

УДК (528.9+630.92):(504.38+551.583)
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.2\(500\).49](https://doi.org/10.15589/znp2025.2(500).49)

POSSIBILITIES OF ADAPTING GIS FOR DETERMINING THE DYNAMICS OF CARBON STOCKS IN FOREST BIOMASS IN THE CONTEXT OF IPCC

МОЖЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ ГІС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІКИ ЗАПАСІВ ВУГЛЕЦЮ В БІОМАСІ ЛІСОВИХ НАСАДЖЕНЬ В КОНТЕКСТІ ІРСС

Nataliia M. Maksymova
natalya.maksymova@mipolytech.education
ORCID: 0000-0003-1684-7479

Yurii I. Cheberiachko
yurii.cheberiachko@mipolytech.education
ORCID: 0000-0001-7307-1553

Halyna O. Petrushyna
petrushyna.h.o@dsau.dp.ua
ORCID: 0000-0001-5508-5193

Daryna O. Miniailo
daryna.miniailo@mipolytech.education
ORCID: 0009-0007-4786-1798

Н. М. Максимова¹,
канд. техн. наук, доцент

Ю. І. Чеберячко^{1,2},
докт. техн. наук, професор

Г. О. Петрушина³,
канд. хім. наук, доцент

Д. О. Міняйло¹,
студентка

¹*Technical University "Metinvest Polytechnic" LLC, Zaporizhzhia*

²*Dnipro University of Technology, Dnipro*

³*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*

¹*ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка», м. Запоріжжя*

²*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро*

³*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро*

Abstract. Due to the international need to implement climate policy and climate change adaptation measures at all levels, from global to local, the general promotion and familiarisation of all segments of the population with online tools that provide an analytical overview of the links between the level of forestation and the CO₂ balance is a highly relevant scientific and practical task.

Aim. The aim of the study is to assess of a part of the carbon balance of two areas with developed mining industry, which are located in the steppe and forest-steppe zones with different climatic conditions and different levels of sustainable tree cover using open access GIS map data.

Methods. Determining the annual change in carbon stocks in biomass on non-forest land converted to forest and forest land based on the first tier methodology part of the Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories for the Land Use, Land Use Change and Forestry Sector. Consideration of carbon balance data for two mining districts obtained from the Global Forest Watch project.

Research methods used: information analysis; analytical methods for assessing the state of sustainable tree cover and carbon balance of two areas with a developed mining industry using the Global Forest Watch; calculation and analytical methods for determining the annual change in carbon stocks in biomass.

Results. The calculation of the annual change in carbon stocks in biomass on non-forest land converted to forest and forestry land does not contradict the carbon balance of the two mining areas under consideration, obtained from Global Forest Watch, but also details one of its articles. The carbon balance of the areas with developed mining industry, which according to the Global Forest Watch online application are considered to be covered with sustainable forest cover of natural and/or artificial origin, is characterised by a negative carbon balance, i.e. carbon is being absorbed from the atmosphere in areas where sustainable greening is maintained.

Scientific novelty. The achievement of carbon neutrality at both global and local levels makes it expedient to adapt in the educational space and to popularise various modern tools for considering greening in terms of carbon accumulation in biomass to the general population. This scientific and practical task is urgent and requires the involvement of the general population in understanding the basics of the carbon balance, in particular, its accounting items.

Practical significance. The combination of GIS application data analysis with the Tier 1 methodology of the Intergovernmental Panel on Climate Change National Greenhouse Gas Inventories Guidelines allows for an approximate and fairly quick assessment of the state of greenery in the study area, including the level of carbon accumulation in biomass. This combined approach can serve as an educational and awareness-raising tool for different segments of the population.

Key words: landscaping; international climate policy; Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; land use sector; land use change and forestry; Global Forest Watch; CO₂ balance.

Анотація. У зв'язку з міжнародною необхідністю впровадження кліматичної політики та заходів адаптації до змін клімату на всіх рівнях, починаючи від глобального до локального, загальна популяризація і ознайомлення всіх верств населення з онлайн інструментами, які надають можливості аналітичного огляду зв'язків між рівнем заліснення територій та балансом CO₂, є досить актуальною науково-практичною задачею.

Мета. Метою роботи є оцінка частини вуглецевого балансу двох районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю, які знаходяться у степовій та лісостеповій зонах з відмінними кліматичними умовами, а також різним рівнем стійкого деревного покриву за використанням даних ГІС-карти вільного доступу.

Методика. Визначення річної зміни запасів вуглецю в біомасі на площах нелісових земель перетворених на лісові та земель лісового фонду на підставі частини методики за першим рівнем, передбаченої Керівними принципами національних інвентаризацій парникових газів для сектору Землекористування, зміни в землекористуванні та лісове господарство. Врахування даних про вуглецевий баланс двох гірничодобувних районів, отриманих за проектом Global Forest Watch.

Використані методи дослідження: аналіз інформації; аналітичні методи для оцінки стану стійкого деревного покриву та вуглецевого балансу двох районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю за проектом Global Forest Watch; розрахунково-аналітичні методи для визначення річної зміни запасів вуглецю в біомасі.

Результати. Розрахунок річної зміни запасів вуглецю в біомасі на площах нелісових земель перетворених на лісові та земель лісового фонду не суперечить даним про вуглецевий баланс розглянутих двох гірничодобувних районів, отриманих за даними Global Forest Watch, але й деталізує одну із його статей. Вуглецевий баланс територій з розвинутою гірничодобувною промисловістю, що за даними онлайн додатку Global Forest Watch розглядаються як покриті стійким лісовим покривом природного та/або штучного походження, характеризуються від'ємним вуглецевим балансом, тобто відбувається поглинення вуглецю з атмосфери на територіях, на яких підтримується стійке озеленення.

Наукова новизна. Досягнення вуглецевої нейтральності як на глобальному, так і на локальному рівнях обумовлює доцільність адаптації в освітньому просторі та в популяризації широким верствам населення різних сучасних інструментів розгляду озеленення з точки зору акумуляції вуглецю в біомасі. Дана науково-практична задача є нагальною та потребує залучення широких верств населення до розуміння основ вуглецевого балансу, зокрема статей його обліку.

Практична значимість. Поєднання аналізу даних ГІС додатку з методикою рівня 1 Керівних принципів національних інвентаризацій парникових газів Міжурядової групи експертів зі зміни клімату дозволяють наближено і доволі оперативно оцінити стан озеленення досліджуваного району, в тому числі рівень накопичення вуглецю в біомасі. Такий комбінований підхід може виконувати освітницьку та просвітницьку функції для різних верств населення.

Ключові слова: озеленення; міжнародна кліматична політика; Керівні принципи національних інвентаризацій парникових газів; сектор Землекористування; зміни в землекористуванні та лісове господарство; Global Forest Watch; баланс CO₂.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У зв'язку з міжнародною необхідністю впровадження кліматичної політики та заходів адаптації до змін клімату на всіх рівнях, починаючи від глобального до локального, то ознайомлення і адаптація у освітній процес та загальна популяризація серед всіх верств населення щодо можливостей використання онлайн інструментів для аналітичного огляду зв'язків між рівнем заліснення територій та балансом вуглекислого газу (CO₂), є досить актуальною науково-практичною задачею.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

З поточним станом щодо викидів CO₂ та пов'язаних з ними допоміжними даними можна ознайомитись на різних онлайн ресурсах, в тому числі Global Carbon Atlas [1]. Для відслідковування сучасних тенденцій доволі корисним є сайт Global Carbon Budget [2]. На веб-сайті Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) [3] можна ознайомитись з Керівними принципами для національних інвентаризацій парникових газів. Наприклад, з Керівними

принципами національних інвентаризацій парникових газів 2006 року можна ознайомитись на сайті Національного центру обліку викидів парникових газів [4].

Україна підписала Рамкову конвенцію ООН про зміну клімату у червні 1992 р., ратифікувала в жовтні 1996 р., а отже несе зобов'язання щодо розроблення, періодичного оновлення, публікації та надання національних кадастрів антропогенних викидів парникових газів.

В Україні викиди парникових газів обліковуються за секторами, визначеними МГЕЗК [3, 5]: Енергетика (англ. ENERGY); Промислові процеси та використання продуктів (англ. IPPU); Сільське господарство (англ. AFOLU); Землекористування, зміни в землекористуванні та лісове господарство (ЗКЗЛГ або англ. LULUCF); Відходи (англ. WASTE). Енергетичний сектор характеризується найбільшими викидами парникових газів в Україні. Сектор ЗКЗЛГ включає як викиди, так і поглинання двоокису вуглецю (CO_2), а також викиди метану (CH_4) та діоксиду азоту (N_2O).

Точна оцінка антропогенних викидів вуглекислого газу та їх перерозподілу між атмосферою, океаном і наземною біосферою в умовах мінливого клімату має вирішальне значення для кращого розуміння глобального вуглецевого циклу, підтримки розробки кліматичної політики та прогнозування майбутніх змін клімату [6].

Відзначалось, що ліси Європи поглинають близько 10 % викидів вуглекислого газу [7–8], а в світовому розрізі – приблизно третину виділеного в атмосферу CO_2 (станом на 2018 р.) [9–10]. За даними [6] глобальна концентрація CO_2 в атмосфері в середньому за 2023 рік досягла $419,31 \pm 0,1$ ppm. У 2024 р. відбулось збільшення концентрації CO_2 в атмосфері на 2,87 ppm до 422,45 ppm, що на 52 % вище доіндустріального рівня (близько 278 ppm у 1750 році). Порівняльний аналіз даних, розглянутих в роботі [6], показав постійну велику невизначеність в оцінці викидів від зміни землекористування та інших показників.

Темпи зростання концентрації вуглекислого газу (CO_2) в атмосфері з часів індустріалізації характеризуються значною міжрічною мінливістю, що здебільшого є результатом мінливості поглинання CO_2 наземними екосистемами, які зазвичай називаються як поглинач вуглецю. Однак внесок регіональних екосистем у цю мінливість недостатньо відомий [6, 11]. В роботі [6] показано, що середнє поглинання, тренд та міжрічна мінливість поглинання CO_2 наземними екосистемами більш високі за окремими біогеографічними регіонами. Наприклад, більш високі показники поглинання вуглецевого газу характерні для високопродуктивних земель, якими, як правило, вважаються тропічні ліси.

Але авторами роботи [12] відмічається, що тропічні ліси з порушеною рівновагою можуть виступати

як чисте джерело вуглецю, причому втрати внаслідок вирубки лісів та зменшення щільності вуглецю в межах лісів вдвічі більші, ніж прирости в результаті росту лісів. На підставі аналізу ряду даних з 2003 р. по 2014 р. було виявлено, що тропічні ліси оцінюються як чисте джерело вуглецю в розмірі $425,2 \pm 92,0$ тераграмів вуглецю на рік (Tg C рік^{-1}) [12]. Чисте вивільнення вуглецю складається з втрат $861,7 \pm 80,2$ Tg C рік^{-1} та приросту $436,5 \pm 31,0$ Tg C рік^{-1} [12]. Прирости є наслідком росту лісів, а втрати – наслідком вирубки лісів та зменшення щільності вуглецю в лісах (деградація або порушення), причому останнє становить 68,9 % загальних втрат.

Наземна біосфера поглинає близько 20 % викидів CO_2 від викопного палива [13]. Поглинання вуглекислого газу наземною рослинністю розглядається як два потоки, значною мірою протидіючих між собою, які недостатньо добре кількісно визначені: потоків від зміни землекористування та поглинання CO_2 наземними екосистемами.

Між атмосферою і наземними екосистемами відбуваються значні коливання вуглекислого газу (CO_2) внаслідок фотосинтезу та дихання [14]. Рослини витрачають приблизно половину поглиненого CO_2 на процеси дихання, тобто він повертається до атмосфери. Інша частина CO_2 приймає участь у формуванні надземної і підземної біомаси та мертвої органічної речовини [14]. Наприклад, вважається, що одне дерево може абсорбувати до 150 кг вуглекислого газу щорічно [10].

У процесі фотосинтезу трансформація CO_2 відбувається за участю біологічних систем [14]. Після розкладання частина відмерлої органіки повертається як CO_2 до атмосфери, а інша як гумус може зберігатися певний час. Однак за умов інтенсивного землеробства проходить деградація і дегуміфікація ґрунтів, які мінералізують гумус та вивільнюють двоокис вуглецю. За окультурення, навпаки, прослідковується нагромадження вмісту гумусу в ґрунтах [14].

Проекти лісовідновлення та зусилля щодо запобігання подальшому вирубуванню лісів можуть бути важливими шляхами пом'якшення наслідків, що матиме супутні переваги для біорізноманіття [13].

Зменшення лісистості, наприклад внаслідок пожеж, слід розглядати як екологічну, економічну та соціальну загрозу [15]. Для оперативної оцінки яких зручно використовувати сучасні геоінформаційні системи (ГІС), що дозволяють виконати просторовий аналіз, прогнозування та управління лісовими пожежами тощо.

Можливості вдалого використання ГІС у цілях просторово-часового аналізу лісовкритих площ відзначено в роботі [16]. На підставі аналізу космічних знімків популярних геоінформаційних систем, як OpenStreetMap, Google Earth, Sas Planet, виявлено вдале використання ГІС у цілях просторово-часового аналізу лісовкритих площ.

Наприклад, в роботі [17] було використано можливість додатку Global Forest Watch, як один з інструментів для обґрунтування збереження лісових угідь, без перетворення на сільськогосподарські угіддя за регіонами Індонезії в умовах мінливого клімату та адаптації до його змін до 2050 р.

Аналіз ГІС карти Global Forest Watch дозволяє ознайомитися з територіальним розповсюдженням і станом лісів світу, а також з впливом лісів на кліматичні умови [18]. У ГІС проєкті Global Forest Watch деревний покрив визначається як вся рослинність заввишки понад 5 м і може мати форму природних лісів або плантацій з різною щільністю намету. Втрата деревного покриву відноситься до будь-яких порушень, що заміщують деревостани, тобто повне видалення деревного покриву в масштабі 30-метрового пікселя, і не обов'язково прирівнюється до вирубки лісу. Цей набір даних не включає низькоінтенсивні та низові лісові пожежі, які не призводять до значної втрати деревного намету в масштабі 30-метрового пікселя.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри значний прогрес у вивченні зв'язку між рівнем озеленення територій та якістю атмосферного повітря, залишаються невирішеними питання щодо інтеграції відповідних даних та розуміння статей вуглецевого балансу та економічної оцінки наслідків кліматичних змін на рівні місцевих громад, популяризації подібних знань серед різних верств населення.

Для аналізу інформації про кліматичні умови на місцевому рівні, обрано території з розвинутою гірничодобувною промисловістю, а саме м. Кривий Ріг Дніпропетровської області та м. Горішні Плавні Полтавської області (до 2016 р. м. Комсомольськ) та місцеві території, які відносяться до степової і лісостепової зон України [18–20]. Слід відзначити, що актуалізація змін назв адміністративних одиниць та їх кордонів відбувається у проєкті Global Forest Watch доволі повільно, з суттєвим запізненням.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є оцінка частини вуглецевого балансу двох районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю, які знаходяться у степовій та лісостеповій зонах з відмінними кліматичними умовами, а також різним рівнем стійкого деревного покриву за використанням даних ГІС-карти вільного доступу.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – річна зміна запасів вуглецю в біомасі стійкого деревного покриву на прикладі районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю.

Предмет дослідження – порівняльний аналіз зміни річного запасу вуглецю в біомасі стійкого деревного покриву в межах двох районів з розвинутою

гірничодобувною промисловістю, які знаходяться у степовій та лісостеповій зонах за умовно прийнятими даними за проєктом Global Forest Watch.

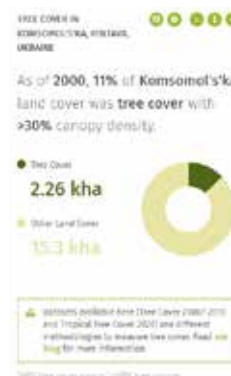
Використані методи дослідження: аналіз інформації; аналітичні методи для оцінки стану стійкого деревного покриву та вуглецевого балансу двох районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю за проєктом Global Forest Watch; розрахунково-аналітичні методи для визначення річної зміни запасів вуглецю в біомасі.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

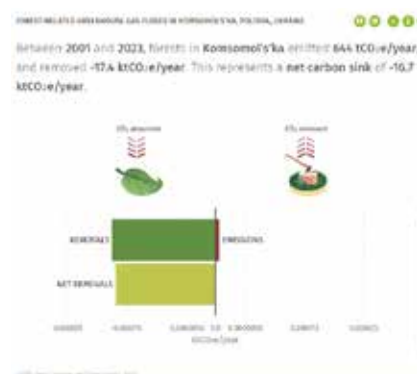
На підставі аналітичного звіту за Global Forest Watch отримано загальні статистичні дані про ліси [18]:

– для м. Горішні Плавні у 2020 році налічувалось 913 га природних лісів, що становило 5,2 % земельної площі. У 2023 році втрачено 10 га природного лісу, що еквівалентно 1,91 тис. тонн викидів CO₂. Станом на 2000 рік 11 % (або 2,26·10³ га) території м. Кривий Ріг становили деревні покриви з щільністю крони понад 30 % (рис. 1) [19];

– на Криворіжжі у 2020 році налічувалось 2,15·10³ га природних лісів, що становило 6,0 % земельної площі. У 2023 році втрачено 4 га природного лісу, що еквівалентно 2,09 тис. тонн викидів CO₂. Станом на 2000 рік 16 % (або 5,89·10³ га) території м. Кривий Ріг становили деревні покриви з щільністю крони понад 30 % (рис. 2) [20].



а



б

Рис. 1. Стан деревного покриву (а) та пов'язані з ним потоки парникових газів (б), м. Горішні Плавні Полтавської області [19]

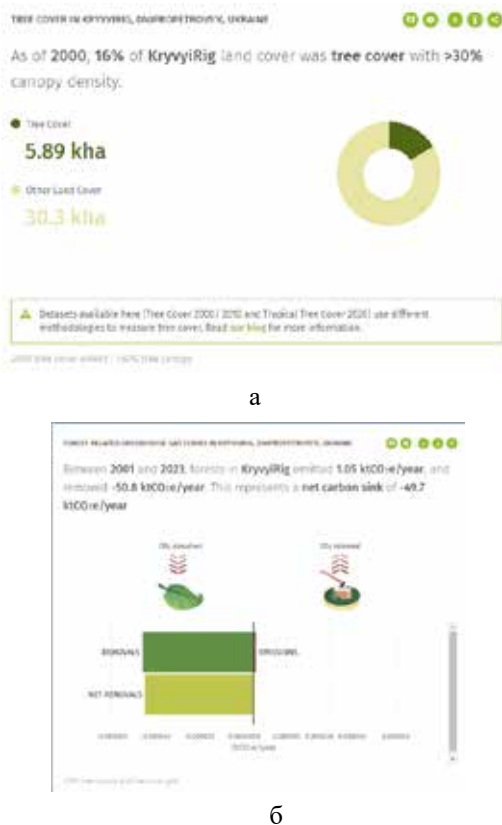


Рис. 2. Стан деревного покриву (а) та пов'язані з ним потоки парникових газів (б), м. Кривий Ріг Дніпропетровської області [20]

Дані про викиди вуглекислого газу в атмосферу враховують наслідки лісових порушень і включають CO₂, CH₄ і N₂O, а також численні накопичення (пули) вуглецю. Вилучення включає середньорічне поглинання вуглецю надземною та підземною деревною біомасою в лісах [18].

Як чистий потік парникових газів слід розуміти різницю між їх середньорічними викидами і середньорічним поглинанням. Від'ємні значення свідчать про чисте поглинання, а додатні – чисті джерела викидів парникових газів [18].

У період з 2001 р. по 2023 р. ліси м. Горішні Плавні викидали 644 т CO₂ е/рік, а поглинали – 17,4 тис. т CO₂ е/рік. Чисте поглинання вуглецю складало – 16,7 тис. т CO₂ е/рік (рис. 1) [19].

У період з 2001 р. по 2023 р. ліси м. Кривий Ріг викидали 1,05 тис. т CO₂ е/рік, а поглинали – 50,8 тис. т CO₂ е/рік. Чисте поглинання вуглецю складало – 49,7 тис. т CO₂ е/рік (рис. 2) [20].

Таким чином, проект Global Forest Watch надає можливість переконатись, що збільшення площі озеленення сприятиме досягненню комфортних, екологічно безпечних умов проживання населення техногенно навантажених районів.

За частиною методики оцінки викидів за секторами господарської діяльності згідно до Керівних

принципів МГЕЗК (англ. IPCC) на прикладі лісового господарства (за рівнем 1), виконуємо наближену оцінку річної зміни запасів вуглецю в біомасі. Методи рівня 1 є базовими і передбачені для всіх категорій, призначені для використання загальнодоступної національної або міжнародної статистики, в комбінації зі встановленими коефіцієнтами викидів за замовчуванням і додатково наданими параметрами, і відповідно мають бути придатними для всіх країн.

Керівні принципи МГЕЗК передбачають збір відомостей на національному рівні. Розглянемо методику обрахунку на локальному рівні, тобто на прикладі досліджуваних гірничодобувних районів. Цей приклад є частиною розрахунків, які відносяться до сектору Землекористування, зміни в землекористуванні та лісове господарство [3].

В розрахунках частина даних прийнята за ГІС додатком Global Forest Watch, а інші відомості прийняті за аналогічними прикладами та рекомендаціями Керівних принципів МГЕЗК (або англ. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)) [3].

Площі нелісових земель перетворених на лісові землі та землі лісового фонду для гірничодобувних районів, а саме м. Кривий Ріг і м. Горішні Плавні, умовно прирівнюємо даним за Global Forest Watch 5,89·10³ га та 2,26·10³ га відповідно (див. рис. 1–2) [18–20]. Приймаємо:

- досліджувані лісові масиви як інтенсивно керовані 9-річні широколистяні насадженням, середній об'єм надземного запасу становить 10 м³ га⁻¹;
- під час рубок догляду було вилучено 100 м³/рік-1 товарної круглої деревини над корою (Н);
- цілих дерев (FGtrees) 50 м³/рік-1 було вилучено як паливну деревину;
- площа порушення життєдіяльності комах (Adisturbance) прийнято в розмірі втрат деревного покриву для м. Кривий Ріг і м. Горішні Плавні, за даними Global Forest Watch і становить 4 га та 10 га за 2023 р. [18], що призводить до пошкодження 1,0 т с.р. га⁻¹ надземної біомаси (BW).

Математичний алгоритм розрахунків наведено у відповідності до рекомендацій Керівних принципів МГЕЗК [3].

Розрахунки щорічних змін у запасах вуглецю в біомасі за методом надходжень-втрат (рівень 1) для двох гірничодобувних районів в запасах вуглецю в біомасі (ΔC_B) розглядаються як різниця між річним приростом біомаси (ΔC_G) та щорічним зменшення запасів вуглецю внаслідок втрат біомаси (ΔC_L).

Щорічні зміни у запасах вуглецю в біомасі за методом надходжень-втрат (рівень 1) для двох гірничодобувних районів в запасах вуглецю в біомасі (ΔC_B) визначаються за формулою [3]:

$$\Delta C_B = (\Delta C_G - \Delta C_L), \quad (1)$$

де ΔC_L – щорічне зменшення запасів вуглецю внаслідок втрат біомаси; ΔC_G – річний приріст біомаси.

Середньорічний приріст біомаси (G_{TOTAL}) визначається за формулою:

$$G_{TOTAL} = G_W \cdot (1 + R), \quad (2)$$

де G_W – річний приріст надземної біомаси, т с.р. га⁻¹ рік⁻¹; R – співвідношення підземної біомаси до надземної, т с.р.⁻¹ для надземної біомаси <50 т га⁻¹

Річний приріст біомаси (ΔC_G) є добутком середньорічного приросту біомаси (G_{TOTAL}), площі землі, переустаткованої в лісі (A), та частки вуглецю в сухій речовині (C_F) [3] та визначається за формулою:

$$\Delta C_G = G_{TOTAL} \cdot A \cdot CF. \quad (3)$$

Втрати біомаси (ΔC_L) є сумою річних втрат внаслідок вилучення деревини ($L_{wood-removals}$), вилучення паливної деревини ($L_{fuelwood}$) та пошкоджень ($L_{disturbance}$) визначаються за формулою:

$$\Delta C_L = L_{wood-removals} + L_{fuelwood} + L_{disturbance}. \quad (4)$$

Вилучення деревини ($L_{wood-removals}$) розраховується з використанням товарних круглих лісоматеріалів без кори (H), коефіцієнтом розширення перетворення біомаси ($VCEF_R$), часткою кори в деревині (BF), відношенням підземної біомаси до надземної біомаси (R), часткою вуглецю в сухій речовині (CF) і вуглецю в сухій речовині (CF) та таблиці за замовчуванням за главою 4 [3].

Визначається вилучення деревини ($L_{wood-removals}$) за формулою:

$$L_{wood-removals} = H \cdot VCEF_R (1 + R + Default BEF) \cdot CF. \quad (5)$$

Вилучення паливної деревини ($L_{fuelwood}$) обраховується за формулою:

$$L_{fuelwood} = (FG_{trees} \cdot VCEF_R \cdot (1 + R)) \cdot CF. \quad (6)$$

Визначаються щорічні втрати вуглецю в біомасі через порушення ($L_{disturbance}$) за формулою:

$$L_{disturbance} = A_{disturbance} \cdot BW \cdot (1 + R) \cdot CF \cdot fd. \quad (7)$$

Щорічне зменшення запасів вуглецю внаслідок втрат біомаси (ΔC_L) обраховується за формулою:

$$\Delta C_L = L_{wood-removals} + L_{fuelwood} + L_{disturbance}. \quad (8)$$

За результатами аналітичних досліджень виявлено, що для м. Кривий Ріг річна зміна запасів вуглецю в біомасі (ΔC_B) склала 15 294,91 тонн С на рік, тоді як для м. Горішні Плавні цей показник дорівнює 5 739,83 тонн С на рік.

Проведені розрахунки підтверджують, що зелені насадження у досліджених техногенно навантажених районах сприяють значному накопиченню вуглецю в біомасі, що є важливим фактором для зменшення викидів парникових газів та забезпечення сталого розвитку регіонів загалом. Однак для більш точного аналізу та управління цими процесами рекомендується використовувати більш деталізовані методи оцінки.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Проект Global Forest Watch в зручному форматі надає можливість проаналізувати динаміку впливу рослинного покриву на кліматичні умови досліджуваних районів, зокрема гірничодобувних.

При аналізі цифрових даних слід звернути увагу, що на веб-сайті Global Forest Watch за замовчуванням для всіх статистичних даних розглядається щільний покрив деревами, використовується поріг наметового покриття > 30% [18].

Проект Global Forest Watch надає можливість переконатись, що збільшення площі озеленення сприятиме досягненню комфортних, екологічно безпечних умов проживання населення техногенно навантажених районів.

Висновки щодо оцінки річної зміни запасів вуглецю в біомасі для міст Кривий Ріг та Горішні Плавні, проведеної згідно з методикою рівня 1 Керівних принципів МГЕЗК, свідчать про значний вплив насаджень дерев на баланс вуглецю в цих регіонах. Використання базових методів рівня 1, які ґрунтуються на загальнодоступній статистиці та стандартних коефіцієнтах, дозволило отримати наближені оцінки змін запасів вуглецю в біомасі для двох гірничодобувних районів. Для більш точних результатів необхідно застосовувати методи вищих рівнів, які враховують локальні особливості та детальніші дані.

Підібні методологічні підходи, за умови внесення даних з ГІС проектів чи інших інформаційних джерел, можливо розглядати та адаптувати до умов регіонального та локального рівнів.

ВИСНОВКИ

На підставі порівняння вуглецевого балансу двох районів з розвинутою гірничодобувною промисловістю, які знаходяться у степовій та лісостеповій зонах, а також різним рівнем стійкого деревного покриву за використанням даних ГІС додатку вільного доступу виявлено наступне.

Збільшення площі зі стійким лісовим покривом, в першу чергу природного походження, а по друге – штучні насадження з стійким покривом, можуть виступати як джерелом, так і поглиначем парникових газів, що відзначається також у Керівних принципах національних інвентаризацій парникових газів.

Вуглецевий баланс територій з розвинутою гірничодобувною промисловістю, що за даними проекту Global Forest Watch розглядаються як покриті стійким лісовим покривом природного та/або штучного походження, характеризуються від'ємним вуглецевим балансом, тобто відбувається поглинання вуглецю з атмосфери на територіях, на яких підтримується стійке озеленення деревами з щільною кроною.

Розрахунок річної зміни запасів вуглецю в біомасі на площах нелісових земель перетворених на лісові та земель лісового фонду не суперечить

даним про вуглецевий баланс розглянутих двох гірничодобувних районів, отриманий за даними Global Forest Watch, але й деталізує одну із його статей. Для м. Кривий Ріг річна зміна запасів вуглецю в біомасі (ΔC_B) склала 15 294,91 тонн С на рік, тоді як для м. Горішні Плавні цей показник дорівнює 5 739,83 тонн С на рік. Ці результати отримані шляхом розрахунку річного приросту біомаси (ΔC_G)

та втрат вуглецю внаслідок вилучення деревини, паливної деревини та порушень (ΔC_L).

Розуміння обліку та популяризація частин методики Керівних принципів національних інвентаризацій парникових газів надає можливість всім зацікавленим сторонам розуміння гостроти екологічної ситуації та необхідності вжиття управлінських рішень та/або інженерних заходів спрямованих на адаптацію до змін клімату.

REFERENCES

- [1] A global dataset of CO₂ emissions and related ancillary data. Global Carbon Atlas : website. URL: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/city-emissions/city-emissions-dataviz/> (date of access: 01.05.2025).
- [2] GCB 2024. Global Carbon Budget : website. URL: <https://globalcarbonbudget.org/gcb-2024/> (date of access: 01.05.2025).
- [3] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : website. URL: <https://www.IPCC-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html#corr> (date of access: 01.05.2025).
- [4] Methodological basis. National Greenhouse Gas Emissions Accounting Centre : website. URL: <https://nci.org.ua/useful-info/Методологічна-база/> (date of access: 01.05.2025).
- [5] Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2021 : Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Kyiv: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2023. 568. URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (accessed: 01.05.2025).
- [6] Friedlingstein, P., & et al (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17, 3, 965–1039. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>.
- [7] Shishegaran, A., Shishegaran, A., Najari, M., Ghotbi A., & Boushehri, A. N. (2020). Effect of plants on an environment with high carbon dioxide concentration. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100002>.
- [8] Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions New EU. New EU Forest Strategy for 2030. European Commission : website. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0572> (date of access: 01.05.2025).
- [9] Le Quéré, C. & et al (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141–2194. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.
- [10] Maksymova, N., & Petrushyna, H. (2023). Obgruntuvannya dotsilnosti normuvannya rivnia ozelenennia sanitarno-zakhysnykh zon diiuchykh vidvaliv rozkryvnykh porid u konteksti staloho rozvytku. [Justification of the feasibility of normalizing the level of greening of sanitary and protective zones of operating quarry rock dumps in the context of sustainable development]. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 39(3–4), 48–54. DOI: <https://doi.org/10.36804/nddipbop.39-3-4.2023.48-54>. [in Ukrainian]
- [11] Ahlström, A., & et al (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348, 6237, 895–899. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>.
- [12] Baccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., & Houghton, R. A. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss, *Science*, 358, 230–234. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aam5962>.
- [13] Arneeth, A., & et al (2017). Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed, *Nat. Geosci.*, 10, 79–84. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2882>.
- [14] Anishyn, L. A., Hrytsaienko, Z. M., Ponomarenko, S. P., Hryhoriuk, I. P., & Serha O. I. (2014). Utylizatsiia vuhlekysloho hazu za umov vyroshchuvannya zernovykh kultur z vykorystanniam biostymulatoriv rostu. [Utilisation of carbon dioxide in the cultivation of cereals using biostimulants]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannya Ukrainy. Seriya : Biolohiia, biotekhnolohiia, ekolohiia*, 204, С. 56–65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_biol_2014_204_10 (date of access: 01.05.2025). [in Ukrainian].
- [15] Saranenko, I. I. (2024). Dosvid monitorynhu lisovykh pozhezh na kontyentakh zasobamy HIS. [Experience in monitoring forest fires on continents using GIS]. *Ekolohichni nauky*, 6(57), 192–196. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.28>. [in Ukrainian].
- [16] Melnyk, A. A. (2022). Zastosuvannya heoinformatsiinykh tekhnolohii dlia sposterezhenia za lisovym pokryvom. [Application of geoinformation technologies for monitoring forest cover. Scientific Bulletin of Kherson State University]. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu*, 16, 32–39. DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2022-16-3>. [in Ukrainian].
- [17] Go, Y.-H., Tan, Y.-L., & Yiew, T.-H. (2024). Sensitivity of oil palm yield in Indonesia to climate change: evidence from threshold cointegration models. *Environment, Development and Sustainability*, 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05635-w>.
- [18] Global Forest Watch : website. URL: <https://www.globalforestwatch.org/map/?mapPrompts=eyJvcGVuLjpp0cnVILCJzdGVwc0tleSI6InN1YnNjcmlhZVRvQXJlYSJ9> (date of access: 01.05.2025).
- [19] Horishni Plavni. Global Forest Watch : website. URL: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/UKR/18/10/?location...> (date of access: 04.01.2025).

- [20] Kryvyi Rig. Global Forest Watch : website. URL: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/UKR/5/8/?location=WyJb3VudHJ5IiwVUtSlwiNSIsIjgiXQ%3D%3D&mainMap=eyJzaG93QW5hbHlzaXMiOnRydWV9&map=eyJjZW50ZXIiOnsibGF0Ijo0Ny45NTQ4NzczNjAyOTY5OSwibG5nIjozMy40MjcjNDUyNzU5Njc1NH0sInpvc20iOjkuNzgyOTk3MDgxODAzODY3LCJjYW5Cb3VuZCI6ZmFsc2V9&mapMenu=eyJzZWZyY2giOiJLcnI2In0%3D> (date of access: 04.01.2025).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] A global dataset of CO₂ emissions and related ancillary data. Global Carbon Atlas : website. URL: <https://globalcarbonatlas.org/emissions/city-emissions/city-emissions-dataviz/> (дата звернення: 01.05.2025).
- [2] GCB 2024. Global Carbon Budget : website. URL: <https://globalcarbonbudget.org/gcb-2024/> (дата звернення: 01.05.2025).
- [3] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) : website. URL: <https://www.IPCC-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html#corr> (дата звернення: 01.05.2025).
- [4] Методологічна база. Національний центр обліку викидів парникових газів : вебсайт. URL: <https://nci.org.ua/useful-info/Методологічна-база/> (дата звернення: 01.05.2025).
- [5] Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990-2021 : Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Kyiv: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2023. 568. URL: <https://unfccc.int/documents/628276> (accessed: 01.05.2025).
- [6] Friedlingstein, P., & et al (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17, 3, 965–1039. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>.
- [7] Shishegaran, A., Shishegaran, A., Najari, M., Ghotbi A., & Boushehri, A. N. (2020). Effect of plants on an environment with high carbon dioxide concentration. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100002>.
- [8] Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions New EU. New EU Forest Strategy for 2030. European Commission : website. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021DC0572> (дата звернення: 01.05.2025).
- [9] Le Quéré C. & et al (2018). Global Carbon Budget 2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141–2194. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>.
- [10] Максимова, Н. М., & Петрушина, Г. О. (2023). Обґрунтування доцільності нормування рівня озеленення санітарно-захисних зон діючих відвалів розкривних порід у контексті сталого розвитку. *Проблеми охорони праці в Україні*, 39(3–4), 48–54. DOI: <https://doi.org/10.36804/nndipbop.39-3-4.2023.48-54>.
- [11] Ahlström, A., & et al (2015). The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 348, 6237, 895–899. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa1668>.
- [12] Vaccini, A., Walker, W., Carvalho, L., Farina, M., Sulla-Menashe, D., & Houghton, R. A. (2017). Tropical forests are a net carbon source based on aboveground measurements of gain and loss, *Science*, 358, 230–234. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aam5962>.
- [13] Arneeth, A., & et al (2017). Historical carbon dioxide emissions caused by land-use changes are possibly larger than assumed, *Nat. Geosci.*, 10, 79–84. DOI: <https://doi.org/10.1038/ngeo2882>.
- [14] Анішин, Л. А., Грицаєнко, З. М., Пономаренко, С. П., Григорюк, І. П., & Серга О. І. (2014). Утилізація вуглекислого газу за умов вирощування зернових культур з використанням біостимуляторів росту. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Біологія, біотехнологія, екологія*, 204, С. 56–65. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnaui_biol_2014_204_10 (дата звернення: 01.05.2025).
- [15] Сараненко, І. І. (2024). Досвід моніторингу лісових пожеж на континентах засобами ГІС. *Екологічні науки*, 6(57), 192–196. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.28>.
- [16] Мельник, А. А. (2022). Застосування геоінформаційних технологій для спостереження за лісовим покривом. *Науковий вісник Херсонського державного університету*, 16, 32–39. DOI: <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2022-16-3>.
- [17] Go, Y.-H., Tan, Y.-L., & Yiew, T.-H. (2024). Sensitivity of oil palm yield in Indonesia to climate change: evidence from threshold cointegration models. *Environment, Development and Sustainability*, 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05635-w>.
- [18] Global Forest Watch : веб-сайт. URL: <https://www.globalforestwatch.org/map/?mapPrompts=eyJvcGVuIjpb0cnVILCjZdGVwc0tleSI6InN1YnNjcmliZVRvQXJIYSJ9> (дата звернення: 01.05.2025).
- [19] Horishni Plavni. Global Forest Watch : веб-сайт. URL: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/UKR/18/10/?location...> (дата звернення: 04.01.2025).
- [20] Kryvyi Rig. Global Forest Watch : веб-сайт. URL: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/UKR/5/8/?location=WyJb3VudHJ5IiwVUtSlwiNSIsIjgiXQ%3D%3D&mainMap=eyJzaG93QW5hbHlzaXMiOnRydWV9&map=eyJjZW50ZXIiOnsibGF0Ijo0Ny45NTQ4NzczNjAyOTY5OSwibG5nIjozMy40MjcjNDUyNzU5Njc1NH0sInpvc20iOjkuNzgyOTk3MDgxODAzODY3LCJjYW5Cb3VuZCI6ZmFsc2V9&mapMenu=eyJzZWZyY2giOiJLcnI2In0%3D> (дата звернення: 04.01.2025).