УДК 581.524:630(477.41)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.34

БІОПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ДЕПОНУВАННЯ ВУГЛЕЦЮ СОСНОВИМИ НАСАДЖЕННЯМИ КИЇВЩИНИ

Фіцайло Т.В. (orcid.org/0009-0005-6534-8483),
Тимченко І.А. (orcid.org/ 0000-0001-7505-3164)
Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України
вул. Терещенківська, 2, 01601, м. Київ
tfitsailo@gmail.com, itymorchid@ukr.net

Соснові насадження Київщини є важливим компонентом лісових екосистем регіону, що забезпечує накопичення органічної речовини, депонування вуглецю, а також регулює водний і енергетичний обмін та підтримує екологічну стійкість. Метою роботи було оцінити біопродуктивність та енергетичний потенціал соснових насаджень Київщини, визначити запаси карбону та охарактеризувати їхній екологічний простір. Дослідження проведено на 200 ділянках соснових лісів Київщини загальною площею 679,1 га. Для кожної ділянки узагальнено запаси деревини, біомасу стовбурів, енергію окремих компонентів фітомаси, приріст, енергію підстилки, чагарникового та трав'яного ярусів, а також енергетичний еквівалент фітомаси екосистеми. Встановлено значну просторову диференціацію продуктивності соснових насаджень. Сумарний запас деревини на досліджених виділах становить 189 634,53 м³, а середній запас у перерахунку на одиницю площі – 269,5 м³/га. Сумарна біомаса стовбурів становить 75 853,81 т, енергія стовбурної біомаси – 1 365 368,62 ГДж, а інтегральна енергія врахованої фітомаси екосистем – 2 426 959,06 ГДж. За прийнятим енергетичним еквівалентом це відповідає приблизно 67,87 тис. т карбону у сукупній сухій фітомасі досліджених виділів. Основну частину енергетичного потенціалу формують деревний ярус і підстилка, що визначає одночасно високу карбонову ємність та потенційну пожежну вразливість окремих лісових масивів. Екологічний аналіз показав, що найбільшу амплітуду серед досліджених факторів мають кислотність ґрунту та вміст мінерального азоту, далі – сольовий режим, вміст карбонатів, гумідність клімату та континентальність. Моделювання зміщення екологічних амплітуд за сценаріями підвищення температури на 1–3 °С засвідчило ризик скорочення екологічної ніші за вологістю ґрунту, аерацією, сольовим режимом і вмістом мінерального азоту; за +3 °С аналогічна тенденція посилюється для гумідності клімату. Отримані результати можуть бути використані для формування регіональної системи моніторингу вуглецевої ємності, пожежної вразливості та пріоритетів збереження соснових екосистем Київщини. *Ключові слова: Pinus sylvestris*, соснові ліси, біомаса, біопродуктивність, депонування вуглецю, енергетичний потенціал, синфітоіндикація, екологічні фактори, кліматичні зміни, Київщина.

Bioproductivity and carbon sequestration by pine stands of Kyiv region. Fitsailo T., Tymchenko I.
Pine stands of the Kyiv region are an essential component of the region's forest ecosystems, ensuring the accumulation of organic matter and carbon sequestration, while also regulating water and energy exchange and maintaining ecological stability. The aim of this study was to assess the bioproductivity and energy potential of pine stands in the Kyiv region, determine carbon stocks, and characterize their ecological space. The study was conducted across 200 plots of pine forests in the Kyiv region with a total area of 679.1 ha. For each plot, wood stocks, stem biomass, the energy content of individual phytomass components, biomass increment, litter energy, shrub and herb-layer energy, as well as the energy equivalent of ecosystem phytomass were summarized. A significant spatial differentiation in the productivity of pine stands was established. The total wood stock of the studied stands amounted to 189,634.53 m³, with a mean stock per unit area of 269.5 m³/ha. Total stem biomass reached 75,853.81 t, stem biomass energy equaled 1,365,368.62 GJ, and the total energy equivalent of the accounted ecosystem phytomass was 2,426,959.06 GJ. Based on the accepted energy equivalent, this corresponds to approximately 67.87 thousand tonnes of carbon in the total dry phytomass of the studied stands. The tree layer and litter form the major part of the energy potential, which simultaneously determines a high carbon storage capacity and potential fire vulnerability in certain forest areas. Ecological analysis showed that soil acidity and mineral nitrogen content exhibit the widest amplitudes among the factors studied, followed by salt regime, carbonate content, climatic humidity, and continentality. Modelling of shifts in ecological amplitudes under scenarios of a 1–3 °C temperature increase revealed a risk of ecological niche contraction regarding soil moisture, aeration, salt regime, and mineral nitrogen content; under a +3 °C warming scenario, a similar trend intensifies for climatic humidity. The obtained results can be used to establish a regional monitoring system for carbon storage capacity, fire vulnerability, and conservation priorities of pine ecosystems in the Kyiv region. *Key words: Pinus sylvestris*, pine forests, biomass, bioproductivity, carbon sequestration, energy potential, synphytoindication, environmental factors, climate change, Kyiv region.

Постановка проблеми. Соснові ліси є базовим компонентно-функціональним елементом екомережі Центрального Полісся та Лісостепу України, забезпечуючи підтримання екологічного балансу та надання критично важливих екосистемних послуг [9]. Насадження *Pinus sylvestris* L. відіграють провідну роль у регіональному вуглецевому циклі як накопичувачі органічного вуглецю та депо CO_2[5, 11], регулюючи водний режим і є осередком збереження фіторізноманіття.

© Фіцайло Т.В., Тимченко І.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Оцінка біопродуктивності та просторово-часової динаміки пулів вуглецю соснових екосистем має як теоретичне значення для розуміння біогеохімічних колообігів, так і прикладне – для ведення національного кадастру парникових газів і виконання зобов'язань України в межах Паризької угоди та концепції переходу до кліматично нейтральної економіки [11].

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена сучасними кліматичними змінами та антропогенними факторами, зокрема наслідками воєнних дій (пожежі, механічні пошкодження ґрунтів), які зменшують запаси лісової біомаси та послаблюють карбондепонувальну здатність екосистем.

Лісові екосистеми є одним із найбільш вагомих природних депо вуглецю. Для Київської області встановлено значні запаси органічного вуглецю в рослинній біомасі лісів, причому соснові насадження формують близько 60 % регіонального запасу вуглецю рослинної біомаси [20]. Отже, оцінювання локальної просторової варіабельності біопродуктивності сосняків необхідне для переходу від регіональних узагальнень до оцінки екосистемної стійкості окремих типів лісорослинних умов.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконано в рамках науково–дослідної роботи «Розроблення і використання методології і алгоритмів оцінки впливу військових дій на різноманіття природних екосистем України для визначення їхніх втрат для відновлення та адаптивного потенціалу».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для соснових насаджень Київщини вже розроблено залежності для оцінювання фітомаси та поглинання вуглецю, що підтверджує значний регіональний потенціал *Pinus sylvestris* як вуглецевого депо [15]. Сучасні дослідження також показують, що біомаса соснових деревостанів істотно залежить від віку, запасу, базальної площі та інших структурних характеристик деревостану [12]. Оцінювання вуглецевого балансу соснових екосистем потребує врахування не лише деревного ярусу, а й підліску, трав'яного покриву та детриту [18, 19]. На загальнодержавному рівні просторове моделювання лісового вуглецевого балансу України демонструє важливість регіональної диференціації запасів і потоків вуглецю [22].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. У наявних дослідженнях біопродуктивності соснових насаджень Київщини переважно оцінювали біомасу та вуглецеві запаси, тоді як зв'язок цих показників з екологічними характеристиками угруповань залишається недостатньо дослідженим. Особливо важливим є визначення того, які саме едафічні та кліматичні фактори можуть обмежувати стійкість соснових екосистем за подальшого потепління.

Новизна. У роботі вперше для дослідженого масиву соснових насаджень одночасно оцінено запаси деревини, біомаси, енергетичного потенціалу та синфітоіндикаційна характеристика екотопів соснових насаджень Київщини. Вперше для досліджуваного масиву в єдиній системі проаналізовано просторову варіабельність енергетичних показників та зміну екологічного простору соснових фітоценозів за сценаріїв потепління на 1, 2 та 3 °C.

Методологічне та загальнонаукове значення. Запропонований підхід дозволяє розглядати біопродуктивність не лише як ресурсну характеристику деревостану, а як один із інтегральних показників функціонування екосистеми. Поєднання енергетичних та синфітоіндикаційних характеристик дозволило зіставити продукційні параметри соснових насаджень з екологічними умовами їхнього існування.

Матеріали та методи. Дослідження проведено на основі попередніх польових досліджень, літературних даних, таксаційних описів (200 ділянок загальною площею 679,1 га) в межах приміської зеленої зони м. Києва (Лісопаркового господарського поясу), що охоплює соснові та дубово-соснові масиви Правобережного Полісся (Пуща-Водиця), Лівобережного Полісся та Броварсько-Дарницького піщаного ареалу (Броварське та Дарницьке лісництва), а також Дніпровської заплавно-терасової системи (Конча-Заспа).

Біопродуктивність оцінювали за запасом деревини та показниками фітомаси окремих компонентів деревостану. Оцінку базових показників та їхніх співвідношень здійснювали за даними про діаметр, висоту, вік дерев, об'єм і щільність деревини [7]. Визначено залежності запасів біомаси від віку, висоти та діаметра домінуючої породи. На основі отриманих показників (вік-запас, висота-запас, діаметр-запас) розраховували середнє значення запасу ($м^3$/га). Проводився обрахунок біомаси складових екосистем за відомими співвідношеннями між показниками стовбурної деревини (63%), гілок (13%), хвої (4%) та підземної частини (20%), а також загальної надземної біомаси деревостану [4-6, 14].

Геоботанічні дослідження виконано із застосуванням еколого-флористичних критеріїв опису рослинних угруповань [8, 21]. Екологічну характеристику угруповань подано на основі розрахунку фітоіндикаційних показників провідних екологічних факторів за відповідними шкалами Я.П. Дідуха та П.Г. Плюти [3, 10]. Розрахунок прогностичних даних можливої втрати оселищ виконано на основі методики Я.П. Дідуха [1, 2].

Викладення основного матеріалу. Псамофітні соснові та дубово-соснові ліси, приурочені до другої (акумулятивної) тераси р. Дніпро, сформовані на дерново-слабо- та середньопідзолистих піщаних і супіщаних ґрунтах різного ступеня зволоження. Досліджені соснові угруповання належать до класів **Vaccinio-Piceetea** Br. -Bl. in Br. -Bl. et al. 1939 (*Dicrano-Pinetum* Preising et Knapp ex Oberd. 1957, *Peucedano-Pinetum* Matuszkiewicz (1962) 1973,

Veronico incanae-Pinetum Bulokhov et Solomeshch 2003) та **Pyrolo-Pinetea sylvestris** Korneck 1974 (*Potentillo arenariae-Pinetum sylvestris* Ermakov 1999), що відображає поєднання бореальних і термофільно-ксеромезофільних рис рослинності. Їхня флористична та екологічна диференціація пов'язана з мозаїчністю піщаних терасових екотопів Дніпра, що зумовлює широкий спектр умов зволоження, трофності та термічного режиму.

Біопродуктивність та енергетичні характеристики. Сумарний запас деревини на 200 ділянках загальною площею 679,1 га становить 189 634,53 м³, а біомаса стовбурів – 75 853,81 т (Табл. 1). Запас, нормований на площу, варіює від 15,49 до 11 102,00 м³/га (у перерахунку на максимальні виділи), при середньому значенні 269,5 м³/га та медіані 260,0 м³/га. Широкий діапазон запасу відображає неоднорідність досліджених деревостанів за віком, повнотою та умовами місцезростання.

Енергія стовбурної біомаси досягає 1 365 368,62 ГДж, тоді як енергетичний еквівалент біомаси деревостану становить 2 167 251,77 ГДж, а надземної біомаси деревостану – 2 709 064,71 ГДж. Енергія приросту біомаси деревостану для всієї вибірки становить 65 017,55 ГДж. Сумарна енергія фітомаси екосистеми для 200 виділів становить 2 426 959,06 ГДж. За прийнятим співвідношенням 35,76 ГДж на 1 т карбону це відповідає приблизно 67 868 т С у сукупній фітомасі досліджених виділів. Порівняння з дослідженнями соснових лісів Лівобережного Лісостепу показує, що карбоновий потенціал соснових насаджень суттєво залежить від віку та умов місцезростання [16, 17]. У модальних соснових деревостанах максимальна середньорічна зміна запасу карбону спостерігається у молодших і середньовікових насадженнях, тоді як абсолютний запас карбону продовжує накопичуватися з віком [17]. Енергія підстилки сумарно становить 243815,82 ГДж. Найвищі її запаси спостерігаються на ділянках стиглого лісу – 14168,57 ГДж, що свідчить про значний детритний компонент екосистеми.

Екологічна характеристика соснових біотопів. Для фітоценозів досліджуваних соснових лісів розраховані значення 12 екологічних факторів: вологість ґрунту, змінність зволоження ґрунту, аерація ґрунту, загальний сольовий режим ґрунту, або трофність, кислотність ґрунту, уміст мінерального азоту та карбонатів у ґрунті, терморежим, континентальність, кріорежим, гумідність, освітленість. За діапазоном фактичних значень найбільшою варіабельністю характеризуються кислотність ґрунту (5,25–7,33) та вміст мінерального азоту (3,89–5,94). Значними також є амплітуди сольового режиму (5,57–6,98), вмісту карбонатів (5,57–6,98), гумідності клімату (11,85–13,36) та континентальності (7,64–9,12). Екотопи цих лісів знаходяться в умовах від суховатих лучно–степових до свіжих лісо–лучних ділянок з помірним промочуванням коренемісного шару грунту, з кислотністю pH 5,5–6,6. За сольовим режимом ці ділянки займають багаті на солі грунти (95–150 мл/л), за вмістом карбонатів досліджувані соснові ліси або не зростають на карбонатних грунтах, або з незначним вмістом карбонатів. Також ці сухі піщані екотопи бідні (0,05–0,3%) на вміст мінерального азоту в грунті. За терморежимом ценози соснових лісів відповідають суббореальному типу (35-39 ккал·см$^{-2}$·рік$^{-1}$). Континентальність клімату має різко континентальний характер (126-140%). Амплітуда гумідності клімату або омброрежиму відповідає субарідофільним умовам. Морозність клімату (кріорежим) для досліджуваних ділянок

Таблиця 1

Біопродуктивність та енергетичні характеристики соснових деревостанів

Показник	на 1 га (середнє)	на 1 га (Min)	на 1 га (Max)	на площу всіх виділів (679,1 га)
Запас деревини, м³	271,41	50,00	1398,01	189634,53
Біомаса стовбурів, м³	108,56	20,00	559,20	75853,81
Енергія стовбурної біомаси, ГДж	1954,13	360,00	10065,64	1365368,62
Енергія біомаси деревостану, ГДж	3101,79	571,43	15977,20	2167251,77
Енергія надземної біомаси деревостану, ГДж	3877,24	714,29	19971,50	2709064,71
Енергія приросту біомаси деревостану, ГДж	93,05	17,14	479,32	65017,55
Енергія підстилки, ГДж	348,95	64,29	1797,44	243815,82
Енергія чагарників та підросту, ГДж	12,65	0,40	118,79	7062,87
Енергія трав'яного ярусу, ГДж	15,82	0,50	148,48	8828,59
Енергія фітомаси екосистеми, ГДж	3479,21	657,60	18041,90	2426959,06
Енергія трофічних ланцюгів, ГДж	10,89	2,93	62,78	7384,61
Енергія CO2, ГДж	70,77	19,05	408,07	47999,99
Енергія O2, ГДж	152,42	41,02	878,92	103384,60
Енергія транспірації, ГДж	21,77	5,86	125,56	14769,23

відповідає субкріофітним умовам – морозність зим з -14 – -10^{0}С.

Прогноз зміни екологічних умов за сценаріями потепління. Підвищення середньорічної температури на 1–3 °С зумовлює перебудову комплексу екологічних факторів, що впливають на функціонування лісових екосистем. За сценарію +1 °С найбільше перекриття прогнозованої та сучасної амплітуд спостерігається для освітленості, кислотності, вмісту карбонатів та змінності зволоження, тоді як вологість ґрунту, його аерація, сольовий режим і вміст мінерального азоту мають лише 41–48 % перекриття. Отже, саме ці фактори можуть першими обмежувати площу екологічно придатних умов для соснових угруповань. За сценарію +2 °С тенденція зберігається: мінімальні значення перекриття припадають на аерацію (40,66 %), кислотність (71,00 % – без загрози), вологість ґрунту (42,39 %), сольовий режим (42,70 %) та мінеральний азот (46,74 %). Зростання температури посилює випаровування і транспіраційні втрати, а на легких піщаних і супіщаних ґрунтах із невисокою водоутримувальною здатністю це може призводити до швидшого висушування кореневмісного шару. За сценарію +3 °С ймовірність переходу від компенсаторних до структурних змін екосистеми істотно зростає. Значення перекриття для гумідності клімату знижується до 49,30 %, тому цей фактор переходить у категорію потенційної загрози скорочення. Для інших факторів перекриття залишається понад 50 %.Для соснових насаджень Київщини це особливо важливо через поєднання піщаних ґрунтів, субарідофільної гумідності та високої пожежної небезпеки. Отримана нами тенденція – зниження перекриття амплітуд за вологістю ґрунту від 44,14 % при +1 °С до 40,72 % при +3 °С, за аерацією – від 41,28 до 40,05 %, а за вмістом мінерального азоту – від 48,18 до 45,35 % – свідчить про поступове посилення обмежувальної ролі цих факторів. Особливо показовою є зміна гумідності клімату: її перекриття зменшується з 51,74 % при +1 °С до 49,30 % при +3 °С, тобто саме за сценарію +3 °С цей фактор переходить через прийнятий у дослідженні 50-відсотковий поріг і потрапляє до категорії потенційної загрози скорочення.

Водночас важливо підкреслити, що вихід окремого екологічного фактора за межі оптимальної амплітуди не означає автоматичного зникнення соснового угруповання. Екосистема є багатофакторною системою, у якій зміна одного параметра може частково компенсуватися змінами інших параметрів, а рослини мають певний діапазон фізіологічної пластичності. Зниження перекриття амплітуд слід трактувати як потенційний ризик скорочення екологічно придатних умов, а не як прогноз фактичного зникнення соснових угруповань.

Головні висновки.

1. Соснові насадження Київщини характеризуються високим біопродуктивним і карбонодепонувальним потенціалом. На 200 досліджених ділянках загальною площею 679,1 га сумарний запас деревини становив 189 634,53 м^3, біомаса стовбурів – 75 853,81 т, енергія стовбурної біомаси – 1 365 368,62 ГДж, а енергетичний еквівалент врахованої фітомаси екосистем – 2 426 959,06 ГДж. Отримані показники підтверджують значення соснових деревостанів не лише як продукційних, а й як регуляторних компонентів лісових екосистем.

2. Біопродуктивність характеризується вираженою просторовою неоднорідністю. Запас деревини в перерахунку на одиницю площі варіює від 15,49 до 1 102,00 м^3/га (у перерахунку на максимальні виділи) при середньому значенні 269,5 м^3/га. Така диференціація є результатом взаємодії вікової та структурної організації деревостанів із ґрунтово-гідрологічними умовами, рельєфом і історією формування лісових масивів.

3. Величина накопиченого карбону безпосередньо пов’язана із запасом органічної речовини деревостанів. За прийнятим співвідношенням 35,76 ГДж на 1 т карбону енергетичний запас врахованої фітомаси відповідає орієнтовно 67 868 т С у сукупній фітомасі досліджених виділів. Водночас цей показник охоплює лише зафіксовану фітомасу, не враховуючи повністю ґрунтовий вуглець, глибокі коріння та деякі інші складові екосистеми. Отже, фактичний екосистемний запас карбону є вищим, а оцінені величини слід розглядати як мінімальну характеристику карбонодепонувальної функції досліджених насаджень.

4. Здатність соснових екосистем накопичувати карбон одночасно визначає їхню вразливість до порушень, зокрема пожеж. Найбільші запаси енергетично ємної органічної речовини підстилки встановлено на ділянках стиглого лісу (70–143 років) – 14 168,57 ГДж (при загальній енергії підстилки по всій вибірці 243 815,82 ГДж). Тому високопродуктивні деревостани мають розглядатися не лише як пріоритетні карбонові депо, а й як об’єкти підвищеної уваги щодо пожежної безпеки.

5. Синфітоіндикаційний аналіз засвідчив переважання сухуватих і свіжих екотопів із суббореальним терморежимом, континентальним характером клімату та відносно низькою гумідністю. Саме поєднання едафічної бідності, високої проникності субстрату та гідротермічного режиму формує специфічну екологічну нішу соснових угруповань.

6. Підвищення температури змінює не лише безпосередньо термічні умови існування соснових угруповань, а й комплекс пов’язаних із ними едафічних та кліматичних факторів. Моделювання показало, що найбільш чутливими компонентами екологічного простору за потепління на 1–2 °С є вологість і аерація ґрунту, сольовий режим та забезпечення мінеральним азотом; за потепління на 3 °С до них додається гумідність клімату. Отже, зі збільшенням температури зростає роль водного режиму ґрунту та

пов'язаних із ним едафічних факторів у формуванні придатності умов для соснових угруповань.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для формування регіональної системи моніторингу карбонового потенціалу соснових лісів Київщини. Наступним етапом дослідження може бути просторове екстраполювання отриманих оцінок із використанням даних дистанційного зондування, зокрема NDVI та інших спектральних індексів.

Література

1. Буджак В. В., Дідух Я. П. Синфітоіндикаційна оцінка оселищ рослин Червоної книги України та ризиків їхніх втрат під впливом кліматогенних змін. *Український ботанічний журнал*. 2020. Т. 77, № 6. С. 434–453. DOI: 10.15407/ukrbotj77.06.434.
2. Дідух Я. П. Методологічні підходи до проблем фітоіндикації екологічних факторів. *Український ботанічний журнал*. 1990. Т. 47, № 6. С. 5–12.
3. Дідух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. Київ: Наукова думка, 1994. 280 с.
4. Дідух Я. П., Расевич В. В., Гаврилов С. О., Альошкіна У. М. Оцінка екологічних збитків екосистем на основі енергетичних показників. *Наука та інновації.* 2009. Т. 5, № 5. С. 62–74.
5. Лакида П. І. Фітомаса лісів України. Тернопіль: Збруч, 2002. 256 с.
6. Методика розрахунку екологічних збитків природних екосистем та їхніх компонентів: посібник / Я. П. Дідух, У. М. Соколенко, В. В. Расевич, С. О. Гаврилов. Львів; Київ: Компанія «Манускрипт», 2024. 68 с.
7. Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України. Київ: ЕКОінформ, 2011. 187 с.
8. Продромус рослинності України / Д. В. Дубина, Т. П. Дзюба, С. М. Ємельянова [та ін.]. Київ: Наукова думка, 2019. 784 с.
9. Costanza R., de Groot R., Sutton P. [et al.]. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158.
10. Didukh Ya. P. The ecological scales for the species of Ukrainian flora and their use in synphytoindication. Kyiv: Phytosociocentre, 2011. 176 p.
11. IPCC. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / E. Calvo Buendia, K. Tanabe, A. Kranjc [et al.] (eds). Japan : IPCC, 2019. URL: iges.or.jp (дата звернення: 30.08.2026).
12. Jagodziński A. M., Dyderski M. K., Gęsikiewicz K. [et al.]. Effects of stand features on aboveground biomass and biomass conversion and expansion factors based on a Pinus sylvestris L. chronosequence in Western Poland. *European Journal of Forest Research*. 2019. Vol. 138. P. 673–683. DOI: 10.1007/s10342-019-01197-z.
13. Lesiv M., Shvidenko A., Schepaschenko D. [et al.]. A spatial assessment of the forest carbon budget for Ukraine. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2019*. Vol. 24. P. 985–1006. DOI: 10.1007/s11027-018-9795-y.
14. Moore T. R., Bubier J. L. [et al.]. Plant biomass and production and CO_2 exchange in an ombrotrophic bog. *Journal of Ecology.* 2002. Vol. 90. P. 25–36. DOI: 10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x.
15. Moroz V., Nykytiuk Yu. Carbon absorption ability of pine forest plantations in Kyiv Polissya. *Interdepartmental Thematic Scientific Collection of Phytosanitary Safety.* 2019. Iss. 65. P. 133–148. DOI: 10.36495/1606-9773.2019.65.133-148.
16. Pasternak V. P., Pyvovar T. S., Yarotsky V. Yu. Forest carbon stock in Left-bank Forest-Steppe of Ukraine according to intensive forest monitoring data. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine.* 2020. Vol. 20. P. 120–130. DOI: 10.15421/412011.
17. Pasternak V. P., Pyvovar T. S., Garmash A. V. Bioproductivity and carbon stock dynamics of modal pine stands in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine.* 2025. Vol. 28. P. 149–156. DOI: 10.15421/412512.
18. Rapport D. J., Costanza R., McMichael A. J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution.* 1998. Vol. 13, no. 10. P. 397–402.
19. The carbon balance of a six-year-old Scots pine (Pinus sylvestris L.) ecosystem estimated by different methods. *Forest Ecology and Management.* 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.012.
20. Vasylyshyn R., Lakyda I., Melnyk O., Lakyda M., Rymarenko Yu. Organic carbon in the plant biomass of forests in Kyiv region. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science.* 2021. Vol. 12, no. 3. P. 63–71. DOI: 10.31548/forest2021.03.005.
21. Weber H. E., Moravec J., Theurillat J. P. International Code of Phytosociological Nomenclature. 3rd edition. *Journal of Vegetation Science*. 2000. Vol. 11, no. 5. P. 739–768.
22. Zibtsev S., Pasternak V., Vasylyshyn R., Myroniuk V., Sydorenko S. Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science.* 2024. Vol. 15, iss. 1. P. 126–139. DOI: 10.31548/forest/1.2024.126.

Дата першого надходження статті до видання: 01.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026