



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412532>
Article received 2025.05.28
Article revised 2025.10.30
Article accepted 2025.11.20
Article published 2026.03.16

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Volodymyr Blyshchuk
blysh@nubip.edu.ua
15 Heroiv Oborony St.,
Kyiv, 03041, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 630*5:582.475.4(477.41/.45)

**Моделі росту та продуктивності самосійних соснових лісів
Українського Полісся**

В.І. Блищик¹, П.І. Лакида²

Представлено результати дослідження динаміки основних таксаційних показників самосійних лісів сосни звичайної на землях сільськогосподарського призначення. Як дослідні дані використано результати власних досліджень у самосійних лісах п'яти областей Українського Полісся (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська і Чернігівська) та інформацію про природні сосняки цього регіону з бази даних. Параметри моделей таксаційних показників встановлювали за допомогою регресійних залежностей, а їхню точність і адекватність перевіряли за допомогою статистичних критеріїв. Модель кривої-гід за верхньою висотою розроблено на основі ростової функції Г. Томазіуса. Для зручності практичного використання її адаптували до шкали М.М. Орлова та виконали перехід від верхньої до середньої висоти. Аргументами моделі середнього діаметра виступають середній вік ($r = 0,89$) і середня висота ($r = 0,94$), тому вона придатна для моделювання будь-якого класу бонітету. Для апроксимації динаміки суми площ перерізів використано видозмінену ростову функцію Л. Берталанффі, де аргументом виступає середня висота насадження. Суттєві відхилення моделі від дослідних даних характерні лише для сосняків на землях лісгосподарського призначення, оскільки їхня відносна повнота становить переважно 0,6-0,8. Тому результати моделювання суми площ поперечних перерізів самосійних насаджень дають підставу стверджувати, що розроблені таблиці продуктивності характеризуватимуть

¹ Блищик Володимир Іванович – кандидат сільськогосподарських наук, доцент. Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна. E-mail: blysh@nubip.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5440-3142>

² Лакида Петро Іванович – академік Лісівничої академії наук України, Перший віце-президент ЛАН України, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач сектору наукового забезпечення ДП «Ліси України», вул. Болсуновська, 6, м. Київ, 01601, Україна. E-mail: petro.lakyda@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3639-2969>

динаміку основних таксаційних показників за повноти 1,0. Моделювання частини деревостану, що вибирається, проводили методом прямої регресії (функцією від віку деревостану) з використанням редуційних чисел. Розроблений комплекс математичних моделей дає змогу з високою точністю оцінювати особливості росту самосійних лісів на землях сільськогосподарського призначення. На основі них опрацьовано таблиці продуктивності для I^d–IV класів бонітету повних (нормальних) насаджень.

Ключові слова: *Pinus sylvestris* L.; динаміка таксаційних показників; клас бонітету; середній діаметр; середня висота; сума площ перерізів; поточний приріст; покинуті сільськогосподарські угіддя; самозалісена ділянка; самовідновлення лісу.

Вступ (Introduction).

Використання моделей росту і продуктивності є важливим інструментом прогнозування майбутніх обсягів лісових ресурсів, впливу лісгосподарських заходів і прийняття ефективних рішень у господарській діяльності підприємств. За останні 30 років на значних площах сільськогосподарських земель без участі людини відновилися природні ліси, особливо на території Полісся (Жежжун, Порохняч, 2025; Крамарець, Попович, Бойко, 2019; Криницький, Заїка, Іваницький, 2013; Лакида, Блищик, 2024). Тому важливо з'ясувати особливості їх росту, оцінити продуктивність і порівняти зі штучно створеними та іншими природними насадженнями.

За допомогою моделей ходу росту можна спрогнозувати динаміку таксаційних показників чи потенційну продуктивність самосійних лісів у певному віковому періоді їхнього розвитку. Цю інформацію можуть використовувати управлінці лісгосподарських підприємств, власники земельних паїв, землевпорядні чи природоохоронні організації для оцінювання потенціалу самосійних лісів, відповідності ведення лісового господарства принципам сталого лісокористування та прийняття обґрунтованих рішень щодо збереження лісів і зміни цільового призначення земельних ділянок. В англomовній літературі використовують термін «моделі росту» (англ. «growth model»), тому тут і надалі вживатиметься саме такий варіант, як синонім поняттю «моделі ходу росту» (Bermejo, Cañellas, & Miguel, 2004; Dong et al., 2021; Socha et al., 2021; Martinez Del Castillo et al., 2022). На думку авторів, цей термін є більш вдалим, упущене слово не несе додаткової змістової інформації, хоча є усталеним для лісотаксаційної науки в Україні.

Найрозповсюдженішим видом нормативно-довідкових даних у країнах Європи є таблиці ходу росту, які характеризують зміну таксаційних показників лісових насаджень з віком. Розробляють їх на основі моделей росту окремих таксаційних ознак (висоти, діаметра, суми площ перерізів тощо) й усталених формул розрахунку інших показників (кількості стовбурів, поточного приросту, загальної продуктивності тощо) (Laar, & Akça, 2007).

Аналіз наукового доробку з моделювання росту соснових насаджень України засвідчує значні напрацювання вчених. Зокрема до них відносяться нормативи, розроблені для штучних соснових деревостанів Українського Полісся (Лакида, Терент'єв, Васишин, 2012); для природних соснових деревостанів Полісся України (Лакида, Алексіюк, 2017); для штучних насаджень сосни звичайної, створених на землях, що вийшли з-під сільськогосподарського використання (Лакида та ін., 2012b); для соснових насаджень України (Дударев, 1960); для штучних насаджень сосни звичайної Полісся України (Петренко, 2002); для молодняків сосни звичайної штучного походження Хмельницької області (Порицький, 1978); для соснових культур у свіжих суборах Полісся та Лісостепу (Савич, 1965); для оптимальних соснових деревостанів (Строчинський, Швиденко, Лакида, 1992); для соснових молодняків штучного походження у пристепових борах (Старостенко, 1967); для культур сосни звичайної на староорних землях Полісся (Стопкань, 1962); для соснових насаджень західної частини України (Тищук, 1956).

В європейських країнах також опубліковано багато таблиць продуктивності для соснових насаджень, зокрема Болгарії (Krastanov, Beljakov, & Schikov, 1976), Чехії (Černý, Parez, & Malik, 1996), Фінляндії (Koivisto, 1959), Німеччини (Schober, 1975), Греції (Gatzojannis, 1997), Угорщини (Solymos, 1971), Норвегії (Bauger, 1995), Румунії (Giurgiu, Decei, & Armasescu, 1972), Іспанії (Garcia Abejon, & Gomez Loranca, 1984), Швеції (Andersson, 1963), Туреччині (Batti, 1971) тощо.

Наявність такої кількості таблиць продуктивності деревостанів сосни звичайної не усуває необхідності у дослідженнях самосійних лісів на сільськогосподарських землях Українського Полісся, які переважно є високопродуктивними, з високою відносною повнотою та ростуть за I^a і вищими класами бонітету (Лакида, Блищик, 2024; Самосійні ліси депонують..., 2024). Актуальним питанням є розроблення математичних моделей росту та продуктивності, щоб з'ясувати особливості росту цих природних насаджень на перелогах і надалі враховувати цей аспект у програмах повоєнної відбудови України, господарській діяльності

лісогосподарських підприємств та обліку лісових ресурсів.

Мета роботи – дослідити динаміку таксаційних показників і розробити таблиці росту соснових лісів на самозалісених ділянках Українського Полісся.

Об'єкти і методика дослідження (Objects and methods).

Методологічними основами моделювання росту деревостанів є системний підхід, комплексний аналіз, а також принцип раціональності для цілеспрямованого та узагальненого відтворення в практичній формі істотних і закономірних властивостей, зв'язків і тенденцій, притаманних лісовим екосистемам (Білоус, 2021).

Об'єктом дослідження є процеси росту соснових лісів, які природним шляхом (без втручання людини і господарських заходів) з'явилися на сільськогосподарських землях в Українському Поліссі. *Предмет дослідження* – закономірності динаміки таксаційних показників у самосійних соснових лісах.

Таблиці ходу росту є зрозумілою формою представлення аналітичної інформації про ріст деревостанів. Особливо вони важливі для практиків, фахівців, які працюють у лісовій галузі. Проте для науковців більшу цінність мають аналітична й графічна інтерпретації моделей росту. У той же час у працях зарубіжних дослідників відсутній термін «таблиці ходу росту», натомість використовують аналог за змістовим наповненням «таблиці продуктивності» (англ. «yield tables») (Assmann, 1970; Matthews et al., 2016), що, на думку авторів, є вдалішим поняттям для узагальнення переліку показників цих таблиць. Тому надалі ці терміни

вважатимемо синонімами.

Таблиці ходу росту за призначенням поділяють на нормальні (повні), модальні (найрозповсюдженіших деревостанів у природі) та оптимальні (цільові). Самосійні соснові ліси на сільськогосподарських землях ростуть без втручання людини і спеціалізованих лісогосподарських заходів. Оскільки вибірку модельних дерев здійснювали переважно у високоповнотних і високопродуктивних деревостанах, розроблені таблиці продуктивності відносимо до «повних». Проте польові дослідження свідчать, що частина цих лісів мають низьку зімкнутість, особливо у віці до 10 років (рис. 1).

Від створення перших таблиць ходу росту і до сьогодні між дослідниками відбувається наукова дискусія щодо класифікаційної одиниці, яку варто застосовувати для групування дослідних даних про ріст деревостанів. На сьогодні найчастіше нею є клас бонітету, рідше – тип лісу. Вибір класу бонітету для групування дослідних даних соснових самосійних деревостанів є оптимальним, оскільки використання типу лісу має певні обмеження. Досить часто на самозалісених ділянках ще не сформувалося лісове середовище, а на галявинах розвивається рясне трав'яне вкриття із лучної рослинності (Криницький та ін., 2023; Блищик, Чурілов, Гончаренко, 2024). Така ситуація ускладнює і без того не простий процес визначення типу лісу. Поряд з цим, у разі спрощеного лісовпорядкування для приватних власників має бути зрозумілим і простим процес оцінювання продуктивності самосійних лісів, оскільки значна частина самозалісених земель є розпайованою.



Рис. 1. Самосійний сосновий ліс різної відносної повноти на сільськогосподарських землях
Fig. 1. Naturally regrown pine forest of varying relative density in agricultural lands

Як вихідні дані для моделювання основних таксаційних показників було використано матеріалами як власних пробних площ (23 шт.), закладених у самосійних лісах п'яти областей Українського Полісся (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська та Чернігівська), так і матеріали бази даних кафедри таксації лісу та лісового менеджменту НУБіП України (159 шт.), закладених у природних деревостанах цього ж регіону. У базі даних ВО «Укрдержліспроект» (Довідник з лісового фонду..., 2012) відсутня повидільна таксаційна характеристика самосійних лісів, що унеможливило її використання для моделювання росту цих насаджень. Однак цей аспект не має істотного значення, адже, на відміну від повидільної бази даних, дані пробних площ відзначаються більшою повнотою і точністю.

Первинними таксаційними показниками моделювання таблиць росту соснових деревостанів на самозалісених ділянках Українського Полісся були такі: верхня (H_B) та середня (H) висоти, середній діаметр (D), сума площ поперечних перерізів (G), видова висота (H^B), середній діаметр (D^B) і висота (H^B) частини деревостану, що вибирається. Інші таксаційні показники обчислювали за загальноприйнятою методикою (Строчинський, Швиденко, Лакида, 1992; Цурик, 2008). Точність та адекватність розроблених математичних моделей перевіряли з використанням статистичних критеріїв (коефіцієнта детермінації – R^2 , аналізу розподілу залишків). При цьому параметри моделей таксаційних показників встановлювали за допомогою регресійних залежностей.

Отже, моделювання росту й продуктивності самосійних лісів буде здійснено з позицій системного підходу. Використовуючи дослідні дані, зібрані під час польових робіт, буде здійснено розроблення математичних моделей ходу росту, які відображатимуть динаміку середніх таксаційних показників самосійних лісів на землях сільськогосподарського призначення Українського Полісся. На основі цих моделей буде запропоновано відповідні нормативно-довідкові матеріали, відомі як таблиці продуктивності (ходу росту).

Результати (Results).

Моделювання динаміки таксаційних показників деревостану розпочали з верхньої висоти, яка відображає ріст найбільших за рангом по діаметру (найтовстіших) дерев.

Для отримання кривої-гйд за верхньою висотою соснових деревостанів природного походження на перелогах Українського Полісся проведено аналіз росту 24 модельних дерев, зрубаних на пробних площах, які займають найвищі ранги за діаметрами. Але оскільки дослідні дані обмежуються віком 18 років, виникла необхідність додати до них результати обміру трьох

модельних дерев природних деревостанів із бази даних кафедри таксації лісу та лісового менеджменту НУБіП України. Критерієм відбору була найвища енергія росту у висоту модельних дерев, яка найбільше відповідає тренду росту самосійних соснових лісів.

Використовуючи ростову функцію Г. Томазіуса (Кивисте, 1988), отримано модель кривої-гйд (1) у відносних одиницях, яка достовірно відображає закономірності зміни експериментальних даних:

$$H_B = 7,3321 \cdot (1 - \exp(-0,07157 \cdot A \cdot (1 - \exp(-0,003938 \cdot A))))^{0,5613}, \quad (1)$$

де H_B – верхня висота деревостану у відносних одиницях; A – вік деревостану, років.

Для переходу до абсолютних висот поділили перший коефіцієнт моделі 1 на 6,923 (відносна висота у віці 100 років), а для суміщення її зі шкалою М.М. Орлова (Білоус та ін., 2021) використали базову висоту верхньої границі класу бонітету насінних деревостанів у віці 100 років ($H_{баз}^{100}$): I^a – 45,9; I^c – 42,1; I^b – 38,3; I^a – 34,5; I – 30,7; II – 26,8; III – 23,0; IV – 19,2; V – 15,4; V^a – 11,6 м.

Модель 1 з урахуванням базової висоти верхньої межі класу бонітету набуде виду:

$$H_B = (1,05916 \cdot (1 - \exp(-0,07157 \cdot A \cdot (1 - \exp(-0,003938 \cdot A))))^{0,5613}) \cdot H_{баз}^{100}. \quad (2)$$

Зважаючи на те, що у виробничій діяльності лісогосподарських підприємств чи під час лісовпорядкування верхню висоту практично не застосовують, тому виконано перехід від верхньої висоти до середньої за допомогою наступного рівняння:

$$H = H_B^{1,06876} \cdot 0,9471 \cdot A^{-0,05499}. \quad (3)$$

Кореляція між верхньою і середньою висотами є майже лінійною (Горошко та ін., 2004), тому частка пояснення дисперсії експериментальних даних моделлю становить $R^2 = 1,0$. Аналіз залишків рівняння показав їх рівномірне розміщення, а отримана модель повноцінно відобразила закономірності експериментальних даних. Отримані коефіцієнти рівняння було перевірено на їх статистичну значущість.

Наступним таксаційним показником, що підлягав моделюванню, був середній діаметр. Кореляційний аналіз підтвердив високу ступінь зв'язку середнього діаметра із середньою висотою ($r = 0,94$) і віком ($r = 0,89$). Оскільки жодні спеціалізовані лісогосподарські заходи у самосійних соснових лісах не проводилися, а відбуваються лише природні процеси зріджування, можемо припустити, що відносна повнота не впливає на значення середнього діаметра. Кореляційний аналіз показує відсутність істотного впливу

відносної повноти на величину середнього діаметра ($r = -0,21$), а залежністю є оберненою.

Математичну модель середнього діаметра розробили на основі даних 159 пробних площ, 23 з яких закладено у самосійних лісах. Використано масив даних природних насаджень Українського Полісся (Лакида, & Алексіюк, 2017), який містить незначну кількість пробних площ (2 шт.) молодого віку (I–II класи віку). Також з нього були виключені низькопродуктивні насадження (IV і нижчі класи бонітету), оскільки наразі такі не трапляються на самозалісених землях Полісся.

Моделювання процесу дало змогу отримати рівняння, яке характеризується високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,87$):

$$D = (1,15406 + 1,35446 \cdot \exp(-6,8986 \cdot A)) \cdot H. \quad (4)$$

Одним із аргументів моделі 4 виступає середня висота, а отже вона придатна для моделювання середнього діаметра будь-якого класу

бонітету. Представлене графічне порівняння експериментальних значень зі змодельованими підтверджує високу точність опису дослідних даних цим рівнянням (рис. 2).

Для апроксимації динаміки суми площ перерізів (G) було випробувано багато ростових функцій з різними залежностями та факторами впливу (Кивисте, 1988). Найприйнятніші результати забезпечила ростова функція Л. Берталанффі, але дещо видозмінена. Зазвичай під час застосування ростових функцій, як незалежну змінну використовують вік насаджень (Лакида, Терентьев, Василишин, 2012). Проте низькою досліджень (Лакида та ін., 2012а; Лакида та ін., 2012b; Строчинський та ін., 1992) підтверджено, що значущий вплив на величину суми площ поперечних перерізів має саме висота деревостану. Оскільки аргументом виступає середня висота, немає необхідності здійснювати поділ насаджень за класами бонітету.

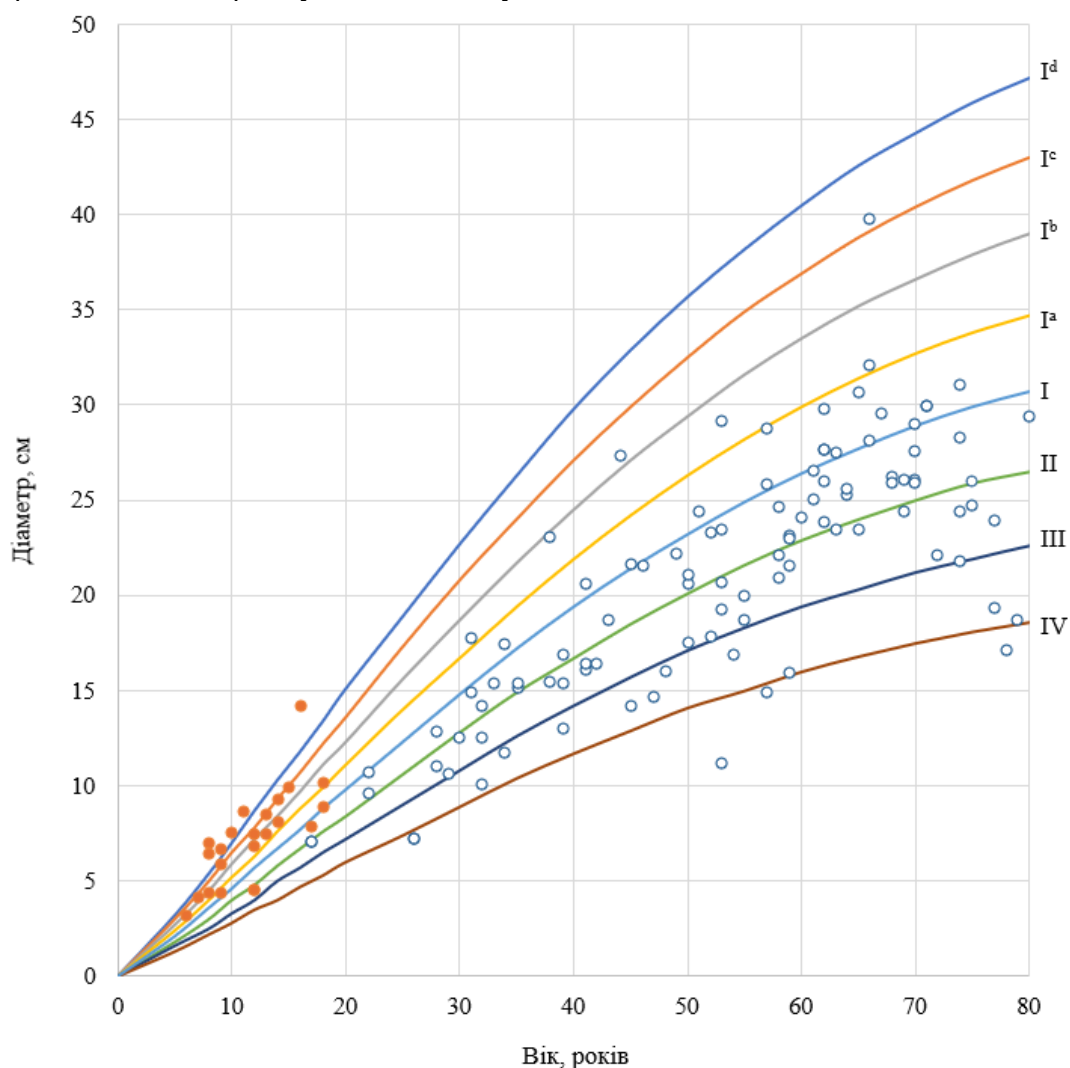


Рис. 2. Порівняння фактичних значень середнього діаметра за даними пробних площ (оранжеві кола – самосійні ліси, сині – природні сосняки) з їх змодельованими значеннями за класами бонітету для самосійних соснових лісів

Fig. 2. A comparison of actual mean diameter values based on sample plot data (orange circles – regrowth forests on former agricultural areas, blue circles – natural pine standson forest lands) with their predicted values by site index for self-seeded pine forests

Вихідними даними для розроблення моделі G були результати обмірів на 19 пробних площах у самосійних соснових лісах на сільськогосподарських землях, а також на 63 пробах, закладених у природних насадженнях, але з подібною зміною досліджуваного показника. Математична модель, яка описує динаміку суми площ поперечних перерізів самосійних соснових лісів, має такий вид:

$$G = 41,0945 \cdot (1 - \exp \cdot (-0,248 \cdot H) - (1 - \exp \cdot (0,00321 \cdot H)))^{2,2582}. \quad (5)$$

З метою унаочнення результатів моделювання G , фактичні значення нанесли на змодельовані криві цього показника для самосійних соснових лісів Українського Полісся (рис. 3).

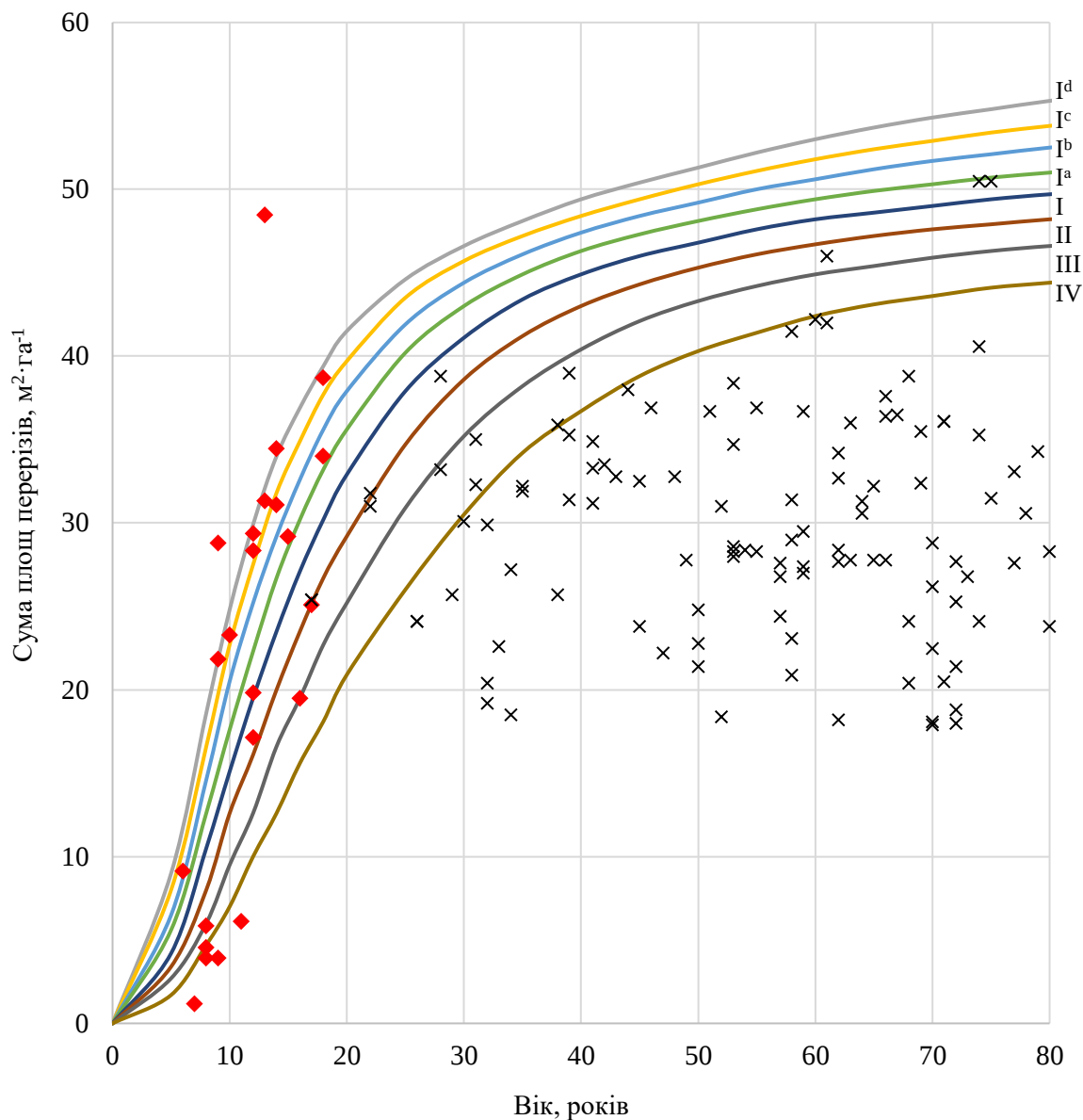


Рис. 3. Порівняння фактичних значень сум площ поперечних перерізів за даними пробних площ з їх змодельованими значеннями за класами бонітету

Fig. 3. A comparison between the observed basal area values based on sample plot data and the predicted values by site index classes

Окрім суми площ поперечних перерізів (абсолютної повноти), ще одним показником, який має важливе значення, є видове число (F). Зазвичай під час розробки таблиць продуктивності (Лакида та ін., 2012а; Лакида, Терентьев, Васишин, 2012) моделюють спочатку запас деревостану, а видове число розраховують за допомогою формули (Білоус та ін., 2021). Однак на по-

казник запасу впливає дуже багато факторів, тому доцільніше здійснити моделювання видової висоти. Вона має меншу мінливість, а також давно відома її стійка лінійна залежність від середньої висоти деревостану.

Вирівнювання динаміки видових висот може здійснюватися з використанням різних багатоваріантних залежностей, де аргументами можуть

бути середній вік, діаметр чи висота. Але найчастіше в процесі моделювання застосовують рівняння прямої, що описує залежність видової висоти від середньої висоти деревостану (Цурик, 2008). Отримана модель видових висот самосійних соснових лісів Українського Полісся набуває виду:

$$HF = 1,7775 + 0,3873 \cdot H. \quad (6)$$

Аналіз даних табл. 1 дає підставу стверджувати, що обидва коефіцієнти рівняння є значущими на 5%-му рівні, тобто модель можна вважати адекватною з високим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,96$).

Таблиця 1. Біометрична характеристика коефіцієнтів моделі видової висоти
Table 1. Biometric characteristics of the coefficients of the height form factor model

Коефіцієнт	Значення коефіцієнта	Стандартна похибка	t-критерій Стюдента	Нижня границя значення коефіцієнта	Верхня границя значення коефіцієнта
<i>a</i>	1,7775	0,107	16,7	1,567	1,988
<i>b</i>	0,3873	0,005	71,2	0,377	0,398

Графічна інтерпретація також підтверджує, що розроблена модель адекватна вихідним даним і досить добре описує видові числа за даними

закладених пробних площ як у самосійних, так і в природних лісах регіону (рис. 4).

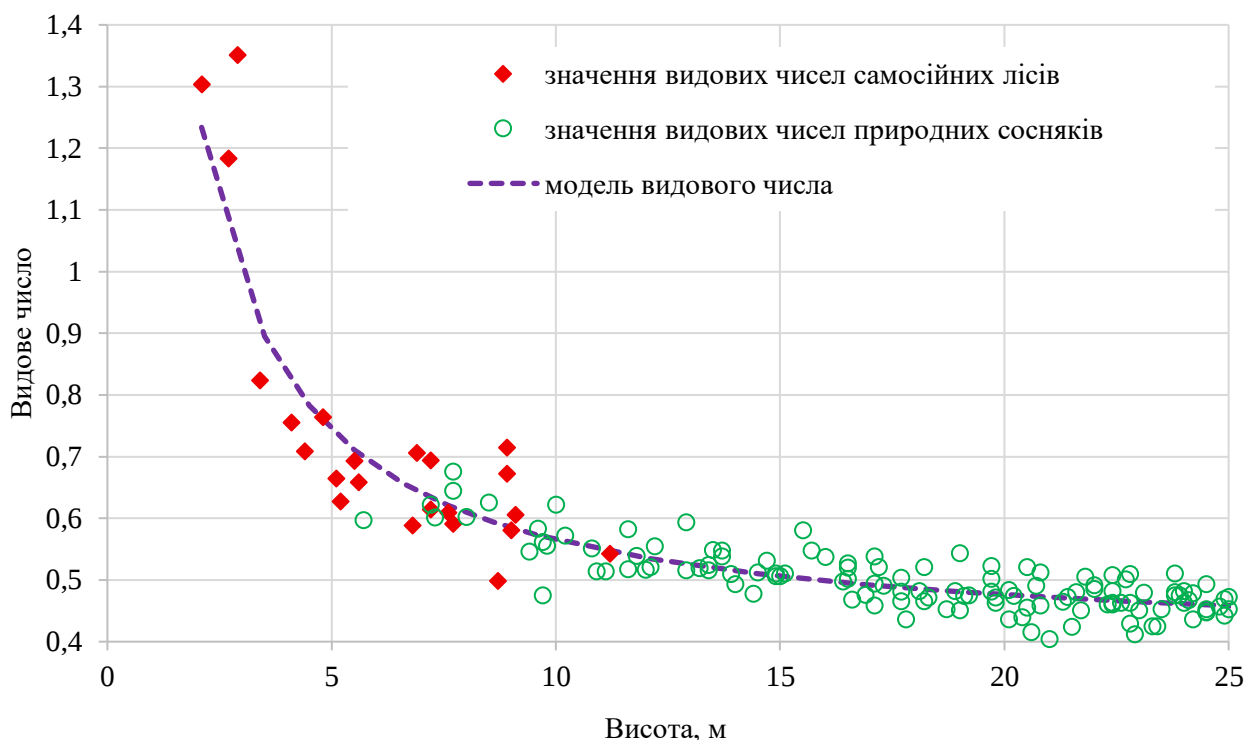


Рис. 4. Порівняння моделі видового числа із даними пробних площ
Fig. 4. A comparison between the form factor model and the observed data from sample plots

Інші показники ростучої частини деревостану у тому чи іншому віці визначали за відомими у лісовій таксації формулами:

– запас деревостану (M): $M = G \cdot H \cdot F$; (7)

– кількість стовбурів (N) на 1 га:

$$N = \frac{40000 \cdot G}{\pi \cdot D^2}; \quad (8)$$

– середню зміну запасу (Δ^{cp}):

$$\Delta^{cp} = \frac{M}{A}; \quad (9)$$

– поточна зміна запасу ($\Delta^{пт}$): $\Delta^{пт} = \frac{M_A - M_{A-10}}{n}, \quad (10)$

де M_A – запас деревостану у віці A , м³; M_{A-10} – запас деревостану 10 років тому (у віці $A-10$), м³.

Таблиці продуктивності ростучого у певному віці повного (нормального) соснового деревостану на самозалісених землях розроблено для I^d–IV класів бонітету, а їхній фрагмент для найпоширенішого I^b класу бонітету (43% від усієї кількості проб) наведено в табл. 2.

Також у таблицях продуктивності (ходу росту) повних (нормальних) насаджень повинна міститися інформація щодо тієї частини деревостану, яка

вибирається. Тому існує необхідність щодо розроблення моделей динаміки таксаційних показників частини деревостану, яку вибирають

під час проведення господарських заходів, чи внаслідок природного відпаду дерев при самозріджуванні насаджень.

Таблиця 2. Ріст повного соснового деревостану за основними таксаційними показниками на самозалісених землях Українського Полісся (І^б клас бонітету)

Table 2. Growth of the fully stocked pine stand by main stand attributes on self-seeded areas of the Ukrainian Polissia (site class I^b)

Вік, років	Деревостан							зміна запасу, м ³ ·га ⁻¹	
	середня висота, м	середній діаметр, см	кількість стовбурів, шт.·га ⁻¹	сума площ поперечних перерізів, м ² ·га ⁻¹	видове число	запас, м ³ ·га ⁻¹		середня	поточна
5	2,3	2,7	11752	6,5	1,159	17	3,5	–	
10	5,0	5,8	7604	20,1	0,741	75	7,5	7,5	
15	7,9	9,1	4791	31,1	0,613	150	10,0	13,3	
20	10,7	12,4	3148	37,9	0,553	225	11,3	15,0	
25	13,5	15,6	2189	42,0	0,519	295	11,8	14,5	
30	16,2	18,7	1611	44,5	0,497	359	12,0	13,4	
35	18,8	21,7	1246	46,2	0,482	418	12,0	12,4	
40	21,2	24,5	1006	47,4	0,471	474	11,8	11,5	
45	23,5	27,1	841	48,4	0,463	526	11,7	10,7	
50	25,5	29,4	724	49,2	0,457	574	11,5	10,0	
55	27,3	31,5	639	50,0	0,452	618	11,2	9,2	
60	29,0	33,4	576	50,6	0,449	658	11,0	8,4	
65	30,4	35,1	528	51,2	0,446	694	10,7	7,6	
70	31,7	36,6	491	51,7	0,443	726	10,4	6,8	
75	32,8	37,9	463	52,1	0,442	754	10,1	6,0	
80	33,7	38,9	440	52,4	0,440	779	9,7	5,2	

Моделювання частини деревостану, що вибирається, проводили на основі дослідних даних, зібраних під час суцільного переліку дерев на пробних площах у самосійних соснових деревостанах на землях сільськогосподарського призначення. Для цього окремо виділяли ту частину, яку належить вибрати з деревостану, а потім обчислили значення середньої висоти і середнього діаметра. Використовуючи ці показники, визначили редуційне число частини, що вибирається (R_x), за формулою:

$$R_x = \frac{\bar{x}_B}{\bar{x}}, \quad (11)$$

де $\bar{x}_B$ – середнє значення таксаційного показника частини, що вибирається; $\bar{x}$ – середнє значення таксаційного показника деревостану в цілому.

Для моделювання редуційних чисел було апробовано різні аналітичні вирази. Використовуючи метод прямої регресії (функцію від віку деревостану) було отримано моделі редуційних чисел середніх висоти (12) і діаметра (13):

$$R_H = 0,8577 + 0,000694 \cdot A^{1,0215}, \quad (12)$$

$$R_D = 0,6757 + 0,000254 \cdot A^{1,4363}, \quad (13)$$

де R_H – редуційне число середньої висоти; R_D – редуційне число середнього діаметра.

Величина коефіцієнтів детермінації моделей 12 і 13 становить, відповідно, 0,52 і 0,63. Проаналізувавши залишки цих моделей, можна стверджувати, що їхня дисперсія постійна і фактично не зростає, відхилення від рівняння регресії не мають систематичного характеру. Отже, розроблені моделі адекватні та придатні для побудови таблиць продуктивності частини деревостану, що вибирається. Середню висоту (H_B) та середній діаметр (D_B) частини, що вибирається, знаходили за формулами:

$$H_B = H \cdot R_H, \quad (14)$$

$$D_B = D \cdot R_D. \quad (15)$$

Запас частини, що вибирається (m_B), визначали за формулою:

$$m_B = \frac{\pi}{40000} \cdot D_B^2 \cdot N_B \cdot H_B \cdot \left(\frac{1,7775 + 0,3873 \cdot H_B}{H_B} \right). \quad (16)$$

Варто зауважити, що у формулі 16 для обчислення видового числа частини деревостану, яка вибирається, використовували відповідно середню висоту (H^B) цієї частини та модель 6.

Інші таксаційні показники частини, що вибирається, визначали за загальновідомими формулами:

кількість дерев на 1 га частини, що вибирається (N_B):

$$N_B = N_A - N_{A+10}, \quad (17)$$

де N_A – загальна кількість дерев на 1 га деревостану у віці A років, шт.·га⁻¹; N_{A+10} – загальна кількість дерев на 1 га деревостану у віці $A+10$ років, шт.·га⁻¹;

сума запасів частини деревостану, що вибирається в певному віці ($\sum m_A^B$):

$$\sum m_A^B = m_A^B + \sum m_{A-10}^B, \quad (18)$$

де m_A^B – запас, що вибирається із насадження зараз, м³; $\sum m_{A-10}^B$ – сума запасів частини деревостану, що вибирається 10 років тому, м³.

Завершальним етапом розроблення таблиць продуктивності (табл. 3) є обчислення загальної продуктивності (W_A), загального середнього (Z_A^{cp}) та поточного ($Z_A^{пт}$) приростів деревостану:

$$W_A = M_A + \sum m_{A-10}^B, \quad (19)$$

$$Z_A^{cp} = \frac{W_A}{A}, \quad (20)$$

$$Z_A^{пт} = \frac{W_A - W_{A-10}}{10}, \quad (21)$$

де W_{A-10} – загальна продуктивність 10 років тому (у віці $A-10$), м³·га⁻¹.

Таблиця 3. Динаміка таксаційних показників повного соснового деревостану на самозалісених землях Українського Полісся (зокрема, й тієї частини, що вибирається) I^b класу бонітету

Table 3. Dynamics of stand attributes of the fully stocked pine stand on self-seeded areas of Ukrainian Polissia (including the removed part of stand due to thinning) of site index I^b

Вік, років	Частина деревостану, що вибирається					Загальна продуктивність, м ³ ·га ⁻¹	Загальний приріст, м ³ ·га ⁻¹	
	середня висота, м	середній діаметр, см	кількість стовбурів, шт.·га ⁻¹	запас, м ³ ·га ⁻¹	сума запасів, м ³ ·га ⁻¹		середній	поточний
5	2,0	1,8	–	–	–	17	3,5	–
10	4,4	4,0	4457	19	19	75	7,5	7,5
15	6,8	6,3	2602	35	35	150	10,0	13,3
20	9,4	8,6	1536	48	67	244	12,2	16,9
25	11,9	11,0	943	57	92	330	13,2	18,0
30	14,3	13,3	605	62	129	426	14,2	18,2
35	16,6	15,6	405	64	156	511	14,6	18,0
40	18,8	17,8	281	64	192	603	15,1	17,6
45	20,9	19,9	202	62	218	681	15,1	17,1
50	22,8	21,9	148	60	252	766	15,3	16,3
55	24,6	23,8	111	56	274	836	15,2	15,4
60	26,2	25,6	85	52	304	910	15,2	14,4
65	27,6	27,3	65	48	322	968	14,9	13,2
70	28,9	28,9	51	43	347	1030	14,7	12,0
75	30,0	30,3	40	39	360	1076	14,3	10,8
80	31,0	31,7	31	34	381	1126	14,1	9,6

Табличне представлення моделей 14–21 (див. табл. 3) для I^b класу бонітету є продовженням попередньої табл. 2. Дані характеризують динаміку загальної продуктивності, загального середнього та

поточного приросту (рис. 5), а також таксаційних показників тієї частини повного соснового деревостану на самозалісених землях, що може вибиратися під час проведення доглядових рубань.

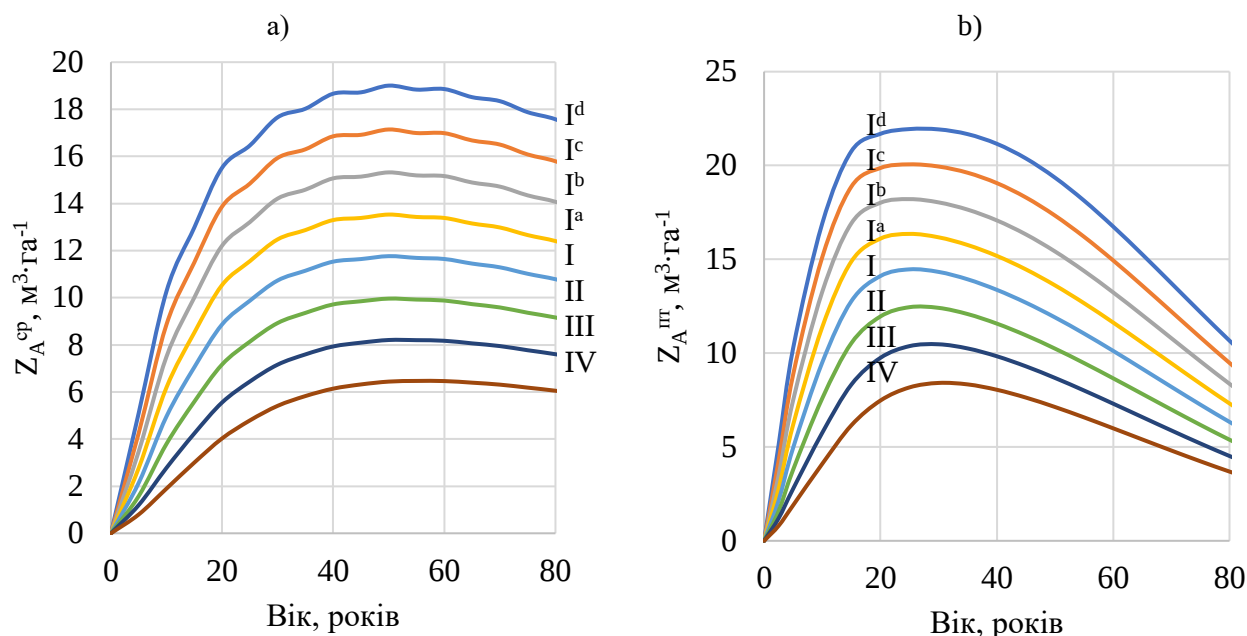


Рис. 5. Динаміка загального середнього (а) та поточного (б) приростів
 Fig. 5. Dynamics of total mean (a) and current (b) annual increment

Дискусія (Discussion).

Енергія росту у висоту самосійних лісів, особливо у молодому віці, значно перевищує таку ж у соснових штучних і природних лісах. Наприклад, у віці 10 років різниця може складати більше 30% для природних і понад 20% – для штучних деревостанів (Лакида, Блищик, 2024). Однак аналіз подальшої динаміки росту свідчить про поступове зменшення різниці за висотою порівняно зі штучними сосновими деревостанами (Лакида, Терентьєв, Васишин, 2012). Проте з природними сосняками (Лакида, Алексіюк, 2017) відхилення за висотою значуще й після 50 років і складає понад 10%. З підвищенням класу бонітету ця різниця стає істотною.

Порівняння росту за діаметром самосійних лісів з іншими сосновими деревостанами Українського Полісся дає змогу встановити певні тенденції (рис. 6). Так, у молодому віці (до 20 років) середній діаметр досліджуваних деревостанів перевищує такий у природних (Лакида, Алексіюк, 2017) та штучних модальних (Лакида, Терентьєв, Васишин, 2012) на понад 30%. Стосовно штучних сосняків ця тенденція зберігається впродовж усього вікового проміжку, проте середній діаметр природних модальних деревостанів поступово наближається до такого у самосійних, а у 80 років вже є

більшим на 2%. Зі штучними оптимальними (Строчинський та ін., 1992), природними повними (Білоус та ін.,) та штучними модальними деревостанами на староорних землях (Лакида та ін., 2012b) різниця за діаметром у молодому віці є меншою та складає близько 20%. У віці стиглості (після 80 років) ріст за діаметром самосійних і повних соснових насаджень природного походження стає подібним.

Відхилення змодельованих величин абсолютної повноти (модель 5) від реальних даних (пробних площ) спостережено лише для природних насаджень (позначки «×» на рис. 3). Зважаючи, що переважна більшість пробних площ, закладених у соснових природних деревостанах, мають відносну повноту 0,6-0,8, то очевидно, що змодельовані значення сум площ поперечних перерізів будуть вищими. У той же час фактичні значення цього показника у самосійних соснових лісів (позначки «◇» на рис. 3) знаходяться у інтервалі кривих I^d–IV класів бонітету. Причина, насамперед, полягає у відсутності в них рубок догляду й інших лісгосподарських заходів. Відбуваються лише природні процеси зрідження насаджень, але вони не призводять до суттєвого зниження відносної повноти, оскільки на 15 пробних площах з 23 вона перевищує 1,0.

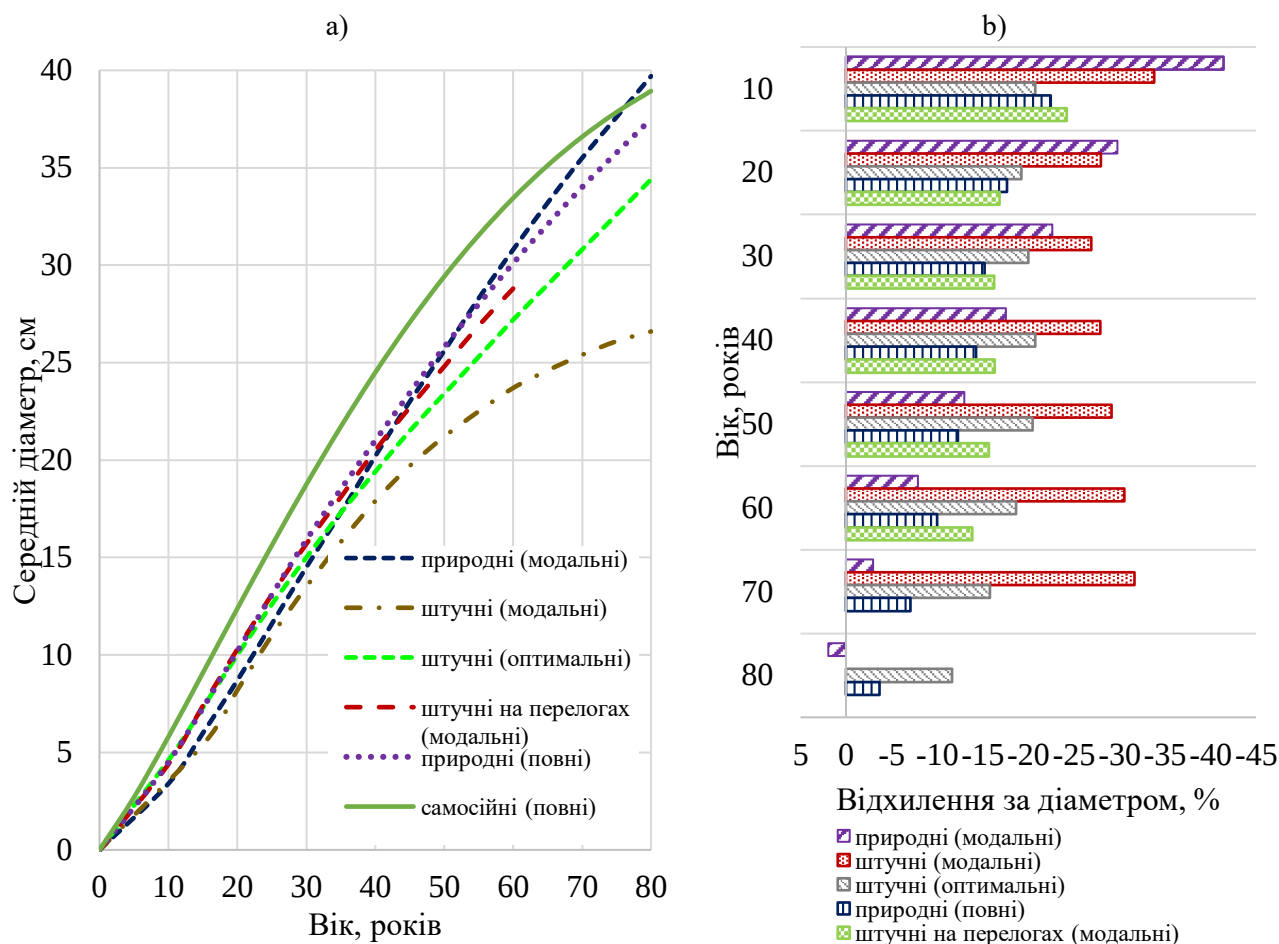


Рис. 6. Динаміка середнього діаметра різних соснових насаджень I^b класу бонітету (а) та відносні відхилення його значень щодо самосійних лісів (б)

Fig. 6. Dynamics of the mean diameter of various pine forests of site index I^b (a) and relative deviations of its values with respect to self-seeded forests (b)

Зазначені раніше особливості самосійних соснових лісів, а також результати моделювання суми площ поперечних перерізів, які близькі не до модальних (найпоширеніших) (Лакида, Терентьєв, Василюшин, 2012; Лакида, Алексіюк, 2017), а до повних (нормальних) чи оптимальних (Білоус та ін., 2021; Строчинський та ін., 1992) соснових насаджень, дають підставу стверджувати, що розроблені таблиці росту характеризуватимуть динаміку основних таксаційних показників соснових насаджень на землях сільськогосподарського призначення за повноти 1,0.

Максимум загального середнього приросту самосійних соснових насаджень настає у віці 50–70 років залежно від класу бонітету (див. табл. 3, рис. 5). Наприклад, за I^b класу бонітету його максимум у самосійних лісах настає у 50 років, у природних (Лакида, Алексіюк, 2017) – в 60–75, у штучних (Лакида, Терентьєв, Василюшин, 2012) – в 40 років. В той же час у IV класі бонітету загальний середній приріст максимального значення набуває у самосійних, природних і штучних соснових насаджень відповідно у 55–60, 55–85 і 60–70 років.

Запас насадження та його продуктивність є інтегральними показниками, які характеризують стан деревостану або результати ведення господарської діяльності в ньому. Аналізуючи ці показники соснових насаджень Українського Полісся за різними таблицями ходу росту, стає очевидно, що до віку стиглості самосійні ліси на сільськогосподарських землях (за умови їх збереження і сталого лісокористування) можуть досягати продуктивності повних природних насаджень (рис. 7). У молодому віці їхній запас є на 30–50% більшим порівняно з іншими сосновими насадженнями. Починаючи з 35-річного віку, загальна продуктивність штучних модальних деревостанів на староорних землях характеризується високими значеннями. Імовірною причиною цього явища є обмежений віковий діапазон дослідних даних. Автори таблиць ходу росту (Лакида та ін., 2012b) зазначали, що середній вік представлених у таблицях насаджень становить 42 роки.

Основою розроблених нормативів є нові дослідні дані, зібрані у 2019–2023 роках. Отже, дослідний матеріал отримано в умовах кліматичних змін, які впливають на закономірності

росту та розвитку лісових екосистем. Надалі отримані дослідні дані можна використовувати

для оцінювання не лише сировинних, але й екосистемних функції самосійних лісів.

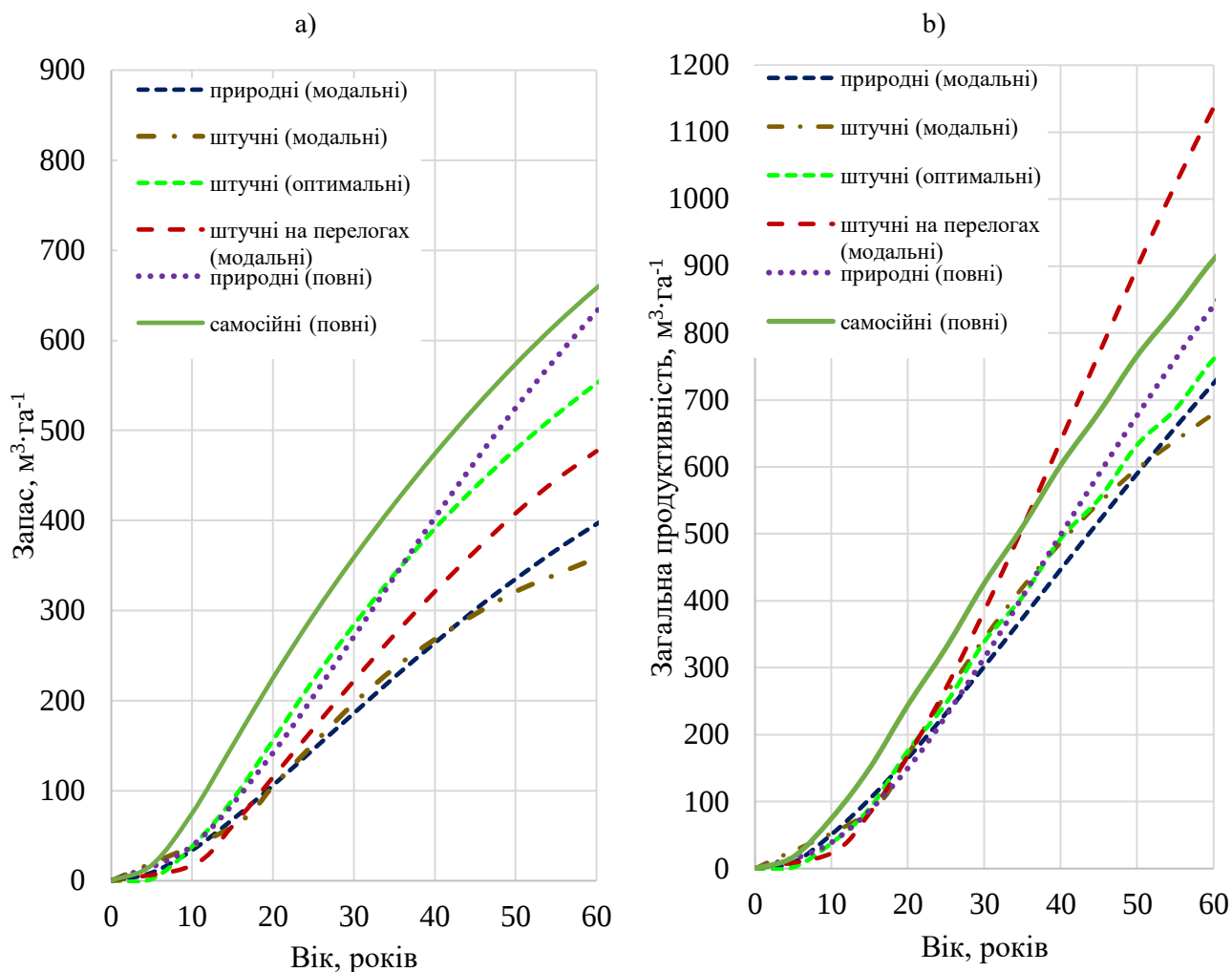


Рис. 7. Динаміка запасу (а) та загальної продуктивності (б) соснових насаджень I^b класу бонітету
Fig. 7. Dynamics of growing stock volume (a) and gross productivity (b) of various pine forests of site index I^b

Висновки (Conclusions).

1. Самосійні соснові ліси на землях сільськогосподарського призначення відрізняються за таксаційними характеристиками від природних і штучних, що належать до лісового фонду. У зв'язку з цим, виникла потреба розробки окремих нормативів для їхнього обліку у формі таблиць ходу росту чи продуктивності.

2. Модель верхньої висоти надає змогу опрацювати динамічну бонітетну шкалу самосійних соснових лісів, яка відображає ріст деревостанів у висоту за різними класами бонітету. Аналіз результатів моделювання суми площ поперечних перерізів підтвердив припущення, що розроблені таблиці продуктивності відносяться до повних (нормальних) та характеризують динаміку основних таксаційних показників соснових насаджень на землях сільськогосподарського призначення за повноти 1,0.

3. Одержані моделі динаміки таксаційних показників самосійних соснових деревостанів Українського Полісся (верхньої та середньої висоти, середнього діаметра, суми площ поперечних перерізів, видової висоти, середніх діаметра і висоти частини деревостану, що вибирається) є достатньою основою для розроблення повних (нормальних) таблиць продуктивності цих насаджень I^d–IV класів бонітету з поділом на весь деревостан і його частину, що вибирається, під час проведення рубок формування й оздоровлення лісів.

4. Максимум поточного приросту у самосійних, природних і штучних соснових насадженнях настає відповідно у 30-50, 35-50 і 20-50 років залежно від класу бонітету. Найменшу відмінність між загальним середнім і поточним приростами самосійних соснових деревостанів спостережено у віці 55-65 років, тобто саме у цьому віці настає кількісна стиглість насаджень.

5. Моделі росту можуть бути корисними не лише для прогнозу динаміки таксаційних показників і потенційної продуктивності самосійних лісів у певному віковому періоді. Їх також можуть використати керівники лісгосподарських підприємств, власники земельних паїв, фахівці землепорядних чи природоохоронних організацій для оцінювання потенціалу самозалісених ділянок чи їх прибутковості, проєктування багатоцільового ведення лісового господарства та прийняття обґрунтованих рішень щодо зміни цільового призначення цих ділянок і збереження лісів.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на результати, представлені у цій статті.

Список літератури (References)

- Andersson, S. O. (1963). Yield tables for plantations of Scots pine in northern Sweden. *Meddelanden från Statens skogsforskningsinstitut*, 51(3), 337. https://pub.epsilon.slu.se/10049/1/medd_statens_skogsforskningsinst_051_03.pdf
- Assmann, E. (1970). *The principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands*. Oxford: Pergamon Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-006658-5.50003-0>
- Batti, F. (1971). *Yield tables and yield potential of Pinus sylvestris in Turkey*. Breisgau: Albert Ludwig Universitaet Freiburg.
- Bauger, E. (1995). *Tree volume functions and tables: Scots pine, Norway spruce and Sitka spruce in Western Norway*. NISK: Rapport fra Skogforsk.
- Bermejo, I., Cañellas, I., & San Miguel, A. (2004). Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189(1–3), 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.07.031>
- Bilous, A. M. (2021). *Biological productivity and ecosystem functions of softwood deciduous forests in Ukrainian Polissya*. Zhytomyr: Buk-Druk. [Білоус, А. М. (2021). *Біопроодуктивність та екосистемні функції м'яколистяних лісів Українського Полісся*. Житомир: Бук-Друк. 814 с.] (in Ukrainian)
- Bilous, A. M., Kashpor, S. M., Myroniuk, V. V., Svinchuk, V. A., & Lesnik, O. M. (2021). *Forest inventory handbook*. Kyiv: "Vinichenko" Publishing House. [Білоус, А. М., Кашпор, С. М., Мironiuk, В. В., Свинчук, В. А., Леснік, О. М. (2021). *Лісотаксаційний довідник*. Київ: Видавничий дім «Вініченко». 424 с.] (in Ukrainian)
- Blyshchuk, V. I., Churilov, A. M., & Goncharenko, I. V. (2024). The impact of ecological factors on natural regrowth of fallow lands in Ukrainian Polissia. In *Current status, problems, prospects and tasks of forest regeneration in anthropocene: Proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical conference* (pp. 16–17). Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u186/tezi_gordienko_100.pdf [Блищик, В. І., Чурилов, А. М., Гончаренко, І. В. (2024). Вплив екологічних факторів на природні процеси заліснення перелогів Українського Полісся. *Сучасний стан, проблеми, перспективи та завдання відтворення лісів в умовах антропогену: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф.* Київ: НУБіП України. 16–17.] (in Ukrainian)
- Černý, M., Pařez, J., & Malík, Z. (1996). *Yield and mensurational tables of the principal tree species of the Czech Republic*. Jílové u Prahy, Czech Republic: Ústav pro výzkum lesních ekosystémů.
- Dong, L., Pukkala, T., Li, F., & Jin, X. (2021). Developing distance-dependent growth models from irregularly measured sample plot data: A case for *Larix olgensis* in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 486, 118965. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118965>
- Dudarev, A. D. (1960). Growth trends, commercial structure, and maturity age of pine stands in USSR. *Scientific Notes of Voronezh Forestry Institute*, XVIII, 73–89. [Дударев, А. Д. (1960). Особенности роста, товарная структура и возраст спелости сосновых насаждений УССР. *Научные записки ВЛТИИ*, XVIII, 73–89.] (in Russian)
- Garcia Abejon, J. L., & Gomez Loranca, J. A. (1984). *Variable density yield table for Pinus sylvestris in central Spain*. Madrid: Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.
- Gatzojannis, S. (1997). Growth and yield of Scots pine stand in Elatia forest. *Geotechnical Scientific Issues*. Greece: Geotechnical Chamber of Greece.
- Giurgiu, V. I., Decei, I., & Armasescu, S. (1972). *The biometry of trees and stands in Rumania: Forest mensuration tables*. Bucharest: Editura Ceres.
- Goroshko, M. P., Myklush, S. I., & Khomyuk, P. G. (2004). *Biometrics*. Lviv: Kamula. [Горошко, М. П., Миклуш, С. І., Хомюк, П. Г. (2004). *Біометрія*. Львів: Камула. 236 с.] (in Ukrainian)
- Handbook of the forest fund of Ukraine (based on the materials of the state forest register of Ukraine as of 01.01.2011)*. (2012). Irpin: State Forest Resources Agency of Ukraine. [Довідник з лісового фонду України (за матеріалами державного обліку лісів України станом на 01.01.2011 р.). (2012). Ірпін: Державне агентство лісових ресурсів України.] (in Ukrainian)
- Kiviste, A. K. (1988). *Forest growth functions*. Tartu: Publishing House of the Estonian Agricultural

- Academy. [Кивисте, А. К. (1988). *Функции роста леса*. Тарту: Издательство Эстонской с.-х. академии.] (in Russian)
- Koivisto, P. (1959). Growth and yield tables. *Communications Instituti Forestalis Fenniae*, 51, 1–44.
- Kramarets, V., Popovich, M., & Bojko, O. (2019). Influence of ecological and biological features of tree species on successions in the forests of the Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 18, 11–20. doi.org/10.15421/411901 [Крамарець, В. О., Попович, М. В., Бойко, О. З. (2019). Вплив еколого-біологічних властивостей деревних порід на сукцесії в лісах Українських Карпат. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 18, 11–20.] (in Ukrainian)
- Krastanov, K. N., Beljakov, P., & Schikov, K. (1976). Growth and yield of *Pinus sylvestris* plantations. *Gorskostopansa Nauka*, 13, 39–50.
- Krynytskyi, H., Korol, M., Lavnyu, V., Kovaleva, V., Kramarets, V., Krynytska, O., & Mahuran, V. (2023). Forestry and ecological features of distribution and improvement of biotic stability of pine forests in the conditions of Lviv region. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 25, 87–97. https://doi.org/10.15421/412306 [Криницький, Г. Т., Король, М. М., Лавний, В. В., Ковальова, В. А., Крамарець, В. О., Криницька, О. Г., Магуран, В. К. (2023). Лісівничо-екологічні особливості поширення та підвищення біотичної стійкості соснових лісостанів в умовах Львівського регіону. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 25, 87–97.] (in Ukrainian)
- Krynytskyi, G., Zaika, V., & Ivanytskyi, R. (2013). Natural afforestation and forest ecological, morphological and physiological features for formation of stands on abandoned agricultural lands of the north-western Podillya. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 11, 41–50. https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/323 [Криницький, Г. Т., Заїка, В. К., Іваницький, Р. С. (2013). Природне заліснення та лісівничо-екологічні і морфофізіологічні особливості формування лісостанів на покинутих сільськогосподарських землях північно-західного Поділля. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 11, 41–50.] (in Ukrainian)
- Laar, A. V., & Akça, A. (2007). *Forest mensuration* (Vol. 13). Dordrecht: Springer Netherlands. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-5991-9
- Lakyda, P. I., & Aleksiiuk, I. L. (2017). *Natural pine stands of Polissya of Ukraine: Prognosis growth and productivity*. Korsun-Shevchenkivskyi: IE Maidachenko I. S. [Лакида, П. І., Алексіук, І. Л. (2017). *Природні соснові деревостани Полісся України: Прогнозування росту та продуктивності*. Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І. С. 138 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P. I., Bilous, A. M., Vasylyshyn, R. D., Matushkevich, L. M., & Makarchuk, Y. I. (2012a). *Bioproductivity and energy potential of soft-leaved stands of Ukrainian Polissia*. Korsun-Shevchenkivskyi: IE Gavryshenko V. M. [Лакида, П. І., Білоус, А. М., Василишин, Р. Д., Матушевич, Л. М., Макаrchук, Я. І. (2012). *Біопродуктивність та енергетичний потенціал м'яколистяних деревостанів Українського Полісся*. Корсунь-Шевченківський: ФОП Гаврищенко В. М. 454 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P., & Blyshchuk, V. (2024). Productivity and ecological functions of naturally regrown pine forests of the Ukrainian Polissia. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 27, 129–138. https://doi.org/10.15421/412420 [Лакида, П., Бличук, В. (2024). Продуктивність та екологічні функції самосійних соснових лісів Українського Полісся. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 27, 129–138.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P. I., Lashchenko, A. G., Makarchuk, Y. I., Rozvod, S. V., Vasylyshyn, R. D., Domashovets, G. S., & Terentiev, A. Yu. (2012b). *Carbon sequestration role of pine stands created on old arable land*. Korsun-Shevchenkivskyi: IE Maidachenko I. S. [Лакида, П. І., Лашченко, А. Г., Макаrchук, Я. І., Розвод, С. В., Василишин, Р. Д., Домашовець, Г. С., Терент'єв, А. Ю. (2012). *Вуглецедепонувальна роль соснових насаджень, створених на староорних землях*. Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І. С. 216 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P. I., Terentiev, A. Yu., & Vasylyshyn, R. D. (2012). *Artificial pine stands of Polissia of Ukraine – prognosis of growth and productivity*. Korsun-Shevchenkivskyi: IE Maidachenko I. S. [Лакида, П. І., Терент'єв, А. Ю., Василишин, Р. Д. (2012). *Штучні соснові деревостани Полісся України – прогноз росту та продуктивності*. Корсунь-Шевченківський: ФОП Майдаченко І. С. 172 с.] (in Ukrainian)
- Martinez Del Castillo, E., Zang, C. S., Buras, A., Hackett-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivol, R., ... De Luis, M. (2022). Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology*, 5(1), 163. https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3
- Matthews, R. W., Jenkins, T. A. R., Mackie, E. D., & Dick, E. C. (2016). *Forest yield: A handbook on forest growth and yield tables for British forestry*. Forestry Commission. https://www.forestresearch.gov.uk/publications/forest-yield-a-handbook-on-forest-growth-and-yield-tables-for-british-forestry/

- The State Specialized Forest Enterprise "Forests of Ukraine". (2024). Naturally regrown forests sequester more carbon than stands of artificial and natural origin: Ukrainian scientists' research. Retrieved from <https://e-forest.gov.ua/samosijni-lisy-deponuiut-vuhletsiu-bilshe-za-shtuchni-i-prirodni-derevostany-doslidzhennia-ukrainskykh-vchenykh/> [Самосійні ліси депонують вуглецю більше за штучні і природні деревостани: дослідження українських вчених. (2024). Державне спеціалізоване господарське підприємство «Ліси України».] (in Ukrainian)
- Petrenko, M. M. (2002). *Dynamics of phytomass and carbon sequestration of artificial pine stands of Ukrainian Polissia* (Doctoral dissertation, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine). [Петренко, М. М. (2002). Динаміка фітомаси та депонованого вуглецю штучних насаджень сосни Полісся України: дис. ... канд. с.-г. наук: 06.03.02. Київ: Національний аграрний університет.] (in Ukrainian)
- Poritskyi, H. A. (1978). Growth of young pine stands of artificial origin in complicated fairly fertile site types of the Izyaslav Forestry Enterprise of Khmelnytskyi region. *Issues of Optimization of Conditions for Growing Forest Stands: Scientific Proceedings of the Ukrainian Agricultural Academy*, 221, 58–62. [Порицкий, Г. А. (1978). Рост молодняков сосны искусственного происхождения в условиях сложных суборей Изяславского лесхоза Хмельницкой области. *Вопросы оптимизации условий выращивания лесных насаждений: науч. тр. УСХА*, 221, 58–62.] (in Russian)
- Savich, Yu. N. (1965). *Peculiarities of growth of pine stands of artificial origin in fresh fairly fertile site types of Polesia and Forest-Steppe* (Abstract of doctoral dissertation, Ukrainian Agricultural Academy, Kyiv, Ukraine). [Савич, Ю. Н. (1965). Особенности роста сосновых культур в свежих суборях Полесья и Лесостепи: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Киев: Украинская сельскохозяйственная академия.] (in Russian)
- Schober, R. (Ed.). (1975). *Yield tables of important tree species*. Frankfurt am Main: Sauerländer. [Schober, R. (Ed.). (1975). *Ertragstafeln wichtiger Baumarten*. Frankfurt am Main, Germany: Sauerländer.] (in German)
- Socha, J., Tyimińska-Czabańska, L., Bronisz, K., Zięba, S., & Hawryło, P. (2021). Regional height growth models for Scots pine in Poland. *Scientific Reports*, 11, 10330. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89826-9>
- Solymos, R. (1971). The yield of *Pinus sylvestris* stands in Hungary. *Erdeszeti-Kutatasok*, 67(1), 203–232.
- Starostenko, V. P. (1967). *The growth of pine young stands of artificial origin in infertile site types steppe of USSR* (Abstract of doctoral dissertation, Ukrainian Agricultural Academy, Kyiv, Ukraine). [Старостенко, В. П. (1967). Ход роста сосновых молодняков искусственного происхождения в пристепных борах УССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Киев: Украинская сельскохозяйственная академия.] (in Russian)
- Stopkan, V. V. (1962). *Pine stands of artificial origin on old arable land of Polesia in USSR* (Abstract of doctoral dissertation, Ukrainian Agricultural Academy, Kyiv, Ukraine). [Стопкань, В. В. (1962). Культуры сосны на старопашотях Полесья УССР: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Киев: Украинская сельскохозяйственная академия.] (in Russian)
- Strochinsky, A. A., Shvidenko, A. Z., & Lakyda, P. I. (1992). *Growth models and productivity of optimal forests*. Kyiv: Ukrainian Agricultural Academy Publishing House. [Строчинский, А. А., Швиденко, А. З., Лакида, П. И. (1992). *Модели роста и продуктивность оптимальных древостоев*. Киев: Изд-во УСХА. 144 с.] (in Russian)
- Tyshchuk, A. A. (1956). *The growth, anatomy and structure by quality classes of pine stands (Results of research in western regions of USSR)* (Abstract of doctoral dissertation, Ukrainian Agricultural Academy, Kyiv, Ukraine). [Тищук, А. А. (1956). Ход роста, строение и сортиментная структура сосновых насаждений (Результаты исследований в западных районах УССР): автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.02. Киев: Украинская сельскохозяйственная академия.] (in Russian)
- Tsuryk, E. I. (2008). *Estimation of stand dynamics*. Lviv: Ukrainian National Forestry University. [Цурик, Є. І. (2008). *Таксація динаміки деревостанів*. Львів: НЛТУ України. 328 с.] (in Ukrainian)
- Zhezhkun, A. M., & Porokhniach, I. V. (2025). Features of the formation of self-seeded Scots pine forests on abandoned agricultural lands in Eastern Polissia and the northeastern part of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Forestry and Forest Melioration*, 147, 3–17. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.147.2025.3> [Жежкун, А. М., Порохняч, І. В. (2025). Особливості формування самосійних лісів сосни звичайної на колишніх сільськогосподарських землях Східного Полісся та північно-східної частини Лівобережного Лісостепу. *Лісівництво і агролісомеліорація*, 147, 3–17.] (in Ukrainian)

Growth and yield models for naturally regrown Scots pine forests of the Ukrainian Polissia

V. Blyshchuk¹, P. Lakyda²

Presented are the results of a study on the dynamics of the main stand attributes of naturally regrown (self-seeded) Scots pine forests on former agricultural lands. The aim of this study is to investigate the growth processes of pine stands that have naturally regrown on abandoned land in the Ukrainian Polissia without human intervention or silvicultural treatments. The research dataset includes the results of the authors' own studies conducted in self-seeded forests across five regions of the Ukrainian Polissia (Volyn, Rivne, Zhytomyr, Kyiv, and Chernihiv), as well as data on natural stands of Scots pine in this region obtained from the database. Overall, the research material encompasses 182 sample plots established using a specialized methodology.

The following stand parameters were modeled: dominant and average heights, mean diameter, basal area, height form factor, and the mean diameter and height of the portion of the stand removed during thinning. Other stand parameters included in yield tables were calculated using formulas commonly accepted in forest mensuration.

The parameters of the models of stand attributes were determined using regression dependences, and their accuracy and adequacy were verified using statistical criteria (coefficient of determination and residual analysis). The dominant height growth curve was developed based on the H. Tomasius growth function. For practical application, it was adapted to the M. M. Orlov scale, and the transition from dominant to average height was performed. The energy of height growth of self-seeded forests, especially at a young age, significantly exceeds that of comparable pine forests of artificial and natural origin.

At the age of 10 years, the difference may exceed 30% for natural forests and over 20% for planted forests belonging to the forest fund. The arguments for the mean diameter model are the average age ($r = 0.89$) and average height ($r = 0.94$), therefore, it is suitable for modelling any site index

class. The relative stand density does not affect the mean diameter ($r = -0.21$), since no specialised forestry measures have been carried out in naturally regrown pine forests, and only self-thinning processes occur. In order to approximate the dynamics of the basal area, a modified growth function by L. Bertalanffy was used, where the argument is the average height of the stand. Significant deviations of the model from the experimental data are observed only in pine stands on lands designated for forestry purposes, since the vast majority of sample plots established there have a relative density ranging between 0.6 and 0.8. Therefore, the results of modelling stand basal area of naturally regrown pine forests provide grounds to conclude that the developed yield tables will characterise the dynamics of the main stand parameters at a relative density of 1.0. Modelling of the removed part of stand due to thinning was carried out using the direct regression method (as a function of average age) with the use of reduction numbers. The developed set of mathematical models enables a highly accurate assessment of the main growth characteristics of self-seeded forests on agricultural lands. Based on these, yield tables were developed for site indexes I^d-IV of fully stocked (normal) stands. The maximum total annual increment of self-seeded pine stands occurs at the age of 50–70 years, depending on site index. The maximum current annual increment in naturally regrown forests, and stands of natural and artificial origin, occurs at the age of 30–50, 35–50, and 20–50 years, respectively. The most minor difference between the total annual and current increment of self-seeded pine stands is observed at the age of 55–65 years, that is, it is at this age that the stands reach quantitative maturity.

Key words: *Pinus sylvestris* L.; forest stand parameters dynamics; site index; mean diameter; average height; stand basal area; current annual increment; abandoned agricultural lands; self-seeded area; forest regrowth.

¹Volodymyr Blyshchuk – PhD in Agricultural Sciences, associate professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine. E-mail: blysh@nubip.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5440-3142>

²Petro Lakyda – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, First Vice-President of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the scientific support sector of the State Enterprise "Forests of Ukraine", 6 Bolsunovska St., Kyiv, 01601, Ukraine. E-mail: petro.lakyda@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3639-2969>