86 га). Побудована регресійна модель секвестрації $S = \beta_0 + \beta_1 \cdot Area + \beta_2 \cdot NDVI_mean + \varepsilon$, верифікована незалежною польовою інвентаризацією в i-Tree Eco з відповідністю питомих показників ±15 %, підтвердила придатність нормативного методу Лакиди П.І. для розрахунку секвестраційного потенціалу буферних екосистем промислових СЗЗ.

5. Розраховано інтегрований вуглецевий баланс трьох підприємств як різницю між прямими викидами CO_2 (Scope 1) та річною секвестрацією деревно-чагарникового покриву СЗЗ. Поточна річна секвестрація становить 5 390,1 т CO_2- екв./рік (Полтавський ГЗК), 44 131,8 т CO_2-екв./рік (Центральний ГЗК) та 17 123,0 т CO_2-екв./рік (Північний ГЗК). Коефіцієнт вуглецевої компенсації

Kcomp у базовому 2025 р. становить відповідно 4,1 %, 58,1 % та 18,9 %. Аналіз чутливості методом «торнадо» встановив, що найвищу чутливість Kcomp демонструє до базових викидів E_0 для Центрального та Північного ГЗК, тоді як для Полтавського ГЗК визначальним є параметр норми секвестрації нових насаджень, що відображає мінімальну площу наявного деревного покриву. Імовірнісне моделювання Монте-Карло (N = 1000 ітерацій) підтвердило статистичну надійність прогнозу: 90-відсотковий довірчий інтервал Kcomp(2035) для Центрального ГЗК становить 79 – 167 % , а для Полтавського та Північного ГЗК 19 – 50 % та 25 – 54 % відповідно, що унеможливлює досягнення вуглецевої нейтральності виключно засобами екосистемної компенсації.

6. Розроблено та науково обґрунтовано п'ять сценаріїв оптимізації вуглецевого балансу досліджуваних підприємств на періоди 2025 – 2035 рр. (Сц1 – Сц4) та 2025 – 2055 рр. (Сц5). Встановлено, що за сценарієм комбінованого впровадження НДТМ та розширення насаджень (Сц4) Центральний ГЗК досягає порогу переважної компенсації (75 %) вже у 2029 р. і позитивного нетто-балансу у 2030 – 2031 рр. із Kcomp = 114,6 % до 2035 р.; для Полтавського та Північного ГЗК Сц4 забезпечує стабілізацію Kcomp у діапазоні 31 – 37 %, що підтверджує необхідність реалізації довгострокової стратегії з впровадженням технологій CCS/H_2 після 2035 р. Розроблено систему моніторингу та управління вуглецевим балансом з чотирирівневою архітектурою (інструментальний, розрахунковий, зведено-аналітичний, корпоративний рівні) та диференційованими вимогами до точності первинних вимірювань від ±1,0 % (хімічний аналіз вапняку) до ±5,0 % (масові потоки сировини), що забезпечує одночасне виконання вимог CBAM, CSRD та ESRS E1/E2 за принципом «одноразового збору та багаторазового використання» даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation / M. Azadi et al. Nature Geoscience. 2020. Vol. 13, No. 2. P. 100-104. DOI: https://doi.org/10.1038/s41561-020-0531-3.

2. Vindušková O., Frouz J. Soil carbon accumulation after open-cast coal and oil shale mining in Northern Hemisphere: A quantitative review. Environmental Earth Sciences. 2013. Vol. 69, No. 5. P. 1685-1698. DOI: https://doi.org/10.1007/s12665-012-2004-5.

3. Evolution of the global carbon cycle and climate regulation on Earth / T. T. Isson et al. Global Biogeochemical Cycles. 2020. Vol. 34, No. 2. Art. e2018GB006061. DOI: https://doi.org/10.1029/2018GB006061.

4. Reichle D. E. The Global Carbon Cycle and Climate Change: Scaling Ecological Energetics from Organism to the Biosphere. London: Academic Press, 2023. 580 p. DOI: https://doi.org/10.1016/C2019-0-04236-6.

5. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis / ed. by V. Masson-Delmotte et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.

6. Global carbon and other biogeochemical cycles and feedbacks / J. G. Canadell et al. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC / ed. by V. Masson-Delmotte et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 673-816. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157896.007.

7. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present / D. Lüthi et al. Nature. 2008. Vol. 453, No. 7193. P. 379-382. DOI: https://doi.org/10.1038/nature06949.

8. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica / J. R. Petit et al. Nature. 1999. Vol. 399, No. 6735. P. 429-436. DOI: https://doi.org/10.1038/20859.

9. Global Carbon Budget 2024 / P. Friedlingstein et al. Earth System Science Data. 2025. Vol. 17, No. 3. P. 965-1039. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025.

10. Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU) / G. J. Nabuurs et al. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the IPCC / ed. by P. R. Shukla et al. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. P. 747-860. DOI: https://doi.org/10.1017/9781009157926.009.

11. National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide since 1850 / M. W. Jones et al. Scientific Data. 2023. Vol. 10, No. 1. Art. 155. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-023-01945-y.

12. IPCC. Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report / ed. by V. Masson-Delmotte et al. Geneva: IPCC, 2018. URL: https://www.ipcc.ch/sr15/ (дата звернення: 10.04.2024).

13. Herasymchuk L. O., Valerko R. A., Patseva I. G. Air temperature change manifestation at the Zhytomyr territory. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology. 2023. Iss. 29. P. 6-16. DOI: https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-01.

14. Оцінка уразливості лісів України як основа природоорієнтованих рішень для запобігання та адаптації до зміни клімату / І. Букша та ін. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2023. № 25. С. 138-145. DOI: https://doi.org/10.15421/412311.

15. Keenan T. F., Williams C. A. The Terrestrial Carbon Sink. Annual Review of Environment and Resources. 2018. Vol. 43. P. 219-243. DOI https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204.

16. UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn: UNFCCC Secretariat, 1992. URL: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf (дата звернення: 10.04.2024).

17. UNFCCC. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn: UNFCCC Secretariat, 1998. URL: https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf (дата звернення: 10.04.2024).

18. Grubb M. Full legal compliance with the Kyoto Protocol's first commitment period – some lessons. Climate Policy. 2016. Vol. 16, No. 6. P. 673–681. DOI: https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1202096.

19. UNFCCC. Paris Agreement. Bonn: UNFCCC Secretariat, 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (дата звернення: 10.04.2024).

20. Паризька угода: ратифікована Законом України від 14.07.2016 р. № 1469-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_l61#Text (дата звернення: 10.04.2025).

21. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. Official Journal of the European Union. 2023. L 130. P. 52-104. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R0956 (дата звернення: 10.04.2024).

22. IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / ed. by S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. Hayama: IGES, 2006. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/ (дата звернення: 10.04.2024).

23. IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / ed. by E. Calvo Buendia et al. Geneva: IPCC, 2019. URL: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/ (дата звернення: 10.04.2024).

24. World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Revised edition. Washington, DC; Geneva: WRI, WBCSD, 2004. 116 p. URL: https://ghgprotocol.org/corporate-standard (дата звернення: 10.04.2024).

25. World Resources Institute, World Business Council for Sustainable Development. Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Washington, DC; Geneva: WRI, WBCSD, 2011. 152 p. URL: https://ghgprotocol.org/corporate-value-chain-scope-3-standard (дата звернення: 10.04.2024).

26. Про основні засади державної кліматичної політики: Закон України від 08.10.2024 р. № 3991-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text (дата звернення: 10.04.2025).

27. Хоменко С. В., Кірейцева Г. В. Оцінка стану впровадження міжнародних зобов'язань України зі зміни клімату в законодавче та нормативно-правове забезпечення. Екологічні науки. 2025. № 2 (59). С. 228-235. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.35.

28. Про схвалення Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 25.06.2024 р. № 587-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/587-2024-%D1%80#Text (дата звернення: 29.06.2024).

29. Regulation (EU) 2023/839 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the reporting and compliance rules, and setting out the targets of the Member States for 2030, and Regulation (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review. Official Journal of the European Union. 2023. L 107. P.1-28. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R0839 (дата звернення: 10.04.2025).

30. The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track? / A. Korosuo et al. Carbon Balance and Management. 2023. Vol. 18. Art. 15. DOI: https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0.

31. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів : Закон України від 12.12.2019 р. № 377-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text (дата звернення: 10.04.2025).

32. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Закон України від 08.01.2025 р. № 4187-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4187-20#Text (дата звернення: 10.04.2025).

33. European Commission. Impact Assessment Report accompanying the proposal for a Carbon Border Adjustment Mechanism. SWD (2021) 643 final. Brussels: European Commission, 2021. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=SWD:2021:643:FIN (дата звернення: 10.04.2025).

34. Norgate T. E., Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. Journal of Cleaner Production. 2010. Vol. 18, No. 3. P. 266-274. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020.

35. ICMM. Net zero commitment: ICMM members commit to net-zero Scope 1 and 2 GHG emissions by 2050. London: International Council on Mining and Metals, 2021. URL: https://www.icmm.com/en-gb/environment/climate-change/net-zero-commitment (дата звернення: 10.04.2025).

36. Hertwich E. G., Wood R. The growing importance of scope 3 greenhouse gas emissions from industry. Environmental Research Letters. 2018. Vol. 13, No. 10. Art. 104013. DOI: https://doi.org/10.1088/1748-9326/aae19a.

37. Carbon emission flow in the production processes of coal mining enterprises: A case study / J. Huang et al. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 176. P. 310-322. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.104.

38. Kinnunen P. H.-M., Kaksonen A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 228. P. 153-160. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171.

39. Ballantyne G. R., Powell M. S. Benchmarking comminution energy consumption for the processing of copper and gold ores. Minerals Engineering. 2014. Vol. 65. P. 109-114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.05.017.

40. International Energy Agency. Emissions Factors 2024. Paris : IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/emissions-factors-2024 (дата звернення: 10.04.2025).

41. Тенденції викидів діоксиду вуглецю як чинника кліматичних змін в атмосферне повітря Житомирської області від стаціонарних джерел та прогнозування їх обсягів / Л. Герасимчук та ін. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. № 3. С. 49–58. DOI: https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-7.

42. Екологічні ризики та їх оцінювання в контексті сталого розвитку видобувних підприємств / Л. О. Герасимчук та ін. Екологічні науки. 2025. № 3 (60). С. 31-36. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.5.

43. Comprehensive assessment of the earth's surface state disturbed by mining and ways to improve the situation: case study of Kryvyi Rih Iron-ore Basin, Ukraine / O.

Bazaluk et al. Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. Art. 1480344. DOI: https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1480344.

44. Ferrexpo PLC. Annual Report and Accounts 2024: Resilience in operation. Zug: Ferrexpo PLC, 2025. 184 p. URL: https://www.ferrexpo.com/investors/reports-and-presentations/ (дата звернення: 10.04.2025).

45. Environmental impacts for iron ore pellet production: A study of an open pit mine through life cycle assessment / G. A. Lovón-Canchumani et al. Science of the Total Environment. 2025. Vol. 993. Art. 179986. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179986.

46. Bhaskar A., Assadi M., Nikpey Somehsaraei H. Decarbonization of the Iron and Steel Industry with Direct Reduction of Iron Ore with Green Hydrogen. Energies. 2020. Vol. 13, No. 3. Art. 758. DOI: https://doi.org/10.3390/en13030758.

47. Vogl V., Åhman M., Nilsson L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 203. P. 736-745. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279.

48. Predictive models and operation guidance system for iron ore pellet induration in traveling grate–rotary kiln process / X. Fan et al. Computers & Chemical Engineering. 2015. Vol. 79. P. 80-90. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.04.035.

49. McKinsey & Company. Decarbonization challenge for steel. 2020. URL: https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/decarbonization-challenge-for-steel (дата звернення: 10.04.2025).

50. Combustion Evaluation of Renewable Fuels for Iron-Ore Pellet Induration / H. Wiinikka et al. Energy & Fuels. 2019. Vol. 33, No. 8. P. 7819–7829. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01356.

51. Chertow M. R. «Uncovering» industrial symbiosis. Journal of Industrial Ecology. 2007. Vol. 11, No. 1. P. 11–30. DOI: https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1110.

52. Jacobsen N. B. Industrial symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assessment of economic and environmental aspects. Journal of Industrial Ecology. 2006. Vol. 10, No. 1–2. P. 239-255. DOI: https://doi.org/10.1162/108819806775545411.

53. Effects of recultivation on soil organic carbon sequestration in abandoned coal mining sites: a meta-analysis / C. Baier et al. Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 20090. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-22937-z.

54. Прищепа А. М., Володимирець В. О., Самчук В. М. Роль зелених насаджень у збереженні екологічної рівноваги урбанізованого середовища (на прикладі м. Рівного). Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки». 2025. Вип. 3 (111). С. 157-170. DOI: https://doi.org/10.31713/vs3202511.

55. Біорізноманіття та екологічні послуги природно-заповідних територій урбосистем на прикладі дендрологічного парку / А. М. Прищепа та ін. Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки». 2026. Т. 2, № 114, Ч. 2. С. 257-270. DOI: https://doi.org/10.31713/vs2202632.

56. Gas exchange research on plant layers of green structures and indoor greening for sustainable construction / T. Tkachenko et al. Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 8. Art. 3467. DOI: https://doi.org/10.3390/su17083467.

57. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science. 2004. Vol. 304, No. 5677. P. 1623-1627. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1097396.

58. Raven J. A., Beardall J. Carbon acquisition mechanisms of algae: Carbon dioxide diffusion and carbon dioxide concentrating mechanisms. Photosynthesis in Algae: Biochemical and Physiological Mechanisms / ed. by A. W. D. Larkum et al. Cham: Springer, 2020. P. 291-348. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-33397-3_13.

59. Lorenz K., Lal R. Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Cham: Springer, 2018. 378 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-92318-5.

60. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property / M. W. I. Schmidt et al. Nature. 2011. Vol. 478, No. 7367. P. 49-56. DOI: https://doi.org/10.1038/nature10386.

61. Liang C., Schimel J. P., Jastrow J. D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature Microbiology. 2017. Vol. 2, No. 8. Art. 17105. DOI: https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2017.105.

62. Janzen H. H. The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? Soil Biology and Biochemistry. 2006. Vol. 38, No. 3. P. 419-424. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2005.10.008.

63. Lal R. Carbon sequestration. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2008. Vol. 363, No. 1492. P. 815-830. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185.

64. Das R., Maiti S. K. Estimation of carbon sequestration in reclaimed coalmine degraded land dominated by Albizia lebbeck, Dalbergia sissoo and Bambusa arundinacea plantation: a case study from Jharia Coalfields, India. International Journal of Coal Science & Technology. 2016. Vol. 3, No. 2. P. 246-266. DOI: https://doi.org/10.1007/s40789-016-0131-4.

65. A large and persistent carbon sink in the world's forests / Y. Pan et al. Science. 2011. Vol. 333, No. 6045. P. 988-993. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1201609.

66. Grassland management impacts on soil carbon stocks: A new synthesis / R. T. Conant et al. Ecological Applications. 2017. Vol. 27, No. 2. P. 662-668. DOI: https://doi.org/10.1002/eap.1473.

67. The role of soil carbon in natural climate solutions / D. A. Bossio et al. Nature Sustainability. 2020. Vol. 3, No. 5. P. 391-398. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-020-0491-z.

68. Shrestha R. K., Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. Geoderma. 2011. Vol. 161, No. 3-4. P. 168-176. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.015.

69. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review / Y. Feng et al. Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 191. P. 12-25. DOI: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015.

70. Ussiri D. A. N., Lal R. Carbon sequestration in reclaimed minesoils. Critical Reviews in Plant Sciences. 2005. Vol. 24, No. 3. P. 151-165. DOI: https://doi.org/10.1080/07352680590966581.

71. Akala V. A., Lal R. Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. Journal of Environmental Quality. 2001. Vol. 30, No. 6. P. 2098-2104. DOI: https://doi.org/10.2134/jeq2001.2098.

72. Microbial community structure and carbon-nitrogen cycling in post-mining soils along a 50-year chronosequence / J. Li et al. Science of the Total Environment. 2022. Vol. 818. Art. 151766. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151766.

73. Overriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions / C. D. Evans et al. Nature. 2021. Vol. 593, No. 7860. P. 548-552. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-021-03523-1.

74. Leifeld J., Menichetti L. The underappreciated potential of peatlands as a climate change solution. Nature Communications. 2018. Vol. 9, No. 1. Art. 1071. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6.

75. Dynamics of carbon sequestration in vegetation affected by large-scale surface coal mining and subsequent restoration / Y. Xu et al. Scientific Reports. 2024. Vol. 14, No. 1. Art. 13479. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-64381-1.

76. Carbon storage in post-mining forest soil, the role of tree biomass and soil bioturbation / J. Frouz et al. Biogeochemistry. 2009. Vol. 94, No. 2. P. 111-121. DOI: https://doi.org/10.1007/s10533-009-9313-0.

77. Šourková M., Frouz J., Šantůčková H. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic). Geoderma. 2005. Vol. 124, No. 3-4. P. 203-214. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.04.016.

78. Forest restoration following surface mining disturbance: challenges and solutions / S. E. Macdonald et al. New Forests. 2015. Vol. 46, No. 5-6. P. 703-732. DOI: https://doi.org/10.1007/s11056-015-9506-4.

79. Powlson D. S., Whitmore A. P., Goulding K. W. T. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. European Journal of Soil Science. 2011. Vol. 62, No. 1. P. 42-55. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x.

80. Bai Y., Cotrufo M. F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. Science. 2022. Vol. 377, No. 6606. P. 603-608. DOI: https://doi.org/10.1126/science.abo2380.

81. Soil biota in post-mining sites along a climatic gradient in the USA: Simple communities in shortgrass prairie recover faster than complex communities in tallgrass

prairie and forest / J. Frouz et al. Soil Biology and Biochemistry. 2015. Vol. 83. P. 22-31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.006.

82. Net primary production of forest vegetal biomass in Kyiv region / R. Vasylyshyn et al. Ecological Engineering and Environmental Technology. 2022. Vol. 23, No. 1. P. 38-45. DOI: https://doi.org/10.12912/27197050/154908.

83. Evaluation of Reclamation Soil Quality in Coal Mining Subsidence Area Based on CA-CDA-PCA-MF / S. Liu et al. Sustainability. 2025. Vol. 17, No. 6. Art. 2561. DOI: https://doi.org/10.3390/su17062561.

84. Somprasong K. Estimation of potential carbon sequestration in Thai reforestation from mining, based on the integrated spatial analysis. Carbon Management. 2024. Vol. 15, No. 1. Art. 2347883. DOI: https://doi.org/10.1080/17583004.2024.2347883.

85. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis / M. Mayer et al. Forest Ecology and Management. 2020. Vol. 466. Art. 118127. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127.

86. Nahlik A. M., Fennessy M. S. Carbon storage in US wetlands. Nature Communications. 2016. Vol. 7, No. 1. Art. 13835. DOI: https://doi.org/10.1038/ncomms13835.

87. ISO 14001:2015. Environmental management systems – Requirements with guidance for use. Geneva: ISO, 2015. URL: https://www.iso.org/standard/60857.html (дата звернення: 10.04.2025).

88. IPBES. Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services / ed. by S. Díaz et al. Bonn: IPBES Secretariat, 2019. 56 p. URL: https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/inline/files/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers.pdf (дата звернення: 10.04.2025).

89. Impacts of mining on vegetation phenology and sensitivity assessment of spectral vegetation indices to mining activities in arid/semi-arid areas / X. Sun et al. Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 356. Art. 120678. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120678.

90. Про затвердження Інструкції з інвентаризації зелених насаджень у населених пунктах України : наказ Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України від 24.12.2001 р. № 226. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0182-02 (дата звернення: 29.06.2024).

91. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services / M. Drusch et al. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. P. 25-36. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026.

92. Північний гірничо-збагачувальний комбінат: офіційний сайт. URL: https://sevgok.metinvestholding.com (дата звернення: 29.06.2025).

93. Центральний гірничо-збагачувальний комбінат: офіційний сайт групи Метінвест. URL: https://metinvestholding.com (дата звернення: 29.06.2025).

94. Ferrexpo Poltava Mining : офіційний сайт. URL: https://www.ferrexpo.ua (дата звернення: 29.06.2025).

95. Кірейцева Г. В., Хоменко С. В. Вуглецевий слід виробництва залізорудних окатишів та шляхи його зменшення. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2025. Вип. 6 (155). С. 89-97. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.6.12.

96. Кірейцева Г., Виговська О., Хоменко С. Інтегрована модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України. Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування». 2025. Вип. 2 (8). С. 10-19. DOI: https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.

97. Біленко П. В., Єременко Г. І., Жуков С. О. Нові детермінативи застосування круто-похилих конвеєрів при відпрацюванні круто-спадаючих родовищ. Гірничий вісник. 2022. Вип. 110. С. 102-107. DOI: https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110-102-107.

98. Про затвердження переліку видів діяльності, викиди парникових газів в результаті провадження яких підлягають моніторингу, звітності та верифікації : постанова Кабінету Міністрів України від 23.09.2020 р. № 880 (в ред. постанови Кабінету Міністрів України від 17.11.2023 р. №

URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/880-2020-%D0%BF (дата звернення: 29.06.2025).

99. Національний кадастр антропогенних викидів із джерел та абсорбції поглиначами парникових газів в Україні: 1990-2023 : офіційні дані. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/zmina-klimatu/naczionalna-inventaryzacziya-parnykovyh-gaziv/ (дата звернення: 29.06.2026).

100. ДСТУ ISO 10693:2001. Якість ґрунту. Визначання вмісту карбонатів. Об'ємний метод (ISO 10693:1995, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2001.

101. ДСТУ ГОСТ 23581.9:2008. Руди залізні, концентрати, агломерати і окатиші. Методи визначення вмісту вуглецю. Київ : Держспоживстандарт України, 2008.

102. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda. Washington, DC : The National Academies Press, 2019. Chapter 3: Terrestrial Carbon Removal and Sequestration. DOI: https://doi.org/10.17226/25259.

103. McPherson E. G., van Doorn N. S., Peper P. J. Urban Tree Database and Allometric Equations. Albany, CA : USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, 2016. 86 p. (General Technical Report PSW-GTR-253). DOI: https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-253.

104. Лакида П. І. Фітомаса лісів України : монографія. Тернопіль: Збруч, 2002. 256 с.

105. Пастернак В., Пивовар Т., Гармаш А. Біопродуктивність та динаміка запасів вуглецю модальних соснових насаджень у Лівобережному Лісостепу України. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2025. Т. 28. С. 149-156. DOI: https://doi.org/10.15421/412512.

106. Підходи до організації системи моніторингу накопичення вуглецю в лісах НПП «Кременецькі гори» / В. Пастернак та ін. Лісівництво і агролісомеліорація. 2025. Вип. 146. С. 75-82. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.146.2025.75.

107. Лакида П. І., Василишин Р. Д., Василишин О. М. Надземна фітомаса та вуглецево-енергетичний потенціал ялицевих деревостанів Українських Карпат: монографія. Корсунь-Шевченківський : ФОП Гавришенко В. М., 2010. 240 с.

108. Лакида П. І., Ловинська В. М. Моделювання ходу росту соснових деревостанів Північного Придніпровського Степу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2020. Вип. 136. С. 3–11. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.136.2020.3.

109. Довідник з лісового насінництва : практ. посіб. / С. А. Лось та ін. Харків : УкрНДІЛГА, 2017.

110. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS / J. W. Rouse et al. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Washington, DC: NASA, 1974. Vol. 1 (NASA SP-351). P. 309-317.

111. Sentinel-2 User Handbook. European Space Agency, Copernicus Programme. URL: https://sentiwiki.copernicus.eu (дата звернення: 29.06.2026).

112. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W. J. Frampton et al. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. P. 83-92. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007.

113. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment. 1988. Vol. 25, No. 3. P. 295-309. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X.

114. Chen J. M., Cihlar J. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. Remote Sensing of Environment. 1996. Vol. 55, No. 2. P. 153-162. DOI: https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00195-6.

115. Gan Y., Griffin W. M. Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China – Uncertainty and trends. Resources Policy. 2018. Vol. 58. P. 90-96. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.03.015.

116. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production / R. Remus et al. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, 2013. 671 p. (EUR 25521 EN).

117. ISO 14064-1:2018. Greenhouse gases – Part 1: Specification with guidance at the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals. Geneva: ISO, 2018.

118. Про промислові викиди (інтегроване запобігання та контроль забруднення): Директива 2010/75/ЄС Європейського Парламенту і Ради від 24.11.2010 р. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075 (дата звернення: 29.06.2026).

119. Кірейцева Г. В., Хоменко С. В. Впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів як інструмент євроінтеграції України. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2025. Вип. 1 (150). С. 81-91. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.1.10.

120. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. Official Journal of the European Union. 2003. L 275. P. 32-46. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2003/87/oj (дата звернення: 20.09.2025).

121. Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2066 of 19 December 2018 on the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC. Official Journal of the European Union. 2018. L 334. P. 1-93. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2018/2066/oj (дата звернення: 20.09.2025).

122. ISO 14067:2018. Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification. Geneva: ISO, 2018. URL: https://www.iso.org/standard/71206.html (дата звернення: 20.09.2025).

123. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: ISO, 2006. URL: https://www.iso.org/standard/37456.html (дата звернення: 20.09.2025).

124. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2006. URL: https://www.iso.org/standard/38498.html (дата звернення: 20.09.2025).

125. ISO 14404-1:2024. Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production – Part 1: Steel plant with blast furnace. Geneva: ISO, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/88110.html (дата звернення: 20.09.2025).

126. ISO 14404-2:2024. Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production – Part 2: Steel plant with electric arc furnace. Geneva: ISO, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/88111.html (дата звернення: 20.09.2025).

127. ISO 14404-3:2024. Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production – Part 3: Steel plant with electric arc furnace and coal-based or gas-based direct reduction iron facility. Geneva: ISO, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/85990.html (дата звернення: 20.09.2025).

128. Commission Implementing Regulation (EU) 2023/1773 of 17 August 2023 laying down the rules for the application of Regulation (EU) 2023/956 as regards reporting obligations for the purposes of the carbon border adjustment mechanism during the transitional period. Official Journal of the European Union. 2023. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2023/1773/oj (дата звернення: 20.09.2025).

129. Lv W., Sun Z., Su Z. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of iron pelletizing process in China, a case study. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 233. P. 1314-1321. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.180.

130. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine / A. Devlin et al. Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 466. Art. 142675. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142675.

131. International Energy Agency. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking. Paris: IEA, 2020. DOI: https://doi.org/10.1787/3dcc2a1b-en.

132. Power-to-Steel: Reducing CO2 through the Integration of Renewable Energy and Hydrogen into the German Steel Industry / A. Otto et al. Energies. 2017. Vol. 10, No. 4. Art. 451. DOI: https://doi.org/10.3390/en10040451.

133. Industrial decarbonization via hydrogen: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options / S. Griffiths et al. Energy Research & Social Science. 2021. Vol. 80. Art. 102208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102208.

134. OECD. Emissions Measurement and Data Collection for a Net Zero Steel Industry. OECD Science, Technology and Industry Policy Papers. Paris: OECD Publishing, 2023. DOI: https://doi.org/10.1787/6adb6d11-en.

135. World Steel Association. CO2 Data Collection User Guide. Version 11. Brussels: World Steel Association, 2023. URL: https://worldsteel.org/wp-content/uploads/CO2_User_Guide_V11.pdf (дата звернення: 20.09.2025).

136. World Steel Association. Life Cycle Inventory Methodology Report. Brussels: World Steel Association, 2021. URL: https://worldsteel.org/wider-sustainability/life-cycle-thinking/life-cycle-assessment-methodology/ (дата звернення: 20.09.2025).

137. Commission Implementing Regulation (EU) 2024/2493 of 23 September 2024 amending Implementing Regulation (EU) 2018/2066 as regards updating the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions. Official Journal of the European Union. 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2024/2493/oj (дата звернення: 20.09.2025).

138. ISO 14064-3:2019. Greenhouse gases – Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements. Geneva: ISO, 2019. URL: https://www.iso.org/standard/66455.html (дата звернення: 20.09.2025).

139. Commission Implementing Regulation (EU) 2018/2067 of 19 December 2018 on the verification of data and on the accreditation of verifiers pursuant to Directive 2003/87/EC. Official Journal of the European Union. 2018. L 334. P. 94-134. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2018/2067/oj (дата звернення: 20.09.2025).

140. Winiwarter W., Rypdal K. Assessing the uncertainty associated with national greenhouse gas emission inventories: a case study for Austria. Atmospheric Environment. 2001. Vol. 35, No. 32. P. 5425-5440. DOI: https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00171-6.

141. Celik G., Yucel O., Yilmaz Z. Comparing the economic impact of carbon border adjustment mechanism: A cross-country analysis of Turkey, Ukraine, and Serbia.

Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 520. Art. 146141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146141.

142. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів: ДСП 173-96 : затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 19.06.1996 р. № 173 (зі змінами, внесеними наказом МОЗ України від 13.01.2026 р. № 40). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96 (дата звернення: 20.09.2025).

143. Breiman L. Random Forests. Machine Learning. 2001. Vol. 45, No. 1. P. 5-32. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

144. Belgiu M., Drăguţ L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 114. P. 24–31. DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.

145. Нонік Л. Ю., Давидова І. В., Куницька М. С. Екологічні функції лісових насаджень та критерії їх ефективності у біологічній рекультивації земель, порушених відкритим видобуванням корисних копалин. Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. 2026. Вип. 150. С. 331-338. DOI: https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.150.37.

146. Misebo A. M., Pietrzykowski M., Woś B. Soil Carbon Sequestration in Novel Ecosystems at Post-Mine Sites – A New Insight into the Determination of Key Factors in the Restoration of Terrestrial Ecosystems. Forests. 2022. Vol. 13, No. 1. Art. 63. DOI: https://doi.org/10.3390/f13010063.

147. Review of Remote Sensing-Based Methods for Forest Aboveground Biomass Estimation: Progress, Challenges, and Prospects / L. Tian et al. Forests. 2023. Vol. 14, No. 6. Art. 1086. DOI: https://doi.org/10.3390/f14061086.

148. Estimating Grassland Parameters from Sentinel-2: A Model Comparison Study / M. Schwieder et al. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science. 2020. Vol. 88, No. 5. P. 379-390. DOI: https://doi.org/10.1007/s41064-020-00120-1.

149. Shomko O., Davydova I. Assessment of forest vegetation potential of reclaimed areas after ilmenite mining using the remote Earth sensing method. Environmental Problems. 2024. Vol. 9, No. 1. P. 14-20. DOI: https://doi.org/10.23939/ep2024.01.014.

150. Шомко О., Давидова І. Динаміка індексів вегетації (NDVI) та вологості (NDMI) рекультивованих територій, порушених унаслідок видобутку ільменіту в Житомирському Поліссі. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 1 (144). С. 131-139. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.17.

151. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests / J. Chave et al. Oecologia. 2005. Vol. 145, No. 1. P. 8799. DOI: https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x.

152. National-scale biomass estimators for United States tree species / J. C. Jenkins et al. Forest Science. 2003. Vol. 49, No. 1. P. 12-35. DOI: https://doi.org/10.1093/forestscience/49.1.12.

153. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe / D. Zianis et al. Silva Fennica Monographs. 2005. Vol. 4. P. 1-63. DOI: https://doi.org/10.14214/sf.sfm4.

154. Nowak D. J., Crane D. E. The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying urban forest structure and functions. Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century / ed. by M. Hansen, T. Burk. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, 2000. P. 714-720.

155. USDA Forest Service, Northern Research Station. i-Tree Eco User's Manual v. 6.0. 2020. URL: https://www.itreetools.org (дата звернення: 29.06.2025).

156. Quantifying Regulating Ecosystem Services of Urban Trees: A Case Study of a Green Space at Chungnam National University Using i-Tree Eco / W. P. Hintural et al. Forests. 2024. Vol. 15, No. 8. Art. 1446. DOI: https://doi.org/10.3390/f15081446.

157. Expectations of i-Tree Eco as a tool for urban tree management in Nordic cities / J. D. Sjöman et al. Frontiers in Sustainable Cities. 2024. Vol. 5. Art. 1325039. DOI: https://doi.org/10.3389/frsc.2023.1325039.

158. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. Environmental Pollution. 2002. Vol. 116, No. 3. P. 381-389. DOI: https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7.

159. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States / D. J. Nowak et al. Environmental Pollution. 2013. Vol. 178. P. 229-236. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.019.

160. Carbon sequestration and storage potential of urban green in residential yards: A case study from Helsinki / M. Ariluoma et al. Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 57. Art. 126939. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126939.

161. Assessing urban tree carbon storage and sequestration in Bolzano, Italy / A. Russo et al. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management. 2014. Vol. 10, No. 1. P. 54-70. DOI: https://doi.org/10.1080/21513732.2013.873822.

162. Carbon Sequestration and Storage of Urban Trees in a Polluted Semiarid City / R. Rasoolzadeh et al. Forests. 2024. Vol. 15, No. 9. Art. 1488. DOI: https://doi.org/10.3390/f15091488.

163. Contribution of ecosystem services to air quality and climate change mitigation policies: The case of urban forests in Barcelona, Spain / F. Baró et al. Ambio. 2014. Vol. 43, No. 4. P. 466–479. DOI: https://doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x.

164. Enquist B. J., West G. B., Brown J. H. Extensions and evaluations of a general quantitative theory of forest structure and dynamics. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2009. Vol. 106, No. 17. P. 7046-7051. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.0812303106.

165. West G. B., Brown J. H., Enquist B. J. A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. Nature. 1999. Vol. 400. P. 664-667. DOI: https://doi.org/10.1038/23251.

166. Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake: Global Distribution and Covariation with Climate / C. Beer et al. Science. 2010. Vol. 329, No. 5993. P. 834-838. DOI: https://doi.org/10.1126/science.1184984.

167. Role of forest regrowth in global carbon sink dynamics / T. A. M. Pugh et al. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2019. Vol. 116, No. 10. P. 4382-4387. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1810512116.

168. Natural climate solutions / B. W. Griscom et al. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, No. 44. P. 11645-11650. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114.

169. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth / S. C. Cook-Patton et al. Nature. 2020. Vol. 585, No. 7826. P. 545-550. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x.

170. Пастернак В. П., Пивовар Т. С., Гармаш А. В. Моделі динаміки показників модальних штучних соснових деревостанів Лівобережного Лісостепу України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2024. Вип. 144. С. 44-51. DOI: https://doi.org/10.33220/1026-3365.144.2024.44.

171. Green infrastructure and public policies: an international review of green roofs and green walls incentives / T. Liberalesso et al. Land Use Policy. 2020. Vol. 96. Art. 104693. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693.

172. Pietrzykowski M. Tree species selection and reaction to mine soil reconstructed at reforested post-mine sites: Central and eastern European experiences. Ecological Engineering: X. 2019. Vol. 3. Art. 100012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100012.

173. Ordóñez C., Duinker P. N. Assessing the vulnerability of urban forests to climate change. Environmental Reviews. 2014. Vol. 22, No. 3. P. 311-321. DOI: https://doi.org/10.1139/er-2013-0078.

174. Green infrastructure for air quality plus (GI4AQ+): defining critical dimensions for implementation in schools and the meaning of «plus» in a UK context / M. d. C. Redondo-Bermúdez et al. Nature-Based Solutions. 2022. Vol. 2. Art. 100017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100017.

175. Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence / F. Bottalico et al. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2016. Vol. 8. P. 243-251. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.099.

176. ISO 14064-2:2019. Greenhouse gases – Part 2: Specification with guidance at the project level for quantification, monitoring and reporting of greenhouse gas emission reductions or removal enhancements. Geneva: ISO, 2019. URL: https://www.iso.org/standard/66454.html (дата звернення: 20.09.2025).

177. ISO 14068-1:2023. Climate change management – Transition to net zero – Part 1: Carbon neutrality. Geneva: ISO, 2023. URL: https://www.iso.org/standard/43279.html (дата звернення: 20.09.2025).

178. Commission Implementing Decision 2012/135/EU of 28 February 2012 establishing the best available techniques conclusions for iron and steel production. Official Journal of the European Union. 2012. L 70. P. 63–98. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2012/135/oj (дата звернення: 20.09.2025).

179. International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2023. Paris: IEA, 2023. URL: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023 (дата звернення: 20.09.2025).

180. U.S. Department of Energy. Industrial Decarbonization Roadmap. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2022. URL: https://www.energy.gov/eere/doe-industrial-decarbonization-roadmap (дата звернення: 20.09.2025).

181. Mission Possible Partnership. Making Net-Zero Steel Possible: An Industry-Backed, 1.5°C-Aligned Transition Strategy. 2022. URL: https://www.missionpossiblepartnership.org/action-sectors/steel/ (дата звернення: 20.09.2025).

182. Ghafouri H., Mohtavipour S. S. Dynamic model of CO2 reduction policies: another step towards a cleaner generation expansion. Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 369. Art. 133191. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133191.

183. International Energy Agency. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Paris: IEA, 2021. URL: https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050 (дата звернення: 20.09.2025).

184. United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air … Please! Nairobi: UNEP, 2024. URL: https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2024 (дата звернення: 20.09.2025).

185. Science Based Targets initiative. Steel Science-Based Target-Setting Guidance. Version 1.0. London: SBTi, 2023. URL: https://sciencebasedtargets.org/sectors/steel (дата звернення: 20.09.2025).

186. Decarbonizing primary steel production: Techno-economic assessment of a hydrogen based green steel production plant in Norway / A. Bhaskar et al. Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 350. Art. 131339. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131339.

187. Green steel: design and cost analysis of hydrogen-based direct iron reduction / F. Rosner et al. Energy & Environmental Science. 2023. Vol. 16, No. 10. P. 4121–4134. DOI: https://doi.org/10.1039/D3EE01077E.

188. Decarbonization Pathways, Strategies, and Use Cases to Achieve Net-Zero CO2 Emissions in the Steelmaking Industry / J. R. Diez et al. Energies. 2023. Vol. 16, No. 21. Art. 7360. DOI: https://doi.org/10.3390/en16217360.

189. IRENA. Green Hydrogen for Industry: A Guide to Policy Making. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022. URL: https://www.irena.org/Publications/2022/Mar/Green-Hydrogen-for-Industry (дата звернення: 20.09.2025).

190. Monte Carlo (Tier 2) uncertainty analysis of Danish Greenhouse gas emission inventory / P. Fauser et al. Greenhouse Gas Measurement and Management. 2011. Vol. 1, No. 3–4. P. 145-160. DOI: https://doi.org/10.1080/20430779.2011.621949.

191. Gront E. W., Gront D. Assessing Uncertainty in the Polish Agricultural Greenhouse Gas Emission Inventory Using Monte Carlo Simulation. Outlook on Agriculture. 2014. Vol. 43, No. 1. P. 61–65. DOI: https://doi.org/10.5367/oa.2014.0155.

192. ISO 14090:2019. Adaptation to climate change – Principles, requirements and guidelines. Geneva: ISO, 2019. URL: https://www.iso.org/standard/68507.html (дата звернення: 20.09.2025).

193. ISO 14091:2021. Adaptation to climate change – Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment. Geneva: ISO, 2021. URL: https://www.iso.org/standard/68508.html (дата звернення: 20.09.2025).

194. Rypdal K., Flugsrud K. Sensitivity analysis as a tool for systematic reductions in greenhouse gas inventory uncertainties. Environmental Science & Policy. 2001. Vol. 4, No. 2-3. P. 117-135. DOI: https://doi.org/10.1016/S1462-9011(01)00021-1.

195. Regulation (EU) 2024/1244 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on reporting of environmental data from industrial installations and

establishing an Industrial Emissions Portal. Official Journal of the European Union. 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1244/oj (дата звернення: 20.09.2025).

196. Інтеграція ESG-критеріїв та екологічних стандартів ЄС у системах управління кар'єрним транспортом / Л. Герасимчук та ін. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2025. № 4. DOI: https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-4-11.

197. Прищепа А. М., Самчук В. М. Актуальні світові підходи до моніторингу міських зелених насаджень. Вісник НУВГП. Серія «Сільськогосподарські науки». 2025. Вип. 4 (112). С. 190–200. DOI: https://doi.org/10.31713/vs4202515.

198. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards. Official Journal of the European Union. 2023. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2772/oj (дата звернення: 20.09.2025).

199. Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as regards corporate sustainability reporting. Official Journal of the European Union. 2022. L 322. P. 15-80. URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj (дата звернення: 20.09.2025).

200. ResponsibleSteel. International Standard. Version 2.1. Wollongong: ResponsibleSteel, 2024. URL: https://www.responsiblesteel.org/standards (дата звернення: 20.09.2025).

201. IFRS Foundation. IFRS S2 Climate-related Disclosures. London: IFRS Foundation, 2023. URL: https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s2-climate-related-disclosures/ (дата звернення: 20.09.2026).

202. The impact of forest fires in the context of climate change: an interdisciplinary analysis / I. Patseva et al. Technology Audit and Production Reserves. 2025. No. 3 (83). P. 25–37. DOI: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.331295.

203. Пацева І. Г., Кагукіна А. М. Відновлення деградованих лісових екосистем внаслідок бойових дій в умовах змін клімату. Екологічні науки. 2025. № 2 (59). С. 173–177. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.26.

ДОДАТКИ

Асоціація професіоналів довкілля PAEW

PAEW
Professional Association of Environmentalists of the World

0 800 330 351
info@pae.com.ua
https://pae.com.ua
03087, Київ-87 а/с 25

№ 2с/05/1с3 від 1 травня 202с р.

ДОВІДКА
про використання результатів наукового дослідження в діяльності ГС «Асоціація професіоналів довкілля»

Засвідчую, що в рамках дисертаційного дослідження Хоменко Світлани Володимирівни на тему «Вуглецевий баланс промислових територій з урахуванням секвестраційного потенціалу буферних екосистем» розроблено науково-методичні матеріали, які використовуються в експертній, консультаційній та освітній діяльності ГС «Асоціація професіоналів довкілля».

Розроблені методичні підходи до просторової оцінки стану рослинного покриву санітарно-захисних зон на основі супутникових знімків Sentinel-2 з класифікацією земного покриву методом Random Forest та розрахунком спектральних індексів (NDVI, SAVI, IRECI) впроваджено у практику ГС «Асоціація професіоналів довкілля» при:

- проведенні експертної оцінки стану буферних екосистем промислових підприємств у рамках консультаційного супроводу підготовки корпоративних ESG-звітів відповідно до стандартів ESRS;
- наданні консультацій промисловим підприємствам щодо кількісної оцінки вуглепоглинальної здатності санітарно-захисних зон та визначення коефіцієнта вуглецевої компенсації для формування карбонових реєстрів;
- впровадженні навчальних матеріалів у програми семінарів та тренінгів для фахівців-екологів і представників промислових підприємств з питань підготовки до CBAM-верифікації та формування карбонових реєстрів.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження дозволило розширити науково-методичне підґрунтя консультаційної діяльності асоціації у сфері кліматичного регулювання та сприяло підвищенню обізнаності промислових підприємств щодо методів інтегрованої оцінки вуглецевого балансу в умовах євроінтеграційних процесів.

Практичні розробки дисертаційного дослідження впроваджені у навчальні програми семінарів та тренінгів, що проводяться асоціацією для фахівців-екологів та представників громад.

Президентка
Асоціації професіоналів довкілля — Людмила ЦИГАНОК

ОФІС СТАЛИХ РІШЕНЬ
0 800-330-351
liudmyla@ukraine-oss.com

№ 05/26-2 від 1 травня 2026 р.

ДОВІДКА

про використання результатів наукового дослідження в діяльності

ТОВ «Офіс сталих рішень»

Засвідчую, що в рамках дисертаційного дослідження ***Хоменко Світлани Володимирівни*** на тему ***«Вуглецевий баланс промислових територій з урахуванням секвестраційного потенціалу буферних екосистем»*** розроблено науково-практичні рекомендації, які використовуються в діяльності ТОВ «Офіс сталих рішень» у сфері сталого розвитку та декарбонізації.

Розроблені дисертанткою сценарії декарбонізації гірничо-збагачувальних підприємств та науково-практичні рекомендації щодо підвищення вуглецепоглинальної здатності буферних екосистем санітарно-захисних зон впроваджено в діяльність ТОВ «Офіс сталих рішень» при:

- розробці стратегій декарбонізації для підприємств гірничо-добувного сектору у частині оцінки компенсаційного потенціалу буферних екосистем та моделювання сценаріїв підвищення секвестраційної ефективності насаджень;
- підготовці обґрунтувань для проєктів розширення та реструктуризації санітарно-захисних зон промислових підприємств з урахуванням зонального видового складу насаджень та прогнозованого секвестраційного ефекту;
- розробці методичних матеріалів для корпоративної звітності зі сталого розвитку (CSRD/ESRS E1) у частині кількісного визначення поглинання CO_2 буферними екосистемами та розрахунку коефіцієнта вуглецевої компенсації підприємств;
- формуванні рекомендацій для органів місцевого самоврядування щодо врахування вуглецево-компенсаційного потенціалу промислово-природних комплексів при плануванні відновлення та розвитку територій.

Впровадження зазначених розробок дозволило вдосконалити підходи ТОВ «Офіс сталих рішень» до розробки стратегій сталого розвитку промислових підприємств, інтегрувавши кількісну оцінку вуглецево-компенсаційного потенціалу буферних екосистем у комплексні програми декарбонізації та ESG-звітності.

Виконавчий Директор

ТОВ «Офіс сталих рішень» **Ганна Приступа**

ТОВ «ЕКО-МБ»
вул. Синельниківська, 14
корп.6, приміщення 1
м.Житомир, 10008

ЄДРПОУ 37857701
р\р UA263052990000026007006409258
тел. 0(412)46-16-60, 067-411-06-64
email: eko-mb@ukr.net https: eko-mb.com.ua

ДОВІДКА

про використання результатів наукового дослідження в діяльності ТОВ «ЕКО-МБ»

Засвідчую, що в рамках дисертаційного дослідження Хоменко Світлани Володимирівни на тему «Вуглецевий баланс промислових територій з урахуванням секвестраційного потенціалу буферних територій» розроблено науково-методичні рекомендації, які використовуються в проєктній та експертній діяльності ТОВ
«ЕКО-МБ».

Розроблені науково-методичні матеріали впроваджено в рамках виконання госпдоговірної науково-дослідної роботи «Оцінка викидів парникових газів та вуглецепоглинальної здатності природних екосистем Житомирської області» (договір № 12.01-НДР-02-2026 від 02 січня 2026 р. між Державним університетом «Житомирська політехніка» і ТОВ «ЕКО-МБ», державна реєстрація 0126U000746 від 25.01.2026 р.), науковий керівник – Хоменко Світлана Володимирівна. Зокрема, впроваджено розроблену методику розрахунку обсягів викидів CO_2 від гірничо-збагачувальних підприємств із застосуванням комбінованого підходу (стандартний метод М1 для паливних потоків та метод балансу мас М4 для процесних викидів від декарбонізації вапняку). Методика застосовується при:

- проведенні оцінки впливу на довкілля для планованої діяльності гірничо-збагачувальних та металургійних підприємств у частині оцінки прямих викидів парникових газів (Scope 1) та їх відповідності вимогам механізму CBAM ЄС;
- розробці розділів екологічної звітності підприємств відповідно до стандартів ESRS E1 у частині кількісного визначення вуглецевого сліду виробничих процесів;
- підготовці науково-обґрунтованих рекомендацій щодо заходів декарбонізації технологічних процесів виробництва залізорудних окатків та мінімізації процесних викидів CO_2.

Впровадження зазначених розробок дозволило підвищити якість та повноту звітів з оцінки впливу на довкілля для промислових об'єктів гірничо-збагачувального сектору, забезпечити методологічну відповідність розрахунків вимогам Регламенту ЄС 2023/956(CBAM) та підвищити точність визначення питомої вуглецевої інтенсивності продукції для цілей експортної звітності.

Директор
ТОВ «ЕКО-МБ» Олександр МЕДВІДЬ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська,103, м. Житомир, 10005
103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005
Phone./fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870
СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015 та ДСТУ ISO 21001:2019
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015 and ISO 21001:2019

Від 08.05.2026 № 44-23.07/787
На № _____ від _____

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукового дослідження
ХОМЕНКО Світлани Володимирівни в навчальний процес
Державного університету «Житомирська політехніка»

Засвідчую, що наукові та науково-практичні результати й рекомендації щодо їх впровадження здобувача кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування С. В. Хоменко щодо комплексної оцінки вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, яка поєднує кількісну інвентаризацію прямих викидів парникових газів (Scope 1) з оцінкою секвестраційного потенціалу буферних екосистем санітарно-захисних зон, використовуються в навчальному процесі денної та заочної форм навчання факультету гірничої справи, природокористування та будівництва Державного університету «Житомирська політехніка».

Пропозиції з удосконалення вибіркової навчальної дисципліни «Моніторинг, звітність та верифікація викидів парникових газів» впроваджені у навчальний процес університету при підготовці фахівців за освітньо-професійними рівнями бакалавр і магістр за спеціальністю Е2 «Екологія».

На основі пропозицій та висновків, наведених у дисертації С. В. Хоменко, підготовлений навчально-методичний комплекс у складі навчальної програми дисципліни, методичного забезпечення до лекційних і практичних занять та самостійної роботи студентів, що забезпечує ознайомлення здобувачів вищої освіти із сучасними міжнародними та національними підходами до моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів на прикладі підприємств гірничо-металургійного комплексу.

Використання результатів дослідження С. В. Хоменко свідчить про їх завершеність, реальність і можливість впровадження у навчальний процес закладів вищої освіти.

Перший проректор Димитрій ГРИЦИШЕН

ТОВ «ЦЕНТР ЕКОЛОГІЇ ТА РОЗВИТКУ НОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ»
Україна, 01032, м. Київ, вул. Гетьмана
Павла Скоропадського,, офіс № 75
office@cern.com.ua +38 044 390 35 86
www.cern.com.ua +38 067 620 33 55

ДОВІДКА
про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Засвідчуємо, що результати дисертаційного дослідження **Хоменко Світлани Володимирівни** на тему **«Вуглецевий баланс промислових територій з урахуванням секвестраційного потенціалу буферних екосистем»** використано в консультаційній та науково-практичній діяльності ТОВ «Центр екології та розвитку нових технологій» у сфері обліку викидів парникових газів та розроблення рекомендацій щодо декарбонізації промислових підприємств.

Практичне значення впроваджених результатів полягає у використанні науково-методичних підходів до комплексного оцінювання викидів парникових газів промислових підприємств, визначення вуглепоглинальної здатності зелених насаджень та обґрунтування заходів із декарбонізації промислових територій.

Зокрема, використано запропонований у дисертації підхід до інтегрованого оцінювання вуглецевого балансу гірничо-збагачувальних підприємств, який поєднує кількісну інвентаризацію прямих паливних і процесних викидів CO_2 з розрахунковим оцінюванням річної секвестрації деревно-чагарникового покриву буферних екосистем.

Результати впровадження мають науково-методичне та практичне значення і можуть бути використані під час підготовки екологічних рекомендацій, аналітичних матеріалів, планів скорочення викидів парникових газів і заходів із підвищення кліматичної стійкості.

Директор В. Антипов

IBAN UA103348510000000002600116955
Банк АТ «ПУМБ» в м. Київ
ЄДРПОУ 40118586
ІПН 401185826532