



А. В. Жук

Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна

КЛІМАТОРЕГУЛЮВАЛЬНІ ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ ЛІСІВ ЧЕРНІВЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ГРАДІЄНТІ ЛАНДШАФТНИХ УМОВ

Проведено дослідження просторового розподілу потенціалу лісів Чернівецької області з надання кліматорегулювальних екосистемних послуг із використанням відкритих геоінформаційних даних Global Forest Watch. Індикатором обрано показники вуглецевого балансу за проміжок часу з 2001 по 2021 рр. Для ситуаційного аналізу виділено три контрастних локалітети, які відображають лісорослинні умови уздовж ландшафтного градієнту від середньогір'я до рівнинної височини. З'ясовано, що баланс вуглецю в лісових екосистемах області характеризується переважанням асиміляції над емісією, однак показано істотні відмінності в ефективності асиміляції та динаміці вуглецевих потоків на градієнті ландшафтних умов. Встановлено, що чистий вуглецевий обмін у гірських шпилькових і мішаних лісах становить 426 тис. тонн CO₂-екв. за рік (6,3 т/га), у лісах ландшафтів передгір'я – 276 тис. тонн CO₂-екв. за рік (4,9 т/га); у рівнинних широколистяних деревних масивах – 117 тис. тонн CO₂-екв./рік (5,8 т/га). Сумарно за 20-річний термін гірські ліси в межах дослідженої території асимілювали в еквіваленті 14,76×10⁶ т CO₂, передгірські – 10,74×10⁶ т, рівнинні – 2,9×10⁶ т. Продемонстровано залежність трансформування газообміну в лісах різних стратумів від їхньої ресурсної стійкості, розмірів та конфігурації деревних масивів. Зокрема, знайдене співвідношення між процесами асиміляції та емісії свідчить про високу збалансованість вуглецевого циклу букових, дубових та дубово-грабових рівнинних лісів. Виявлено, що патологічні процеси в комплексі з кліматичними змінами призводять до масового всихання ялини, порушуючи вуглецевий цикл лісових екосистем передгірського геоекотону. Як наслідок, такі деревні масиви не тільки створюють передумови для пришвидшеної мінералізації вуглецевмісних сполук, але й мають менший поглинальний потенціал, порівняно зі здоровими. Наголошено на необхідності ефективного управління лісовими ресурсами для забезпечення стабільності лісових екосистем та їх кліматорегулювальних функцій в умовах лісокористування та зростаючого впливу змін клімату. У перспективі на майбутнє визначено дослідження внеску придорожніх насаджень та садових комплексів у вуглецевий баланс регіону.

Ключові слова: вуглецевий баланс; асиміляція; емісія; секвестрація; дистанційне зондування Землі; деревний покрив.

Вступ / Introduction

Актуальність порівняльних досліджень екосистемних послуг (ЕП) лісів Чернівецької адміністративної області обумовлена її унікальною природною платформою, де на обмеженій території лісовкриті типові гірські ландшафти стрімко змінюються передгірськими, а відтак – рівнинними з високим рівнем сільськогосподарського освоєння. Перепад висот за маршрутом протяжністю 214 км між крайніми західною та східною точками області становить 1369 м. Контрастна ландшафтна структура області не тільки позначилася на формуванні різноманітних лісорослинних умов, але й зумовила відмінності у режимі лісокористування [22]. Такі територіальні особливості створюють сприятливі передумови для порівняльного ситуаційного аналізу реалізації окремих груп ЕП на ландшафтному рівні [2]. Серед широкого спектру послуг, які суспільство отримує від лісових екосистем та їх компонент, останніми роками особливо увагу світової наукової спільноти привертають ті, що спрямовані на протидію глобальним кліматичним змінам [11, 14, 18]. Для карпатських лісів

України апробований алгоритм дослідження одного з двох механізмів впливу лісових екосистем на клімат: запобігання лісового намету перегріванню поверхні ґрунту [19]. Тому науково-прикладна проблема встановлення загальної концентрації вуглецю в атмосфері завдяки здатності лісових екосистем Чернівецької області зв'язувати та депонувати його, є актуальною і має важливе наукове й прикладне значення.

Об'єкт дослідження – кліматорегулювальні екосистемні послуги лісів уздовж ландшафтного градієнту Чернівецької області.

Предмет дослідження – методи і засоби визначення просторового розподілу показників балансу вуглецю в лісових екосистемах.

Мета роботи – з'ясувати особливості просторового розподілу потенціалу лісів Чернівецької області з надання кліматорегулювальних екосистемних послуг за комплексом показників асиміляції та динаміки потоків вуглецю із застосуванням даних дистанційного зондування Землі.

Для досягнення поставленої мети окреслено *основні завдання дослідження*:

Інформація про автора:

Жук Аліна Володимирівна, канд. біол. наук, доцент, кафедра екології та біомоніторингу.

Email: a.zhuk@chnu.edu.ua; <http://orcid.org/0000-0002-0405-8037>

Цитування за ДСТУ: Жук А. В. Кліматорегулювальні екосистемні послуги лісів Чернівецької області на градієнті ландшафтних умов. Науковий вісник НЛТУ України. 2024, т. 34, № 2. С. 61–68.

Citation APA: Zhuk, A. V. (2024). Climate-regulatory ecosystem services of the forests of the Chernivtsi Region on the gradient of landscape conditions. *Scientific Bulletin of UNFU*, 34(2), 61–68. <https://doi.org/10.36930/40340208>

- 1) обрати репрезентативні локалітети дослідження, які би відповідали екстремумам ландшафтного градієнту та геоекотону між ними;
- 2) проаналізувати потоки вуглецю в лісах відповідних локалітетів за набором геоінформаційних даних із 2001 по 2021 рр.;
- 3) оцінити потенціал лісів гірських, передгірських і рівнинних ландшафтів Чернівецької області щодо надання кліматорегулювальних екосистемних послуг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Глобальні кліматичні зміни розглядають як один із найбільших викликів сьогодення [4, 14, 19]. Низка міжнародних угод, як-от Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (UNFCCC), Кіотський протокол, Монреальський протокол вимагають від країн моніторингу та звітності про запаси лісового вуглецю та їх зміни. У відповідь на цей запит, розробляються й апробуються численні моніторингові системи й алгоритми оцінювання компонент вуглецевого балансу в глобальному масштабі та на рівні окремих ландшафтів із застосуванням геоінформаційних даних [9, 16]. Побіжно геоінформаційні набори даних визначають як релевантні джерела для виокремлення індикаторів ЕП [6, 15]. Йдеться про якісні або кількісні показники, які відображають явища, процеси і стани екосистем, недоступні для прямого спостереження. Компоненти вуглецевого балансу лісових екосистем, виражені в еквіваленті CO₂ (далі – CO₂-екв.) як мірила потенціалу глобального потепління, – інформативний і надійний індикатор кліматорегулювальних послуг лісовкритих ландшафтів.

Оцінювання вуглецевих потоків на планетарному рівні за об'єднаним масивом даних наземних і орбітальних спостережень за проміжок часу з 2001 по 2019 рр. дало змогу охарактеризувати глобальні ліси як чисті поглиначі вуглецю зі значенням в $7,6 \pm 49 \times 10^9$ CO₂-екв./рік. Насамперед роль чистих поглиначів виконують природоохоронні території, праліси та інші природні масиви з мінімальним ступенем антропогенного впливу [9]. Отже, переважають процесів асиміляції над емісією вуглецю – також цінний показник загального здоров'я та функціонування лісової екосистеми. Останні дослідження показали, що здатність до нагромадження вуглецю в лісах і приріст біомаси зазнають змін за несприятливих кліматичних умов. Зокрема, в екстремально спекотні періоди відзначають сповільнення вуглецевого обміну через інтенсифікацію процесів дихання рослин і мікроорганізмів та зниження приросту біомаси [11]. Водночас, науковці наполягають на необхідності захисту вторинних лісів і деградованих лісових територій, які не досягають можливого потенціалу секвестрації вуглецю, для збільшення обсягів депонування вуглецю в рослинній біомасі та ґрунтах [14].

Закономірності вуглецевого балансу окремих територій, встановлені на підставі аналізу геоінформаційних даних, пропонують враховувати у глобальних, регіональних і локальних моделях управління лісами. Здатність лісів асимілювати вуглекислий газ, а також заміна викопного палива як одного з головних джерел парникових газів у атмосферному повітрі деревною біомасою є центром багатьох стратегій пом'якшення клімату [15, 18].

Роль лісових екосистем у регулюванні клімату потягає й у фокус українських дослідників. Так, у доповіді на засіданні Президії НАН України Т. Ю. Бедернічек наголосив на важливості обліку резервуарів та потоків вуглецю в наземних екосистемах України [4]. Для

окремих лісових масивів Українських Карпат обчислено інтенсивність потоків вуглецю та величину чистої екосистемної продукції [7, 17, 20], проаналізовано механізми кліматорегулювальних екосистемних послуг [19]. Наведені нижче результати дослідження кліматорегулювального потенціалу лісів на ландшафтному градієнті Чернівецької області доповнюють вітчизняні напрацювання у галузі та дають загальні уявлення про можливий вплив на потоки вуглецю відмінностей у структурі ландшафтів, фрагментованості деревного покриву, породного складу лісових масивів, особливостей господарювання тощо.

Матеріали та методи дослідження. У дослідженні використано методи геопросторового ситуаційного аналізу. Матеріалами оцінювання кліматорегулювального потенціалу лісів слугували відкриті дані глобальної системи геопросторового моніторингу Global Forest Watch (GFW, <https://www.globalforestwatch.org/>) на підставі мультиспектральних зображень з просторовою роздільною здатністю 30 м, отриманих з давачів Landsat 5 thematic mapper (TM), Landsat 7 thematic mapper plus (ETM+) і Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) [16]. Картографічні дані GFW Climate отримано шляхом моделювання на підставі інтегрованих матеріалів польових спостережень і дистанційного зондування землі із дотриманням методологічної бази Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (IPCC). Набір містить геоінформаційні дані з 2001 по 2021 рр. включно. Модель враховує тільки деревний покрив із зімкненістю крон >30 %. Експортовані з сервісу дані опрацьовано засобами вільної крос-платформеної геоінформаційної системи QGIS версії 3.8.2-Zanzibar. Чистий потік протягом модельного періоду розраховано в кожному змодельованому пікселі як різницю між обсягами виділеного у атмосферу та поглиненого лісами вуглецю в CO₂-еквівалентах, перерахованих на гектар лісовкритої площі. Від'ємні значення свідчать про переважання асиміляційних процесів, а додатні – про активну емісію вуглецю.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Під ландшафтним градієнтом розглядаємо гетерогенний просторовий континуум з поступовою зміною ландшафтних умов і контрастними ландшафтними комплексами на протилежних кінцях (в екстремумах). У вжитому контексті ландшафтний градієнт Чернівецької області демонструє висотну стратифікацію рельєфу від низькогір'я і середньогір'я – через передгір'я – до підвищеної рівнини.

Локалітети для подальшого ситуаційного аналізу обрані за контурами трьох колишніх адміністративних районів Чернівецької області (рис. 1): Путильського (далі – Традиційний стратум), Сторожинецького (далі – Проміжний стратум) і Хотинського (далі – Інтенсивний стратум). Такий поділ не випадковий, оскільки тривалий час структурно-функціональна диференціація і антропогенна трансформація ландшафтів у області здійснювалися відповідно до планово-господарської схеми управління, а регулятором природокористування слугували районні адміністрації.

Традиційний стратум – найвіддаленіша південно-західна територіальна одиниця, повністю розташована у фізико-географічній гірській країні Українських Кар-

пат. Назвою завдячує збереженому традиційному дрібно-товарному полонинському господарству. Характеризується мозаїчним чергуванням лісових і полонинно-пасовищних угідь та дисперсно-хуторським типом розсе-

лення. Протягом останніх десятиріч тут відзначено щорічні втрати деревного покриву, здебільшого – через лісозаготівельну діяльність і всихання масивів шпилькових порід (див. табл.).

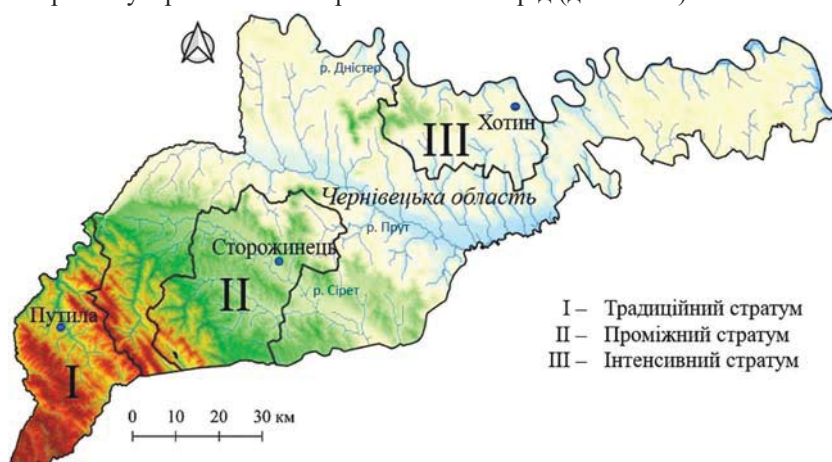


Рис. 1. Розташування локалітетів дослідження уздовж ландшафтного градієнту на картосхемі Чернівецької області / Research sites located along the landscape gradient on the Chernivtsi Oblast map

Проміжний стратум у меншому масштабі повторює риси обласного ландшафтного градієнту. Це територія з оптимальним сучасним розселенням, що демонструє поступову зміну рельєфу від лісо-лучного низькогір'я Скибових Карпат до горбистої рівнини. Його характеризують розгалужена структура господарювання, середньо-стабільна екологічна стійкість агроландшафтів [6] і активні заходи з природного та штучного лісовідновлення. Структура втрат лісових масивів за два останні десятиліття охоплює рубання головного користування, санітарні рубання, а також масове всихання шпилькових масивів та ураження шкідниками і збудниками хвороб. Інтенсивний стратум представляє територію з високою густотою населення та обмеженим числом адміністративних одиниць.

Таблиця. Характеристики деревного покриву (розроблено на підставі даних Global Forest Watch) / Tree cover characteristics (developed by the author based on Global Forest Watch data)

Показник	Традиційний стратум	Проміжний стратум	Інтенсивний стратум
Площа, км ²	884	1160	716
Частка деревного покриву ¹ , %	75	55	38
Структура лісів	95 % ялина, 1,5 % твердолистяні породи (бук)	67 % бук, 24,2 % дуб, ясен, 3,5 % граб, 1,7 % ялина	79 % дуб і бук, 5,9 % акація, 5,6 % граб, 4 % ясен
Сумарні втрати деревного покриву за 20 років до 2020 р. ^{1,2} , га	11500	10800	1507
Щорічні втрати деревного покриву ^{1,2} , га	537	514	72
Щорічний приріст деревного покриву ¹ , га	70	63	55

Примітки: ¹ – стосується тільки деревного покриву заввишки понад 5 м зі зліпненістю крон >30 %; ² – показник узагальнює наслідки вирубування, пожеж, пошкодження від стихійних природних явищ.

Характеризується інтенсивним агровиробництвом, зокрема активним розвитком садівництва, та використанням сучасних агротехнологій, що обумовило обрану назву стратуму. На заході й півночі стратуму значну

площу займає природний ліс, також наявні штучні зелені насадження поряд із великими незалісненими площами. Щорічні втрати деревного покриву в Інтенсивному стратумі значно менші, не перевищують 72 га на рік (див. табл.).

Лісовим екосистемам належить провідна роль у вуглецевому циклі Традиційного стратуму, оскільки лісовкрита площа тут становить майже 63 %. Згідно з концепцією ландшафтної структури, деревний покрив у Традиційному стратумі виконує роль матричного елемента зі вкрапленнями фрагментів інших класів наземного покриву. Основу лісового фонду становлять ялинові та ялицево-буково-ялинові ліси. Чистопородні ялинові ліси стрімкосхилових середньогірних ландшафтів мають статус природоохоронних і входять до складу Національного природного парку "Черемоський". Природоохоронне значення має також лівова частка вологих букових і ялицевих суялиників. Експлуатаційні ліси Традиційного стратуму представлені переважно вологими буково-ялицевими ялиниками і вологими буково-ялицевими суялиниками. Похідні ценотично-спрощені смеречники на місці корінних букових лісів у низькогірних ландшафтах високопродуктивні, однак недовговічні та нестійкі до хвороб, шкідників кліматичних змін, вітровалів. У долинах річок трапляються вузькі смуги листяних лісів.

Аналіз даних GFW Climate виявив, що між 2001 і 2021 роками ліси стратуму виділили в атмосферу вуглецю в еквіваленті $6,24 \times 10^6$ тонн CO₂. Величина щорічної емісії – 312 тис. тонн CO₂-екв., що відповідає 4,6 т/га (рис. 2). Обсяги асиміляції за зазначений період становили $14,76 \times 10^6$ тонн CO₂-екв. (738 тис. тонн CO₂-екв. за рік; 10,9 т/га). Отже, чистий обмін вуглецю за 20-річний термін становить $8,52 \times 10^6$ тонн CO₂-екв. (426 тис. тонн CO₂-екв. за рік; 6,3 т/га). Інтенсивність процесів асиміляції й емісії залежить від багатьох чинників різної природи. Зокрема, мають значення походження, породний склад, вік, бонітет і повнота деревостану, санітарний стан дерев, лісорослинні умови, режим господарювання тощо. Відмінності в балансі вуглецю в різних частинах стратуму демонструє картограма щільності потоків (рис. 2,а). Понад 84 % лісових масивів характеризуються переважанням поглинання вуглецю над виді-

ленням (чисті поглиначі) і щорічно депонують від 1 до 13,4 т/га (позначено різними відтінками зеленого на рис. 2,б). Ліси, розташовані поблизу від населених пунктів, і водоохоронні смуги в долинах річок, а також ді-

лянки з надмірною експлуатацією були охарактеризовані алгоритмом GFW Climate як джерела двоокису вуглецю, котрі щороку виділяють від 5,5 до 30,8 т/га (позначено різними відтінками бузкового на рис. 2,б).

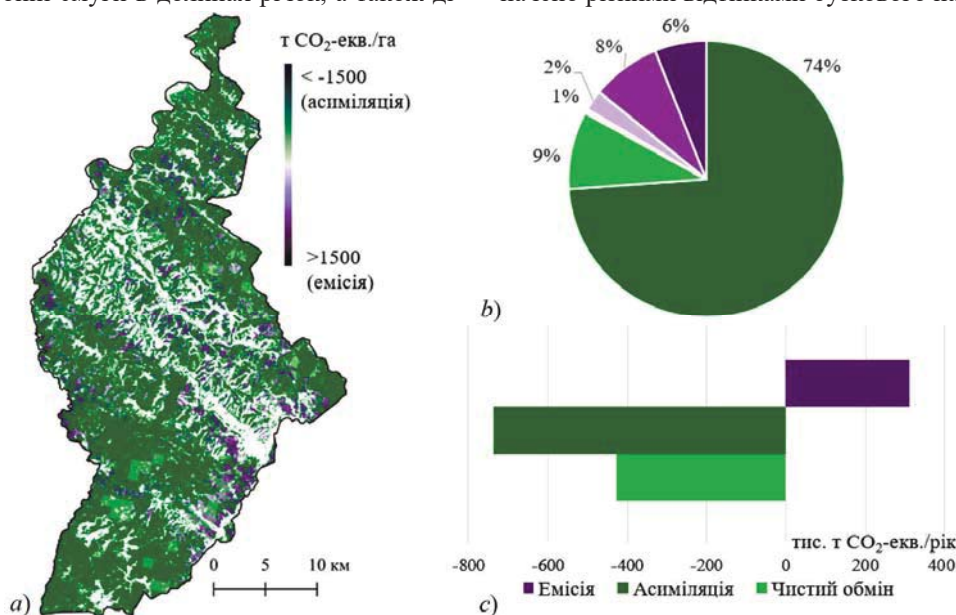


Рис. 2. Баланс вуглецю в лісових екосистемах Традиційного стратуму за період із 2001 по 2021 р. / Carbon balance in forest ecosystems of the traditional stratum for the period from 2001 to 2021: a) щільність потоків у перерахунку на одиницю площі / flux density per unit area; b) розподіл лісовкритої площі за інтенсивністю процесів асиміляції/емісії (тут і далі: кольори діаграми відповідають інтервалам значень шкали, наведеної для картосхеми) / distribution of the forest area by assimilation/emission processes intensity (hereinafter: diagram colors correspond to the value intervals of the scale given for the map); c) середньорічний обсяг потоків вуглецю / average annual volume of carbon flows

Як і в Традиційному стратумі, на території Проміжного стратуму переважає деревний покрив, однак частка його становить тільки 55 % від загальної площі території. Активна заготівля деревини протягом останніх двох століть призвела до значної мозаїчності наземного покриву. Вік різних ділянок лісу коливається від 40 до 120 років. Чималу площу займають зруби на різних сукцесійних стадіях.

У керунку з південного заходу на північний схід лісові масиви чергуються з агроландшафтами, здебільшого розташованими у долинах річок Малий Сірет, Сірет, Дерелуй та їхніх приток. Найбільший осередок лісового покриву розташований у південно-західній середньо- та низькогірній частині стратуму. Найбільший осередок лісового покриву розташований у південно-західній середньо- та низькогірній частині стратуму. Моноклінальні ландшафти середньогір'я вкриті ялиново-ялицевими лісами. Обабіч з ними межують шпилькові і шпильково-широколистяні ліси. Домінують ялицево-букові ліси з фрагментами чистих бучин. Південною межею вздовж державного кордону з Румунією збереглися найбільші масиви буково-дубово-грабових і ялицево-букових лісів. Ландшафти передгірської частини Проміжного стратуму містять менший за розмірами та більш розчленований поперечний пояс лісів. Його основу становлять ялицево-букові та дубово-букові деревостани. На високих терасованих рівнинах головню поширені чисті і ялицеві бучини. Північно-західна частина стратуму характеризується великим різноманіттям ландшафтів. Тут широко представлені букові й буково-грабові ліси, наявні й дубово-букові. Понад 5775 га лісових масивів та оточуючих їх ландшафтів у цій частині стратуму входить до складу регіонального ландшафтного парку "Чернівецький".

Балансове оцінювання потоків вуглецю деревного покриву Проміжного стратуму виявила чималі відмінності від вуглецевого циклу лісів Традиційного стратуму. За період 2001-2021 рр. сумарний обсяг емісії вуглекислого газу становив $5,2 \times 10^6$ тонн. Щорічно в атмосферу виділялося 260 тис. тонн CO_2 -екв., або 4,9 т/га (рис. 3,с). За окреслений період деревний покрив стратуму поглинув $10,74 \times 10^6$ т атмосферного вуглецю, що в перерахунку на рік становить 537 тис. тонн CO_2 -екв., а в перерахунку на площу – 9,5 т/га. У підсумку, чистий обмін вуглецю Проміжного стратуму сягає $5,5 \times 10^6$ тонн (276 тис. т. CO_2 -екв. за рік; 4,9 т/га). Водночас, тільки від стаціонарних джерел у 2020 р. в атмосферу стратуму надійшло 2 тис. тонн двоокису вуглецю. Розрахунок викидів CO_2 від пересувних джерел з 2015 р. не ведеться з моменту втрати чинності наказу Державного комітету статистики України № 452 від 13 листопада 2008 р. "Про затвердження Методики розрахунку викидів забруднюючих речовин та парникових газів у повітря від транспортних засобів".

Найвагоміший внесок у процес поглинання вуглецю з атмосферного повітря (7,3-13,4 т/га) належить гірським лісам у південно-західній частині стратуму (рис. 3,а). Їхня частка сягає 41 %. Однак тут сконцентровані й найбільші площі, де інтенсивність емісії перевищує інтенсивність асиміляції. Частка таких масивів становить 16 % від загальної площі лісового фонду стратуму (рис. 3,б). Залежно від ступеня порушення вуглецевого балансу річний обсяг вивільнення CO_2 вимірюється діапазоном від 5 до 30 т/га.

Частка деревного покриву, який нагромаджує від 1,2 до 7,3 т/га, становить 43 %. Такі масиви розташовані здебільшого у середній частині стратуму та на північному заході і представлені мішаними й широколистяни-

ми деревостанами різного віку, бонітету та ступеня антропогенної трансформації.

На деревний покрив припадає тільки 38 % території Інтенсивного стратуму. Це здебільшого широколистяні ліси, розміщені в північно-західній частині стратуму. Великі лісові масиви стратуму становлять чисті та мішані бучини. Подекуди збереглися високопродуктивні

біологічно стійкі ділянки букового пралісу, де вік деяких дерев перевищує 130 років. Невеликими фрагментами представлені дубові і грабово-дубові ліси, більшими – похідні грабові. Острівні фрагменти субконтинентальних грабово-дубових лісів трапляються в східній частині стратуму як екостабілізуючі елементи у складі агроландшафтів.

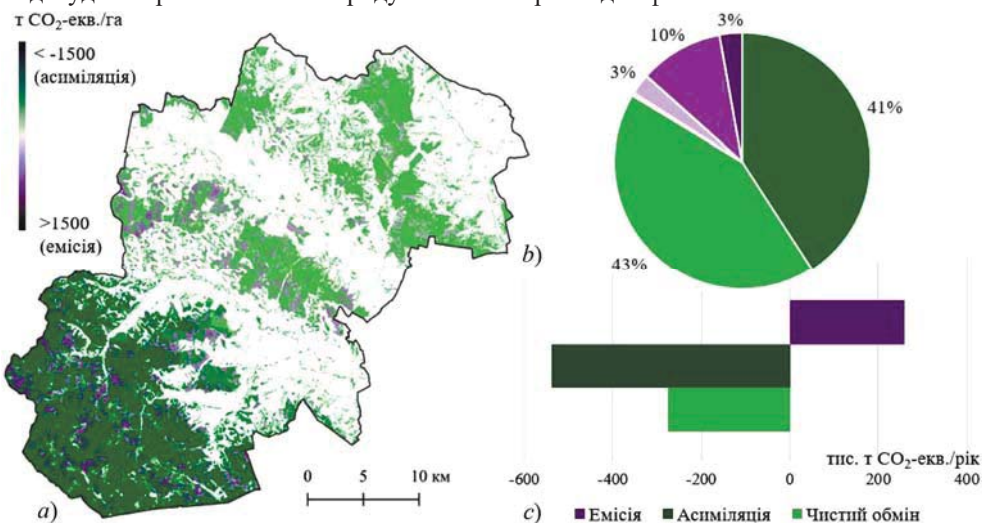


Рис. 3. Баланс вуглецю в лісових екосистемах Проміжного стратуму за період із 2001 по 2021 р. / Carbon balance in forest ecosystems of the intermediate stratum for the period from 2001 to 2021: a) щільність потоків у перерахунку на одиницю площі / flux density per unit area; b) розподіл лісовкритої площі за інтенсивністю процесів асиміляції/емісії / distribution of forest area by assimilation/emission processes intensity; c) середньорічний обсяг потоків вуглецю / average annual volume of carbon flows

Особливо великої шкоди лісам стратуму завдано на початку XIX століття, коли за 45 років їхня площа зменшилася на третину. А заходи з лісовідновлення, вжиті в радянський період, спричинили порушення породного складу. Водночас, лісистість стратуму вища, порівняно з прилеглими територіями Прут-Дністерського межиріччя. Наразі сумарна площа осередків деревного покриву становить тільки 27 тис. га.

Через меншу частку лісів у наземному покриві Інтенсивного стратуму, обсяги вуглецевих потоків у них

значно менші, порівняно зі встановленими для Традиційного та Проміжного стратумів. За 20-річний термін деревним покривом поглинуто в еквіваленті $2,9 \times 10^6$ тонн вуглекислого газу (143 тис. тонн CO₂-екв./рік; 7,0 т/га), а виділено $5,1 \times 10^5$ тонн CO₂-екв. (25,7 тис. тонн CO₂-екв./рік; 1,3 т/га). Отже, чистий обмін дорівнює еквіваленту $2,3 \times 10^6$ тонн двоокису вуглецю (117 тис. тонн CO₂-екв./рік; 5,8 т/га). Знайдене співвідношення між процесами асиміляції й емісії свідчить про високу збалансованість вуглецевого циклу (рис. 4,с).

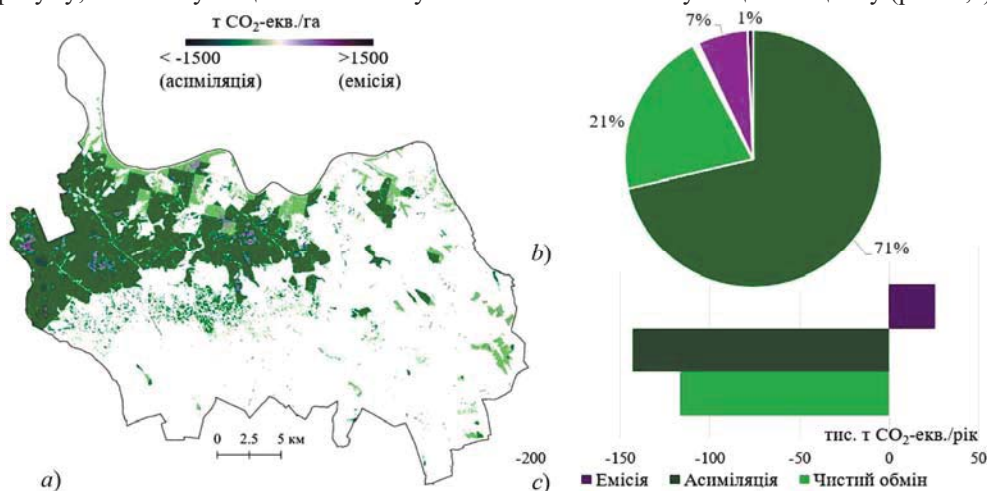


Рис. 4. Баланс вуглецю в деревному покриві Інтенсивного стратуму за період із 2001 по 2021 р. / Carbon balance in forest ecosystems of the intensive stratum for the period from 2001 to 2021: a) щільність потоків у перерахунку на одиницю площі / flux density per unit area; b) розподіл лісовкритої площі за інтенсивністю процесів асиміляції/емісії / distribution of forest area by assimilation/emission processes intensity; c) середньорічний обсяг потоків вуглецю / average annual volume of carbon flows

Найбільший вклад у вуглецевий баланс належить масивам в північній частині Інтенсивного стратуму (рис. 4,а). Частка лісів з максимальними показниками річної асиміляції вуглецю (від 5,1 до 9,3 т/га) становила 71 % (рис. 4,б). Вздовж русла р. Дністер і на сході стратуму представлене дрібнолісся і фрагменти дубово-гра-

бових лісів, які щорічно нагромаджують 1,2-5,0 т/га вуглецю.

Деревний покрив з переважанням асиміляції над емісією не обмежується природними та похідними лісами. Позитивний баланс відзначений і в придорожніх лінійних насадженнях, а також в садових комплексах з

висотою дерев понад 3 м і зімкнутістю крон від 30 %. До останніх належать, наприклад, горіхові сади.

Частка деревного покриву з переважанням вивільненого вуглецю над депонованим в Інтенсивному стратумі становить тільки 8 %, однак фрагменти лісу, річна емісія яких змінюється в широких межах від 5 до 29 т/га, займають великі площі суцільних зрубів посеред лісового масиву. За даними Головного управління статистики у Чернівецькій області за 2020 рік, викиди діоксиду вуглецю від стаціонарних джерел на території Інтенсивного стратуму становили 2,2 тис. тонн, хоча основним джерелом парникових газів, як і раніше, залишається автотранспорт.

Обговорення результатів дослідження. Кліматорегулювальний потенціал деревних масивів прямо залежить від структури і породного складу, запасів біомаси, ступеня природності, санітарного стану тощо. Лісові екосистеми з природоохоронним статусом, праліси, природні високопродуктивні деревостани функціонують як чисті поглиначі вуглецю [9]. Згідно з літературними даними, шпилькові ліси природного походження нагромаджують упродовж року 0,6–7,3 т/га вуглецю, а штучні – 1,8–5,6 т/га [1]. Отримані для Традиційного стратуму результати узгоджуються з цими значеннями. Аналіз наукової літератури засвідчив, що серед деревних порід, які становлять основу лісового фонду Проміжного стратуму, найбільша щільність фітомаси притаманна буку, відтак – ялиці та ялині [20]. А в межах одного біологічного виду щільність фітомаси стовбурів і, насамперед, кори залежить від лісорослинних умов [10]. Близькі до отриманих в Інтенсивному стратумі значення (1,2–9 т/га) описані для широколистяних лісів Київщини [1]. Для рівнинних букових лісів вказують депонування вуглецю в діапазоні від 5,5–6,6 т/га в природних деревостанах – до 12,5–12,7 т/га у штучних насадженнях [13].

Експериментальні дослідження в карпатських лісах Львівщини [17] показали, що мортмаса – значне джерело емісії вуглецю в лісових екосистемах. Водночас, вивільнення вуглецю під час мінералізаційних процесів у повночленному лісовому біоценозі зрівноважується асиміляцією. Вибіркові, групові та поступові рубання з вилученням зрілих дерев високого бонітету, розріджування насаджень, заміна природних масивів штучними насадженнями, зміна породного складу, технології лісозаготівлі з великою кількістю порубних залишків призводять до порушення вуглецевого циклу з переважанням емісії над асиміляцією. Подібні наслідки мають вітровали, інвазії фітофагів, лісові пожежі [4]. Однак дослідженнями з повного обліку вуглецю доведено, що будь-який вид лісозаготівлі супроводжується вивільненням більших обсягів вуглецю на одиницю площі, ніж пожежі [3].

Смерекові насадження Проміжного стратуму серйозно потерпають від патологічних процесів, які в комплексі з кліматичними змінами призводять до масового всихання. За результатами рекогносцирувального обстеження у 2008 р. було виявлено понад 1600 га деревостанів з осередками всихання й ознаками ураження грибовими хворобами [12]. Окрім мертвих і суховерхих, трапляється чимало дерев (11 %) з пошкодженнями асиміляційного апарату. Як наслідок, такі деревні масиви не тільки створюють передумови для пришвидшеної

мінералізації вуглецевмісних сполук, але й мають менший поглинальний потенціал, порівняно зі здоровими.

Низькорослі інтенсивні сади алгоритмом GFW Climate не враховувалися. Зауважимо, що хоча їхній внесок у поглинання та депонування парникових газів досліджений досить детально [8, 21], розрахувати відповідні показники буде доволі складно, оскільки вони дуже різнитимуться залежно від технологій садівництва. Переважна більшість садів Хотинщини перебуває в приватній власності, а отже й агрометоди, вжиті у двох сусідніх садах, можуть бути принципово розбіжними. Наприклад, спалювання обрізних залишків і опалого листя, використання тракторів для оброблення міжстобурової зони, застосування фумігації для боротьби зі шкідниками і димових вогнищ для захисту цвіту від низьких температур можуть істотно змінити вуглецевий баланс у бік емісії парникових газів.

Отже, за результатами виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – набула подальшого розвитку методологія створення продукційних еколого-картографічних моделей кліматорегулювальних екосистемних послуг лісів внаслідок розроблення нових методів і моделей оцінювання стану екосистем. Вперше синтезовано тематичні еколого-картографічні моделі балансу вуглецю в лісових екосистемах Чернівецької області, із урахуванням структурно-функціональної диференціації та антропогенної трансформації ландшафтів на локальному й регіональному рівнях.

Практична значущість результатів дослідження – отримані кількісні значення балансової оцінки потоків вуглецю можна використати для монетарного виразу кліматорегулювальних ЕП деревного покриву. Подібні проекти можна використовувати у будь-якій іншій локації для кількісного оцінювання актуального стану та багаторічної динаміки надання лісами кліматорегулювальних ЕП.

Висновки / Conclusions

Продемонстровано можливості використання відкритих геоінформаційних даних, доступних для користувачів сервісу Global Forest Watch, для кількісного оцінювання актуального стану та багаторічної динаміки надання лісами кліматорегулювальних ЕП у регіональному масштабі. Запропоновано розглядати Чернівецьку адміністративну область як унікальну природну платформу для багаторічних досліджень ЕП, дотримуючись такої стратифікації: 1) Традиційний стратум (гірські ландшафти з високими показниками лісистості), Проміжний стратум (передгірські ландшафти з мозаїчним лісовим покривом і варіабельністю лісорослинних умов) та Інтенсивний стратум (рівнинні агроландшафти, деревний покрив яких складений природними лісами, лісомеліоративними насадженнями і плодовими садами).

Розкрито особливості просторового розподілу потенціалу лісів Чернівецької області з надання кліматорегулювальних ЕП. З'ясовано, що баланс вуглецю в лісових екосистемах вздовж соціоекологічного градієнту Чернівецької області характеризується переважанням асиміляції над емісією. Показано, що ефективність біопродукційного процесу прямо залежить від площі

фрагменту деревного покриву і обернено – від протяжності його меж. Чистий вуглецевий обмін у лісах Традиційного стратуму становить 426 тис. тонн CO₂-екв. за рік (6,3 т/га), Проміжного – 276 тис. тонн CO₂-екв. за рік (4,9 т/га), Інтенсивного – 117 тис. тонн CO₂-екв./рік (5,8 т/га).

Встановлено, що найвагоміший внесок у процес поглинання вуглецю з атмосферного повітря (7,3-13,4 т/га чистого обміну) належить гірським лісам Традиційного стратуму. Показано, що смерекові насадження Проміжного стратуму серйозно потерпають від патологічних процесів, які в комплексі з кліматичними змінами призводять до масового вихання. Такі деревні масиви не тільки створюють передумови для пришвидшеної мінералізації вуглецевмісних сполук, але й мають менший поглинальний потенціал, порівняно зі здоровими. Знайдене співвідношення між процесами асиміляції й емісії свідчить про добру збалансованість вуглецевого циклу Інтенсивного стратуму, де частка лісів з максимальними показниками річної асиміляції вуглецю (5,1-9,3 т/га) становить 71 %. Позитивний баланс відзначений і в придорожніх лінійних насадженнях, а також в садових комплексах з висотою дерев понад 5 м і зімкненістю крон від 30 %. З огляду на це в перспективі визначено потребу дослідження внеску придорожніх насаджень та садових комплексів у вуглецевий баланс регіону.

Наголошено на важливості ефективного управління деревним покривом регіону як ключового елемента для забезпечення стабільності лісових і садових екосистем та повноти реалізації ЕП регулювання клімату.

References

- Alioshkina, U., Zhovtenko, A., Vyshenska, I., Rasevych, V., Gavrylov, S., & Tkachova, A. (2011). Carbon accumulation by forest ecosystems (by the example of "Lisnyky" zakaznyk, Kyiv). *NaUKMA Research Papers. Biology and Ecology*, 119, 52–55. [In Ukrainian].
- Angelstam, P., Asplund, B., Bastian, O., Engelmark, O., Fedoriak, M., Grunewald, K., & Öster, L. (2022). Tradition as asset or burden for transitions from forests as cropping systems to multifunctional forest landscapes: Sweden as a case study. *Forest Ecology and Management*, 505. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119895>
- Bartowitz, K. J., Walsh, E. S., Stenzel, J. E., Kolden, C. A., & Hudiburg, T. W. (2022). Forest carbon emission sources are not equal: Putting fire, harvest, and fossil fuel emissions in context. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.867112>
- Bedemichuk, T. Yu. (2017). Carbon reservoirs and fluxes in terrestrial ecosystems of Ukraine: According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine November 9, 2016. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 100–108. <https://doi.org/10.15407/visn2017.01.098>
- Bespalko, R. I., & Christchuk, S. Yu (2011). Ecological aspects of formation rational land use. *Scientific Herald of Chernivtsy University. Biology (Biological Systems)*, 3(101), 101–104. [In Ukrainian].
- Brown, C., Reyers, B., Ingwall-King, L., Mapendembe, A., Nel, J., OFarrell, P., Dixon, M., & Bowles-Newark, N. J. (2014). Measuring ecosystem services: Guidance on developing ecosystem service indicators. In *Unep-Wcmc* (Issue January 2019).
- Chaskovskyy, A., Myklush, Y., Kyumerle, T., & Olofson, P. (2015). Carbon balance of natural systems in Western Ukraine. *Scientific bulletin of UNFU*, 26(1), 16–29. <https://doi.org/10.15421/40260102>
- Demestihás, C., Plénet, D., Génard, M., Raynal, C., & Lescourret, F. (2017). Ecosystem services in orchards. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0422-1>
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., de Bruin, S., Farina, M., Fatoyinbo, L., Hansen, M. C., Herold, M., Houghton, R. A., Potapov, P. V., Suarez, D. R., Roman-Cuesta, R. M., Saatchi, S. S., Slay, C. M., Turubanova, S. A., & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00976-6>
- Hrynyk, H. H., Zadorozhnyy, A. I., & Hrynyk, O. M. (2021). The trunk bioproductivity of spruce stands of the Polonyn ridge of the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(6), 26–34. <https://doi.org/10.36930/40310603>
- Kicklighter, D. W., Lin, T. S., Zhang, J., Chen, M., Vörösmarty, C. J., Jain, A. K., & Melillo, J. M. (2023). Influence of forest infrastructure on the responses of ecosystem services to climate extremes in the Midwest and Northeast United States from 1980 to 2019. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1069451>
- Kostyba, M. V., Kramarets, V. O., Hrynyk, H. H., Buniy, V. Y., & Novorynsky, P. S. (2008). Decline of spruce stands in Bukovyna region. *Forestry and Agroforestry*, 114, 152–158. [In Ukrainian].
- Myklush, S. I., & Myklush, Yu. S. (2009). Total phytomass of plain beech plantations of Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*, 19(4), 16–21. [In Ukrainian].
- Nunes, L. J., Meireles, C. I., Pinto Gomes, C. J., & Almeida Ribeiro, N. M. (2020). Forest contribution to climate change mitigation: Management oriented to carbon capture and storage. *Climate*, 8(2), 21. <https://doi.org/10.3390/cli8020021>
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., & Ibrahim, Z. Z. (2022). *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC. URL: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Pickens, A., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Turubanova, S., Zalles, V., Li, X., Khan, A., Stolle, F., Harris, N., Song, X.-P., Baggett, A., Kommareddy, I., & Kommareddy, A. (2022). The Global 2000-2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived From the Landsat Archive: First Results. *Frontiers in Remote Sensing*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.856903>
- Rozhak, V. (2014). Pools and fluxes of carbon within forest ecosystems of Stryi-San Highland (Ukrainian Carpathians). *Biology and valeology*, 16, 85–95. [In Ukrainian].
- Skytt, T., Englund, G., & Jonsson, B. G. (2021). Climate mitigation forestry – temporal trade-offs. *Environmental Research Letters*, 16(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac30fa>
- Smaliychuk, A., Kruhlov, I., Chaskovskyy, O., Smaliychuk, G., & Bilanyuk, V. (2021). Climate regulating ecosystem services of the forest landscape in the Ukrainian Carpathians. *The scientific issues of Ternopil Volodymyr Hnatiuk national pedagogical university. Series: geography*, 51(2), 48–56. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.21.2.6>
- Tokar, O. Y., Korol, M. M., & Gusti, M. I. (2021). Estimation of carbon stocks in phytomass of forest stands of protected areas in the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of UNFU*, 31(5), 42–46. <https://doi.org/10.36930/40310506>
- Zanotelli, D., Vendrame, N., López-Bernal, Á., & Caruso, G. (2018). Carbon sequestration in orchards and vineyards. *Italus Hortus*, 25(3). <https://doi.org/10.26353/J.ITAHORT/2018.3.1328>
- Zhuk, A. V., & Myshiliuk, I. I. (2023). Tree cover dynamics on the socio-ecological gradient of Chernivtsi region. *Bulletin of Kharkiv National University named after V. N. Karazin. Series: Ecology*, Vol. 28, 101–111. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-09>
- Zhuk, A., Sytnikova, I., Fylypchuk, T., Bahlei, O., Shkrobanets, O., Danihlik, J., Moskalyk, H., Panchuk, I., Burkut, V., Angelstam, P., & Fedoriak, M. (2022). Physicochemical quality indicators of honey: An evaluation in a Ukrainian socioecological gradient. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 13(4), 354–361. <https://doi.org/10.15421/022246>

CLIMATE-REGULATORY ECOSYSTEM SERVICES OF THE FORESTS OF THE CHERNIVTSI REGION ON THE GRADIENT OF LANDSCAPE CONDITIONS

This paper delves into the ecosystem services related to climatic regulation provided by forests across the landscape gradient in Chernivtsi Region, Ukraine. As a case study, we examined three strata (social-ecological systems) characterized by diverse natural conditions, land cover, and land use. The traditional stratum showcases village livelihoods in mountain areas where forestry predominates. The intermediate stratum illustrates transitional areas featuring a mix of forestry and agriculture. Lastly, the intensive stratum, situated in the lowlands of the region, represents landscapes marked by intensive agriculture, including orchards. Utilizing open remote sensing data from Global Forest Watch, this study estimates gross emissions, gross removals and net carbon fluxes between forests and the atmosphere for the period from 2001 to 2022. The investigation discloses a prevalence of removals over emission along the mentioned landscape gradient, with each stratum exhibiting distinct carbon exchange patterns. The study determines that the net carbon flux in mountainous spruce and mixed forests within the traditional stratum amounts to 426 ktCO₂e/year (6.3 t/ha). In foothill landscape forests of the intermediate stratum, the figure is 276 ktCO₂e/year (4.9 t/ha), while in flat broad-leaved forest stands of the intensive stratum, the net carbon exchange is 117 ktCO₂e/year (5.8 t/ha). Notably, the intensive stratum demonstrates a well-balanced carbon flux. Beyond forests, a positive carbon balance is observed in roadside tree lines and orchards characterized by canopy cover >30 percent and >5 m height. The study also uncovers the impact of pathological processes on spruce stands in the intermediate stratum, contributing to substantial carbon emission. Overall, these findings underscore the intricate interplay between landscape characteristics, forest health, and carbon flux. The research, reliant on open remote sensing data, underscores the potential for utilizing such datasets in regional-scale assessments of climatic regulation ecosystem services. The identified patterns and imbalances in carbon exchanges emphasize the need for sustainable forest management practices to enhance carbon sequestration and mitigate emissions. Future research should delve deeper into the specific mechanisms driving land-related carbon dynamics in different strata, guiding targeted interventions for effective climate change mitigation.

Keywords: carbon flux; gross removals; gross emission; carbon sequestration; remote sensing; tree cover.