



Original researches

Estimation of the Leaf Area Index of the Pine Forest Stands Within Northern Steppe of Ukraine Conditions

Received: 24 June 2018
Revised: 03 July 2018
Accepted: 05 July 2018

V. M. Lovynska¹, P. I. Lakyda²

¹Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Dnipro State Agrarian and Economic University, Serhii Efremov st., 25, Dnipro, 49600, Ukraine

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

Tel.: +38-066-559-54-63
+38-067-769-63-29
E-mail: glub@ukr.net

Cite this article: Lovynska, V. M., Lakyda, P. I. (2018). Estimation of the leaf area index of the pine forest stands within Northern Steppe of Ukraine conditions. *Agrology*, 1(3), 254-260. doi: 10.32819/2617-6106.2018.13004

Abstract. Assimilation part of forest ecosystems play an important role in the global carbon cycle and forming net-primary productivity. However, knowledge on leaf area index (LAI), that affect carbon fluxes is lacking, especially within territory of Steppe zone of Ukraine. We studied twenty Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations different age in pure and mixed stands to examine the changes in LAI. The method for determining samples mass and volume was to random select of needles from green fraction from different crown parts. The next step was in weighing and the volume determination of the samples by the xylometric method. Pine stands within temporary sample plots represent different age structure and function in the following types of forest condition: very dry (A_0) and dry (A_1) bir, dry (B_1), fresh (B_2) and moist (B_3) subir, dry (C_1), fresh (C_2) and moist (C_3) suhrud, rarely – in the hrud condition. The obtained results of model trees biometric parameters show their approximate values to the average indexes of the temporal sample plots on which they were selected. The variation of the weight of needle samples in fresh and completely dry states depending on the age of the model trees is analyzed. Parameters of the needle area and ratio of fresh and dry weight to the total surface area of needle samples is calculated. The average value of needle biomass in completely dry states and the needles surface area of the of needles on the study plots is defined. The calculated LAI of pine stands varies from 1.1 to 3.36 m²/m². The dependence of LAI on the model tree age is established. There is the increase of the trend line for young trees, stabilization and then decrease this parameter up to 90 years old is defined. The maximum LAI index is characterized for a pure 83-year-old pine plantation of pine, with I class bonitat, that grows under dry suhrud conditions. The minimum LAI is recorded for the mixed pine stand in age of 9 years, with III class bonitat, which function in dry hrud conditions. Calculation of LAI of Scots pine stands showed that it depends on the type of site conditions and stand age.

Keywords: *Pinus sylvestris* L., mass of needles bunch, volume of needles bunch, temporary sample plots, age structure, types of forest condition.

Оцінка індексу площі листкової поверхні деревостанів сосни звичайної в умовах Північного Степу України

V. M. Lovynska¹, P. I. Lakyda²

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Анотація. Асиміляційна складова лісових екосистем відіграє важливу роль у глобальному вуглецевому циклі та формуванні первинної продукції. Однак відомостей про індекс площі листкової поверхні (LAI), який впливає на потоки вуглецю, обмаль, що особливо характерно для степової зони України. Для дослідження зміни LAI закладено 20 тимчасових пробних площ у чистих та змішаних деревостанах сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.) різного віку в межах Дніпропетровської області. Методика визначення маси свіжого та абсолютно сухого пучка хвоїнок полягала у відборі хвої із фракції деревної зелені методом випадкового відбору з різних частин крони з подальшим їх зважуванням та визначенням об'єму ксилметричним способом. Деревостани сосни звичайної на тимчасових пробних площах мають різну вікову структуру і функціонують у таких типах лісорослинних умов: дуже сухі (A_0) та сухі (A_1) бори; сухі (B_1), свіжі (B_2) та вологі (B_3) субори; сухі (C_1), свіжі (C_2) та вологі (C_3) сугруди, рідше – в грудях. Отримані результати щодо таксаційних параметрів досліджуваних модельних дерев сосни звичайної показали наближені їх значення до середніх показників тимчасових пробних площ, на яких вони були відібрані. Проаналізовано варіювання показника маси свіжого та абсолютно сухого пучка хвоїнок залежно від віку модельних дерев. Розраховано показники площі пучка хвоїнок та коефіцієнти відношення свіжої та абсолютно сухої маси пучка до його загальної площі. Встановлено середнє значення маси абсолютно сухої хвої та площу листкової поверхні хвої на тимчасових пробних площах. Розрахований індекс площі листкової поверхні соснових деревостанів змінюється від 1,1 до 3,36 м²/м². Визначено залежність показника LAI від віку модельного дерева, зі зростанням лінії тренду для молодняків, стабілізацією та подальшим спаданням значення даного параметра до 90-річного віку. Максимальний показник LAI характерний для чистого 83-річного насадження сосни звичайної, із

I класом бонітету, що зростає в умовах сухого сугруду. Показник мінімального індексу площі листкової поверхні зареєстровано для мішаного за складом деревостану сосни звичайної віком 9 років, III класу бонітету, який функціонує в сухому груді. Розрахунок індексу площі листкової поверхні соснових деревостанів в Північному Степу України показав, що він істотно залежить від типу лісорослинних умов та віку насаджень.

Ключові слова: *Pinus sylvestris* L., маса пучка хвоїнок, об'єм пучка хвоїнок, тимчасові пробні площі, вікова структура, типи лісорослинних умов.

Вступ

Продуктивність деревних рослин істотно залежить від ступеня функціонування їх структурних частин та від багатьох геофізичних факторів (Castañeda-Moya et al., 2013; Ding et al., 2016; Ellison et al., 2017; Fei et al., 2018; Lu et al., 2018).

Крона є складовою біомаси дерева, формується із гілля та листя (хвої) і виконує низку функцій. Гілки є продовженням стовбура, його провідною системою, в зелених частинах крони перебігають процеси фотосинтезу, випаровування води та газообміну.

Поповнення існуючої нормативної бази лісотаксаційної інформації новими елементами з трансформацією та доповненнями є актуальним та своєчасним вирішенням питань моделювання різноманітних процесів, які відбуваються в екологічних системах.

Площа поверхні листя має виключно важливе значення для надземних екосистем, оскільки проявляє себе як зона розподілу біотичного та абіотичного середовища, а також зона реалізації у рослині головних фізіологічних процесів, механізми яких визначають ланцюги матеріальних перетворень та потоків енергії (Utkin et al., 1997; Bondeau et al., 2008).

Індекс листкової поверхні (LAI – від англ. leaf area index) є мірою вимірювання вмісту деревної зелені лісового намету. Вперше визначення LAI надав Watson (1947), як співвідношення загальної площі освітленого листя та площі ділянки, яку займає насадження.

На сьогодні саме LAI є найбільш важливим показником біофізичних властивостей деревної крони та описує вегетативний стан у широкому варіюванні фізіологічних, кліматологічних та біогеохімічних досліджень (Jagodziński & Kałucka, 2008; Pelt et al., 2016; Fisher et al., 2018). Майже всі процеси, що відбуваються в лісових екосистемах, насамперед формування первинної продукції, залежать від розміру та площі, що займає їх асимілююча частина (Forrester et al., 2017). LAI – це ключ до вивчення вегетативної складової, зокрема, для перерахунку та узагальнення між листям і таксаційними параметрами намету, балансу фотосинтез–дихання–виділення CO₂, а також для оцінювання даних процесів через призму глобального інтерфейсу біосфера–атмосфера (Liang et al., 2015; Li et al., 2017).

LAI залежить від виду рослини, етапу її розвитку, сезонності, умов місцезростання та практики лісового управління (Falster & Westoby, 2003; Konôrka et al., 2016; Alton, 2018; Fotis et al., 2018). Сума цих факторів у поєднанні з різницею в методах визначення даного параметра приводить до значного варіювання цього фактора (Field et al., 1995; Olivas et al., 2013; Fang & Liang, 2014; Bussotti & Pollastrini, 2015). Саме тому дослідження показника LAI, як вітчизняними, так і зарубіжними вченими, залишається важливою віхою у формуванні нормативної бази лісотаксаційних описів лісонасаджень (Jonckheere et al., 2005; Matushevych & Lakyda, 2014).

Опубліковані значення LAI лісів мають діапазон змін від менш ніж 1 (Le Dantec et al., 2000) до ~14 (Turner et al., 2000). У цілому найвищий даний показник, як повідомляється в зарубіжній літературі, є характерним для хвойних наметів (Chen et al., 1997).

Метою дослідження була оцінка індексу листкової поверхні деревостанів сосни звичайної, що зростають в умовах Північного Степу України.

Матеріал і методи досліджень

Задля визначення індексу площі листкової поверхні в даній роботі використано експериментальні дані з двадцяти тимчасових пробних площ (ТПП) насаджень сосни звичайної, зростаючої в умовах Північного байрачного Степу України (табл. 1).

ТПП було закладено у чистих та мішаних насадженнях різних вікових груп. Досліджувані деревостани функціонують у найбільш типових для сосни звичайної лісорослинних умовах: дуже сухих (A₀) та сухих (A₁) борах; сухих (B₁), свіжих (B₂) та вологих (B₃) суборах; сухих (C₁), свіжих (C₂) та вологих (C₃) сугрудах, рідше – в грудях.

Відповідно до обраної методики (Lakyda, 2002), у польових умовах із різних частин крони модельного дерева (верхньої, середньої та нижньої) методом випадкового відбору було відібрано 10 зразків хвої, які обміряли та зважували. Бічну поверхню пучка 10 хвоїнок визначали через їх об'єм за методом, запропонованим Johnson (1984). Об'єм оцінювали ксилметричним способом через виштовхування води пучком модальних хвоїнок, занурених у мірний циліндр,

$$S_{\text{п хвої}} = 2 \cdot l \left(1 + \frac{\pi}{n} \right) \cdot \sqrt{\frac{v \cdot n}{\pi \cdot l}}, \quad (1)$$

де S – площа бічної поверхні модального пучка хвої, мм²;

l – сумарна довжина хвоїнок у пучку, мм;

n – кількість хвоїнок у пучку, шт.;

v – об'єм пучка хвоїнок, визначений ксилметричним способом, мм³.

Відібрану хвою у свіжому стані зважували в польових умовах на електронних вагах із точністю до 0,001, потім висушували в лабораторних умовах у сушильній шафі за температури 105 °C до абсолютно сухого стану.

Коефіцієнт, який показує відношення свіжої (2) та абсолютно сухої (3) маси хвої до загального пучка хвої, розраховували за формулами:

$$R_{\text{м nat}} = m_{\text{nat}} / S_{\text{п хвої}}, \quad (2)$$

де $R_{\text{м nat}}$ – коефіцієнт відношення абсолютно сухої маси хвої до загальної площі пучка 10 хвоїнок, кг·(мм²)⁻¹.

$$R_{\text{м0}} = m_0 / S_{\text{п хвої}}; \quad (3)$$

де $R_{\text{м0}}$ – коефіцієнт відношення свіжої маси хвої до загальної площі пучка 10 хвоїнок, кг·(мм²)⁻¹.

Площу листкової поверхні модельного дерева визначали як частку від загальної маси хвої модельного дерева в абсолютно сухому стані й коефіцієнта відношення абсолютно сухої маси хвої до площі листкової поверхні.

Масу деревної зелені (охвоєні гілки з діаметром ≤ 1 см) модельного дерева визначали у свіжому стані ваговим методом у польових умовах. З метою визначення відсотка хвої у деревній зелені й вмісту сухої речовини відбирали та зважували по три модельні гілки з нижньої, серединної та верхівкової частин крони. Далі хвою з модельних гілок відокремлювали, після чого гілка знову підлягала зважуванню. Наступним етапом був розрахунок відсотка хвої у деревній зелені. Даний параметр використовували для визначення біомаси хвої модельного дерева у свіжому стані. Загальну масу хвої модельного дерева в абсолютно сухому стані обчислювали через вміст абсолютно сухої речовини у хвої.

Площу листкової поверхні деревостанів сосни звичайної на ТПП визначали за співвідношенням загальної маси хвої в

Таблиця 1. Лісівничо-таксаційна характеристика деревостанів тимчасових пробних площ

шифр	ТПП площа, га	Склад насадження	Середні для породи на ТПП			Відносна повнота	Клас бонітету	ТЛУ
			вік, років	діаметр, см	висота, м			
04011401	0,30	10СЗ+ДЗ	68	29,1	20,7	1,04	II	C ₁
04011402	0,20	10СЗ	33	22,0	19,9	0,65	III	A ₁
04011403	0,20	7АкБЗСЗ	11	4,6	2,8	0,67	IV	A ₀
04011404	0,12	10СЗ+АкБ+ КЛЯ+ШЧ	41	26,1	23,6	0,58	III	C ₃
04011405	0,11	8СЗ2АкБ	9	5,6	3,8	0,51	III	D ₁
04011501	0,25	10СЗ	57	20,7	21,8	0,68	I	B ₂
04011502	0,25	10СЗ	62	22,4	23,6	0,69	I	B ₁
04011503	0,25	10СЗ	61	22,4	19,7	0,50	I	C ₂
04011504	0,25	10СЗ	66	29,3	30,4	0,61	I	B ₂
04011505	0,25	10СЗ	87	24,2	22,7	0,48	II	B ₂
04011506	0,25	10СЗ	76	23,9	19,5	0,49	I	C ₂
04011507	0,25	10СЗ	83	24,5	16,8	0,64	I	B ₃
04011508	0,25	10СЗ+ДЗ	76	23,2	22,5	0,52	I	B ₁
04011509	0,25	8СЗ2ДЗ	71	40,2	30,5	0,49	I	B ₂
04011510	0,20	10СЗ	58	19,9	18,2	0,61	I	B ₂
04011511	0,25	10СЗ	69	26,7	24,2	0,41	I	B ₂
04011512	0,25	10СЗ	51	21,8	23,5	0,59	Ia	B ₃
04011601	0,25	8СЗ2Бп	51	21,3	16,9	0,74	I	B ₂
04011602	0,25	10СЗ	47	15,8	18,0	0,44	I	B ₂
04011603	0,10	10СЗ	14	10,1	9,1	0,80	I	D ₁

абсолютно сухому стані всіх дерев на ТПП та обчисленого коефіцієнта відношення абсолютно сухої маси пучка хвоїнок до загальної їх площі.

Для визначення індексу площі листової поверхні (LAI) використали формулу

$$LAI = S/G, \quad (4)$$

де S – сумарна площа поверхні хвої, м²;

G – площа ТПП, м².

Результати

У процесі досліджень проаналізовано дані двадцяти зразків хвої, які відібрано із двадцяти модельних дерев сосни звичайної (табл. 2). Як видно з представлених даних, таксаційні характеристики досліджуваних модельних дерев сосни звичайної наближені до тих середніх показників тимчасових пробних площ, на яких вони були відібрані. Їх діапазон варіабельності

Таблиця 2. Таксаційна характеристика модельних дерев сосни звичайної

Шифр ТПП	a, років	d _{1,3} , см	h, м	Середній поперечник крони, м	Протяжність крони, м	Маса, кг	
						деревної зелені	хвої
04011401	83	27,2	20,5	4,9	6,8	61,6	19,62
04011402	30	16,9	19,0	2,3	6,8	16,0	6,35
04011403	12	9,6	4,5	3,0	3,9	17,1	6,48
04011404	38	17,8	15,2	3,5	10,5	26,8	7,9
04011405	9	7,0	4,8	3,0	4,5	8,0	2,13
04011501	56	22,0	22,5	3,3	6,9	15,5	4,0
04011502	63	20,0	23,5	3,7	9,0	17,0	5,45
04011503	66	24,0	24,0	3,9	9,2	20,0	5,89
04011504	68	24,0	21,6	4,5	8,0	24,3	7,3
04011505	90	26,3	22,3	1,8	6,0	18,1	4,48
04011506	77	22,1	18,6	3,3	5,7	27,3	9,29
04011507	84	24,1	17,3	2,0	11,2	19,2	5,45
04011508	78	24,5	23,4	3,2	5,4	27,2	7,01
04011509	71	38,9	30,0	4,3	8,4	43,5	9,73
04011510	60	23,5	24,3	1,9	7,7	9,5	2,53
04011511	71	26,7	25,4	2,9	8,0	34,0	9,66
04011512	47	18,1	22,3	2,3	9,8	12,0	3,59
04011601	47	26,1	17,2	3,7	5,5	28,0	10,13
04011602	49	15,7	17,3	1,7	6,3	11,0	4,93
04011603	14	16,2	10,0	2,35	10,75	22,0	8,71

віку знаходиться в межах від 9 до 90 років; діаметра стовбура – від 7 до 38,9 см; висоти дерева – від 4,5 до 30 м. Для діаметра та протяжності крони, маси деревної зелені обраних дерев не було встановлено залежності їх значень від біометричних параметрів.

Наступним етапом даної роботи був аналіз експериментальних даних, отриманих в умовах польового та лабораторного дослідів. Показник маси свіжої (m_{nat}) та абсолютно сухої (m_0) пучка 10 хвоїнок варіює в діапазоні 180–410 та 105–190 мг, відповідно (рис. 1а). Для показника маси хвої виявлена тенденція зростання даного параметра зі збільшенням віку модельного дерева. Однак з досягненням дерева максимального віку (90 років) маса хвої знижується. Така закономірність визначена як у випадку маси свіжої хвої, так і вмісту абсолютно сухої речовини у свіжій хвої.

Діапазон значень площі пучка 10 хвоїнок лежить у межах від 460 до 1609 мм² (рис. 1б). У досліді не було виявлено залежності даного показника від віку модельного дерева.

За результатами визначеної маси пучка 10 хвоїнок та їх загальної площі розраховано коефіцієнти відношення свіжої та абсолютно сухої їх маси до загальної площі хвої ($kg \cdot (m^2)^{-1}$) – рис. 1,в. Середнє значення обчисленого коефіцієнта становить $0,337 kg \cdot (m^2)^{-1}$ для свіжої хвої і $0,182 kg \cdot (m^2)^{-1}$ для абсолютно сухої.

Масу абсолютно сухої хвої на ТПП розраховували на основі значень відсотка хвої у деревній зелені, вмісту абсолютно сухої речовини у свіжій хвої, відповідно до кількості дерев різних ступенів товщини з перелікової відомості з ТПП (табл. 3).

Площа листкової поверхні та індекс площі листкової поверхні соснових деревостанів на досліджуваних ТПП змі-

нюються в досить широких межах та залежать насамперед від обчисленої маси сухої хвої. Середнє значення маси абсолютно сухої хвої на ТПП становить 828,69 кг, площа листкової поверхні хвої – 4157,5 м². Розрахований індекс площі листкової поверхні соснових насаджень змінюються від 1,1 до 3,36 м²/м².

Одним із ключових факторів, що впливають на функціонування фотосинтетичної поверхні крони та формування надземної фітомаси, є вік, тому одним із завдань даної роботи було встановлення його впливу на досліджуваний індекс листкової поверхні. Лінія тренду має тенденцію до зростання LAI для рослин у молодому віці, а після досягнення дерева 41-річного віку характеризується спадним типом ($R^2=0,53$) – рис. 2.

Максимальний показник LAI характерний для чистого 68-річного насадження сосни звичайної, із I класом бонітету, що зростає в умовах сухого сугруду. Показник мінімального індексу площі листкової поверхні зареєстровано для мішаного за складом деревостану сосни звичайної, який функціонує в сухому груді, віком 9 років, III класу бонітету.

Обговорення

Останнім часом дедалі більше поширюється думка про те, що продуктивність лісів переважно залежить від LAI, який визначає ріст деревних рослин в умовах лісових екосистем. LAI є зручним параметром для вимірювання, а варіабельність його значень відображена у вигляді теоретичних моделей у глобальному масштабі (Asner et al., 2003; Zhu et al., 2013; Pfeifer et al., 2014).

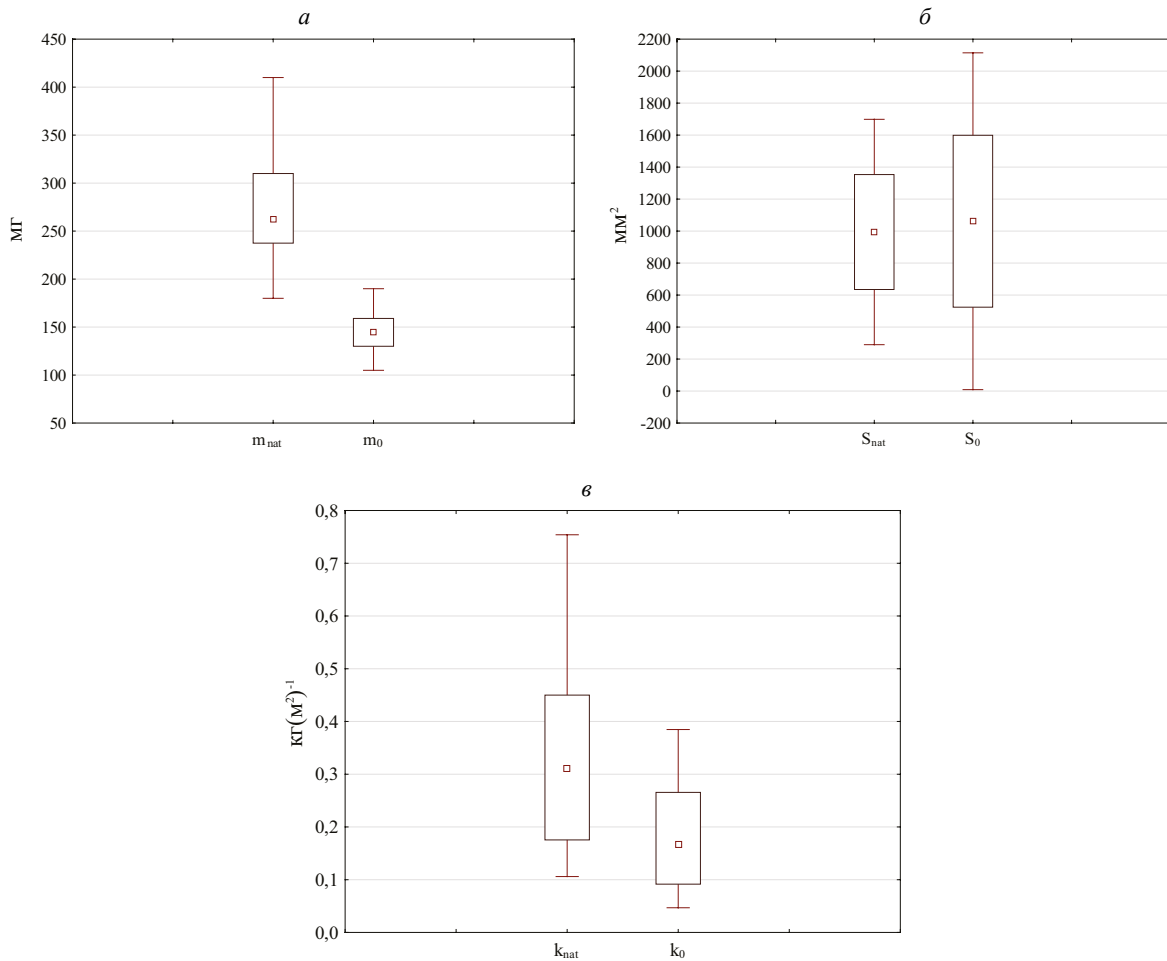


Рис. 1. Діаграма розмаху інтервальної оцінки свіжої та сухої маси 10 хвоїнок (а), площі пучка 10 хвоїнок (б), коефіцієнтів відношення свіжої та абсолютно сухої маси хвої до її площі (в): квадрат – медіана, прямокутник – кватиль вибіркового розподілу, відрізок – мінімум та максимум вибірки

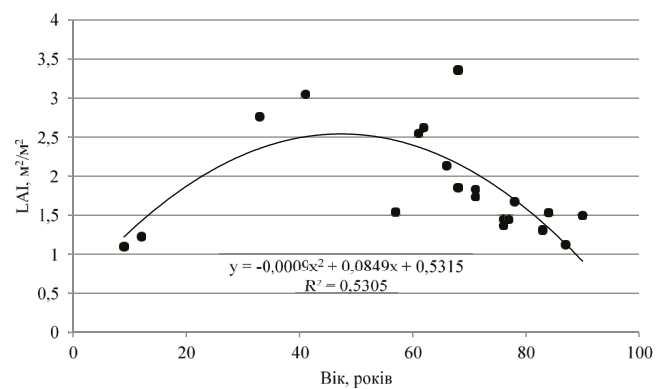
Таблиця 3. Площа листкової поверхні та її індекс соснових деревостанів на тимчасових пробних площах

Шифр ТПП	Площа ТПП, м ²	Маса абсолютно сухої хвої, кг	Листкова поверхня	
			площа, м ²	індекс (LAI), м ² /м ²
04011401	3000	3705	10080,0	3,36
04011402	2000	1636	5520,0	2,76
04011403	2000	154	2460,0	1,23
04011404	1200	451	3660,0	3,05
04011405	1100	201,3	1210,0	1,1
04011501	2500	1070	3850,0	1,54
04011502	2500	1410	6550,0	2,62
04011503	2500	552,5	6375,0	2,55
04011504	2500	940	5325,0	2,13
04011505	2500	657,5	2800,0	1,12
04011506	2500	1395	3625,0	1,45
04011507	2500	972,5	3275,0	1,31
04011508	2500	867,5	3425,0	1,37
04011509	2500	770	4625,0	1,85
04011510	2000	505	3660,0	1,83
04011511	2500	250	4350,0	1,74
04011512	2500	170	3625,0	1,45
04011601	2500	402,5	4175,0	1,67
04011602	2000	354	3060,0	1,53
04011603	1000	110	1500,0	1,5
Середнє	2215	828,69	4157,5	1,86

Особливості структури намету, складової рослинності лісу, впливають на мікроклімат насадження, загальні його характеристики, а отже, і на LAI (Hardwick et al., 2015; Goudie et al., 2016). У той же час ґрунтово-кліматичні умови місцевості впливають на ріст та розвиток деревних рослин, унаслідок яких формується деревостан із певною структурною організацією. У жорстких умовах Степу нестача вологи є ключовим фактором, що визначає специфіку перебігу процесів усередині намету та функціонування асиміляційних органів. В літературі є достатня кількість публікацій щодо LAI з деревостанів, які зростають в посушливих умовах, що є наближеними до степових умов України, зокрема, Дніпропетровської області. Зіставлення отриманих нами індексів з результатами досліджень інших авторів стало основним предметом обговорення.

Schleppi et al. (2011) застосували модель регресії, завдяки якій у межах Швейцарії провели розрахунок LAI, значення якого становило від 1,4 до 6,7. За свідченням авторів, ділянки з негативним водним балансом, коли річне випаровування перевищувало кількість опадів, мали більш низькі значення LAI. Високі або низькі значення індексу вологості також призводили до спадання LAI, з більш коротких дерев у сухих місцях та більш відкритих наметах у місцях із вищою вологістю. Співвідношення LAI в умовах намету суттєво змінюються зі середніми річними опадами (Whitford et al., 1995; Pfeifer et al., 2012).

Вік дерева є визначальним для багатьох параметрів деревостану, і вже доведено, що швидкозрілі деревні види досягають максимального LAI у віці 10–15 років, у той час як повільнозростаючі – у віці 20–40 років або й пізніше. Battaglia et al. (1998), Sonohat et al. (2004) показали, що LAI деревостану збільшується з його ростом, має тенденцію до стабілізації, а далі до повільного спадання у більш старшому віці. Це збігається з отриманими нами результатами залежності досліджуваного параметра від вікової структури. Сосна зви-

**Рис. 2.** Залежність індексу листкової поверхні від віку

чайна в умовах штучного лісовирощування зазвичай культивується як монокультура, а в таких умовах росту LAI рослин досягає свого максимуму відносно швидко (Bond-Lamberty et al. 2002).

Взаємозв'язок між LAI і процесом старіння демонструє зростання LAI поступово зі зростанням віку дерев. Однак дані, отримані в результаті досліджень, проведених у зрілому віці для бука (*Fagus sylvatica* L.), дуба (*Quercus robur* L.) і сосни звичайної (*Pinus sylvestris*) показали, що вік деревостану є важливим показником прогнозу LAI тільки у випадку дуба (Bequet et al., 2012; Parker & Russ, 2004). Зафіксована нами тенденція зростання досліджуваного параметра в молодому віці рослин є подібною до результатів, отриманих Jagodziński & Kałucka (2008). Автори зазначають, що по мірі розвитку деревостану сосни звичайної до 20-річного віку відбувається підвищення LAI, з істотною позитивною кореляцією з показниками фітомаси стовбура та негативною – з густиною насадження. Щодо значень LAI, отриманих нами для насаджень більш зрілого віку, то вони є близькими, однак дещо нижчими (1,31) відносно даних Soudani et al. (2002) зі значенням 1,48 для 80–85-річних деревостанів та більш істотно (2,4) відрізняються від результатів, наведених цими ж авторами для 45–50-річних соснових деревостанів (2,09).

У цілому відносно низькі значення LAI, отримані в результаті наших досліджень, можуть пояснюватися обмеженістю ресурсів, насамперед атмосферної і ґрунтової вологи, оскільки саме екологічні умови контролюють час досягнення LAI максимального свого значення, а також його міжсезонну і річну мінливість (Gholz et al., 1990; Bellot & Chirino, 2013; Zhu et al., 2016).

Висновки

Виявлена тенденція збільшення показника маси хвої у свіжому та абсолютно сухому стані зі збільшенням віку модельного дерева. Середньоарифметичне значення LAI для насаджень сосни звичайної Північного Степу України дорівнює 1,86. Показник індексу площі листкової поверхні сосни звичайної безпосередньо пов'язаний із віковою структурою деревостану, де проводили дослідження. Лінія тренду показника LAI має тенденцію до зростання для рослин у молодому віці, а після досягнення дерев 41-річного віку характеризується спадним типом. Максимальний показник індексу площі листкової поверхні (3,36 м²/м²) встановлено для деревостану віком 83 роки, тоді як мінімальний – для 9-річного насадження. Отже, необхідність подальшого вивчення та розробка алгоритмів кількісної оцінки LAI сосняків в умовах Степу, а також визначення залежностей даного параметра від основних таксаційних параметрів зберігає свою актуальність.

References

- Alton, P.B. (2018). Decadal trends in photosynthetic capacity and leaf area index inferred from satellite remote sensing for global vegetation types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251, 361–375. doi: [10.1016/j.agrformet.2017.11.020](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.020).
- Asner, G. P., Scurlock, J. M., & Hicke, J. A. (2003). Global synthesis of leaf area index observations: Implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 91–205. doi: [10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x](https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00026.x).
- Battaglia, M., Cherry, M. I., Beadle, C. I., Sands, P. J., & Hingston, A. (1998). Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. *Tree Physiology*, 18, 521–528. doi: [10.1093/treephys/18.8-9.521](https://doi.org/10.1093/treephys/18.8-9.521).
- Bequet, R., Kint, V., Campioli, M., Vansteenkiste, D., Muys, B., & Ceulemans, R. (2012). Influence of stand, site and meteorological variables on the maximum leaf area index of beech, oak and Scots pine. *European Journal of Forest Research*, 131(2), 283–295. doi: [10.1007/s10342-011-0500-x](https://doi.org/10.1007/s10342-011-0500-x).
- Bellot, J., & Chirino, E. (2013). Hydrobal: An eco-hydrological modelling approach for assessing water balances in different vegetation types in semi-arid areas. *Ecological Modelling*, 266, 30–41. doi: [10.1016/j.ecolmodel.2013.07.002](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.002).
- Bond-Lamberty, B., Wang, C., Gower, S. T., & Norman, J. (2002). Leaf area dynamics of a boreal black spruce fire chronosequence. *Tree Physiology*, 22, 993–1001. doi: [10.1093/treephys/22.14.993](https://doi.org/10.1093/treephys/22.14.993).
- Bondeau, A., Kicklighter, D. W. & Kaduk, J. (2008). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): importance of vegetation structure on seasonal NPP estimates. *Global Change Biology*, 5, 35–45. doi: [10.1046/j.1365-2486.1999.00005.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1999.00005.x).
- Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2015). Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits. *Ecological Indicators*, 52, 219–230. doi: [10.1016/j.ecolind.2014.12.010](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010).
- Castañeda-Moya, E., Twilley, R. R., & Rivera-Monroy, V. H. (2013). Allocation of biomass and net primary productivity of mangrove forests along environmental gradients in the Florida Coastal Everglades, USA. *Forest Ecology and Management*, 307, 226–241. doi: [10.1016/j.foreco.2013.07.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.011).
- Chen, J. M., Rich, P. M., Gower, S. T., Norman, J. M., & Plummer, S. (1997). Leaf area index of boreal forests: theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysics Research – Atmospheres*, 102(D24), 29429–29443. doi: [10.1029/97JD01107](https://doi.org/10.1029/97JD01107).
- Ding, H., Chiabai, A., Silvestri, S., & Nunes, P. A. L. D. (2016). Valuing climate change impacts on European forest ecosystems. *Ecosystem Services*, 18, 141–153. doi: [10.1016/j.ecoser.2016.02.039](https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.02.039).
- Ellison, D., Morris, C. E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Muriyaro, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M., Creed, I. F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D. V., Tobella, A. B., Ilstedt, U., Teuling, A. J., Gebrehiwot, S. G., Sands, D. C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y., Caroline, A., & Sullivan, C. A. (2017). Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. doi: [10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002).
- Fang, H., & Liang, S. (2014). Leaf Area Index Models. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. doi: [10.1016/b978-0-12-409548-9.09076-x](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09076-x).
- Falster, D. D., & Westoby, M. (2003). Leaf size and angle vary widely across species: what consequences for light interception? *New Phytol.* 158, 509–525. doi: [10.1046/j.1469-8137.2003.00765.x](https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00765.x).
- Fei, X., Song, Q., Zhang, Y., Liu, Y., Sha, L., Yu, G., Zhang, L., Duan, C., Deng, Y., Wu, C., Lu, Z., Luo, K., Chen, A., Xu, K., Liu, W., Huang, H., Jin, Y., Zhou, R., Li, J., Lin, Y., Zhou, L., Fu, Y., Bai, X., Tang, X., Gao, J., Zhou, W., & Grace, J. (2018). Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China. *Science of The Total Environment*, 616–617, 824–840. doi: [10.1016/j.scitotenv.2017.10.239](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.239).
- Field, C. B., Randerson, J. T., & Malmstrom, C. M. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51(1), 74–88. doi: [10.1016/0034-4257\(94\)00066-v](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-v).
- Fisher, A., Scarth P., Armston J., & Danaher T. (2018). Relating foliage and crown projective cover in Australian tree stands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 39–47. doi: [10.1016/j.agrformet.2018.04.016](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.04.016).
- Forrester, D. I., Tachauer, I. H. H., Annighoefter, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Ruiz-Peinado, R., Stark, H., Vacchiano, G., Zlatanov, T., Chakraborty, T., Saha, S., & Sileshi, G. W. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396, 160–75. doi: [10.1016/j.foreco.2017.04.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011).
- Fotis, A. T., Morin, T. H., Fahey, R. T., Hardiman, B. S., Bohrer, G., & Curtis, P. S. (2018). Forest structure in space and time: Biotic and abiotic determinants of canopy complexity and their effects on net primary productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 250–251, 181–191. doi: [10.1016/j.agrformet.2017.12.251](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.251).
- Gholz, H. L., Ewel, K. C., & Teskey, R. O. (1990). Water and forest productivity. *Forest Ecology and Management*, 30, 1–18. doi: [10.1016/0378-1127\(90\)90122-r](https://doi.org/10.1016/0378-1127(90)90122-r).
- Goudie, J. W., Parish, R., & Antos, J. A. (2016). Foliage biomass and specific leaf area equations at the branch, annual shoot and whole-tree levels for lodgepole pine and white spruce in British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 361, 286–297. doi: [10.1016/j.foreco.2015.11.005](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.005).
- Hardwick, S. R., Toumi, R., Pfeifer, M., Turner, E. C., Nilus, R., & Ewers, R. M. (2015). The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 201, 187–195. doi: [10.1016/j.agrformet.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.010).
- Jagodziński, A., & Kałucka, I. (2008). Age-related changes in leaf area index of young Scots pine stands. *Dendrobiology*, 59, 57–65.
- Jonckheere, I., Muys, B., & Coppin, P. (2005). Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium. *Tree Physiol.*, 25(6), 723–732. doi: [10.1093/treephys/25.6.723](https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.723).
- Konôpka, B., Pajčík, J., Marušák, R., Bošefa, M., & Lukac, M. (2016). Specific leaf area and leaf area index in developing stands of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* Karst. *Forest Ecology and Management*, 364, 52–59. doi: [10.1016/j.foreco.2015.12.005](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.005).
- Lakyda, P.I. (2002). Fitomasa lisiv Ukraïny [Phytomass of forests of Ukraine]. Ternopil, Zbruch (in Ukrainian).
- Le Dantec, V., Dufrene, E., & Saugier, B. (2000). Interannual and Spatial Variation in Maximum Leaf Area Index of Temperate Deciduous Stands. *Forest Ecology and Management*, 134, 71–81. doi: [10.1016/S0378-1127\(99\)00246-7](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00246-7).
- Li, P., Peng, Ch., Wang, M., Li, W., Zhao, P., Wang, P., Yang, Y., & Zhu, Q. (2017). Quantification of the response of global terrestrial net primary production to multifactor global change. *Ecological Indicators*, 76, 245–255. doi: [10.1016/j.ecolind.2017.01.021](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.021).
- Liang, W., Yang, Y., Fan, D., Guan, H., Zhang, T., Long, D., Zhou, Y., & Bai, D. (2015). Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, 22–36. doi: [10.1016/j.agrformet.2015.01.015](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.015).
- Lu, X., Liu, Z., An, S., Miralles, D.G., Maes, W., Liu, Y., & Tang, J. (2018). Potential of solar-induced chlorophyll fluorescence to estimate transpiration in a temperate forest. *Agricultural*

- al and Forest Meteorology, 252, 75–87. doi: [10.1016/j.agrformet.2018.01.017](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.017).
- Matushevych, L. M., & Lakyda, P. I. (2014). Indeks ploshhi lystkovoï poverhni dubovyh nasadzhen' Shidnogo Polissya Ukrainy [Leaf area index of oak forest in Eastern Polissya of Ukraine]. Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, 12, 148–153 (in Ukrainian).
- Olivas, P. C., Oberbauer, S. F., Clark, D. B., Clark, D. A., Ryan, M. G., O'Brien, J. J., & Ordoñez, H. (2013). Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. Agricultural and Forest Meteorology, 177, 110–116. doi: [10.1016/j.agrformet.2013.04.010](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.010).
- Parker, G., & Russ, M. (2004). The canopy surface and stand development: Assessing forest canopy structure and complexity with near-surface altimetry. Forest Ecology and Management, 189, 307–315. doi: [10.1016/j.foreco.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.09.001).
- Pelt, R. V., Sillett, S. C., Kruse, W. A., Freund J. A., & Kramer, R. D. (2016). Emergent crowns and light-use complementarity lead to global maximum biomass and leaf area in Sequoia sempervirens forests. Forest Ecology and Management, 375, 279–308. doi: [10.1016/j.foreco.2016.05.018](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.018).
- Pfeifer, M., Gonsamo, A., Disney, M., Pellikka, P., & Marchant, R. (2012). Leaf area index for biomes of the Eastern Arc Mountains: Landsat and SPOT observations along precipitation and altitude gradients. Remote Sensing of Environment, 118, 103–115. doi: [10.1016/j.rse.2011.11.009](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.009).
- Pfeifer, M., Lefebvre, V., Gonsamo, A., Pellikka, P. K. E., Marchant, R., Denu, D., & Platts, P. J. (2014). Validating and linking the GIMMS leaf area index (LAI3 g) with environmental controls in tropical Africa. Remote Sensing, 6(3), 1973–1990. doi: [10.3390/rs6031973](https://doi.org/10.3390/rs6031973).
- Schleppi, P., Thimonier, A., & Walthert, L. (2011). Estimating leaf area index of mature temperate forests using regressions on site and vegetation data. Forest Ecology and Management, 261(3), 601–610. doi: [10.1016/j.foreco.2010.11.013](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.11.013).
- Sonohat, G., Balandier, P., & Ruchaud, F. (2004). Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests. Annals of Forest Science, 61, 629–641. doi: [10.1051/forest:2004061](https://doi.org/10.1051/forest:2004061).
- Soudani, K., Trautmann, J., & Walter, J.-M. N. (2002). Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. International Journal of Remote Sensing, 23(18), 3605–3618. doi: [10.1080/01431160110110983](https://doi.org/10.1080/01431160110110983).
- Turner, D. P., Acker, S. A., Means, J. E., & Garman, S. L. (2000). Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands. Forest Ecology and Management, 126, 61–76. doi: [10.1016/S0378-1127\(99\)00083-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00083-3).
- Utkin A. I., Ermolova, L. S., & Zamolodchikov, D. G. (1997). Konversionnye koefitsienty dlja opredelenija ploshhadi listovoj poverhnosti nasazhdenij osnovnyh lesoobrazujushhih porod Rossii [Conversion indexes for determining the leaf area surface of plantations of main forestforming species in Russia]. Forest Science, 3, 74–78 (in Russian).
- Whitford, K. R., Colquhoun, I. J., Lang, A. R. G., & Harper, B. M. (1995). Measuring leaf area index in a sparse eucalypt forest: a comparison of estimates from direct measurement, hemispherical photography, sunlight transmittance and allometric regression. Agricultural and Forest Meteorology, 74(3–4), 237–249. doi: [10.1016/0168-1923\(94\)02189-Q](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02189-Q).
- Zhu, Z., Bi, J., Pan, Y., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L., Samanta, A., Piao, S., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2013). Global data sets of vegetation leaf area index (LAI)3 g and fraction of photosynthetically active radiation (FPAR)3 g derived from global inventory modelling and mapping studies (GIMMS) normalized difference vegetation index (NDVI3 g) for the period 1981 to 2011. Remote Sensing, 5, 927–948. doi: [10.3390/rs5020927](https://doi.org/10.3390/rs5020927).
- Zhu, W., Xiang, W., Pan, Q., Zeng, Y., Ouyang, S., Lei, P., Deng, X., Fang, X., & Peng, C. (2016). Spatial and seasonal variations of leaf area index (LAI) in subtropical secondary forests related to floristic composition and stand characters. Biogeosciences, 13, 3819–3831. doi: [10.5194/bg-13-3819-2016](https://doi.org/10.5194/bg-13-3819-2016).