

ПОТЕНЦІАЛ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ ПЛАНТАЦІЇ ПАВЛОВНІЇ В УКРАЇНІ: МОДЕЛЮВАННЯ ВІКОВОЇ ДИНАМІКИ

В.Я.БРИЧ¹,

д.е.н., професор, e-mail: v.brych@wunu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4277-5213>

Ю.І.ГАЙДА^{1,2},

д.с.-г.н., професор e-mail: haydshn@ua.fm ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6019-9654>

Я.Д.ФУЧИЛО³,

д.с.-г.н., професор e-mail: fuchylo_yar@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0002-2669-5176>

В.М.ГУМЕНТИК³,

фахівець, e-mail: vgm2000@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7938-3988>

А.М.ШУВАР¹,

д.с.-г.н., професор e-mail: antin@ukr.net ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6016-0896>

О.В.БОРИСЯК¹,

д.е.н., доцент e-mail: o.borysiak@wunu.edu.ua ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4818-8068>

¹ — Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, Україна

² — Національний університет «Чернігівська політехніка», м. Чернігів, Україна

³ — Інститут біоенергетичних культур та цукрових буряків, м. Київ, Україна

Вступ. Серед глобальних цілей сталого розвитку, що були ухвалені ООН у 2015 році й які окреслили стратегічні вектори необхідного прогресу для країн та спільнот у найближчому майбутньому, особливе місце відведено проблемам відновлюваних джерел енергії (7-ма ціль) та боротьбі зі змінами клімату (13-ціль) [31]. Вирішення вищезазначених проблем значною мірою залежить від обсягів і якості екосистемних послуг, які можуть генерувати плантації швидкозростаючих видів деревних рослин [33].

Павловнія (*Paulownia* spp.) або адамове дерево — деревна рослина, яка характеризується надзвичайно високою продуктивністю, а тому відноситься в багатьох країнах світу до перспективних біоенергетичних культур [7]. Її деревина використовується для виготовлення паливної тріски та інших видів твердих видів біопалива [6]. Окрім того, насадження павловнії відзнача-

ються високими меліоративними якостями, маючи здатність закріплювати ерозійно небезпечні ґрунти, а також відновлювати ділянки, що постраждали від пожеж, зсувів [6, 22]. Біомаса листя павловнії, яка багата на протеїн, використовують також як корм у тваринництві. Олію, яку отримують із насіння павловнії, в Японії застосовують для отримання знаменитих лаків [16]. За фізико-механічними властивостями, зокрема величиною щільності, деревина павловнії подібна до деревини ялини європейської та ялиці білої, але завдяки вмісту дубильних речовин є стійкішою до гниття [10]. Павловнію вважають також потужним джерелом важливих регуляторних екологічних послуг, оскільки вона не лише сприяє очищенню повітря, але й характеризується високою вуглецепоглиняльною здатністю і значною киснепродуктивністю [2]. З огляду на це, актуальним науковим завданням є визначення потенціалу низки екологічних послуг насаджень павловнії в Україні та моделювання його вікової динаміки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рід Павловнія налічує до 20 видів, серед яких 6 видів мають промислове значення — *Paulownia elongata* S. Y. Hu, *P. fargesii* Franch., *P. fortunei* (Seem.) Hemsl., *P. glabrata* T. W. Hu, *P. taiwaniana* T. W. Hu & H. J. Chang, *P. tomentosa* (Thunb.) Steud. [6]. Найпоширенішими видами, які культивують в Україні, є: *Paulownia tomentosa*, *P. fortunei*, *P. elongata* й гібриди *P. tomentosa* × *P. fortunei* та *P. elongata* × *P. fortunei* [27].

В Україні в державний реєстр сортів рослин внесено наступні сорти павловнії повстистої (*Paulownia tomentosa*), придатні для поширення в Україні: (1) Hiant 27 (рік реєстрації 2021), (2) Enerdzhy (2022), (3) ZE PRO (2020), (4) In Vitro 112 (2017), (5) Kvinerdzhy (2020), (6) Cotevisa 1 (2019), (7) Cotevisa 2 (2019), (8) Lilov (2020), (9) Syla pryrody (2021), (10) TURBO PRO (2020), (11) Feniks (2020) [11]. Найбільш перспективним для отримання біомаси вважається гібрид Clone in Vitro 112, виведений в Іспанії [18]. В останні роки увага українських та зарубіжних дослідників була направлена на удосконален-

ня технології вирощування плантацій павловнії [1, 5, 21], методів отримання якісного садивного матеріалу [23, 26], вивчення фізико-механічних властивостей деревини [15, 17].

Павловнія характеризується досить значною вуглецепоглиняльною здатністю [12, 20]. В науковій літературі зустрічаються різні дані щодо кількісної оцінки вуглецепоглиняльної здатності павловнії. Така різниця, очевидно, пояснюється різними типами плантацій, видами павловнії, які представлені на них, кліматичними умовами країн вирощування, технологіями культивування. В одній з публікацій стверджується, що щорічні обсяги поглинання вуглекислого газу можуть становити навіть 140 т-га-1 [23]. Ці дані очевидно стосуються плантацій павловнії віком понад 5 років. В іншому дослідженні встановлено, що два клони (*Cotevisa 2* та *Suntzu 11*) гібриду *Paulownia elongata* × *fortunei* в Іспанії в провінції Севілья у дворічному віці формують біомасу 7,2 та 14 т сухої речовини і депонують вуглець в обсязі 3,2 і 7,4 т С на 1 га. Однак при цьому зазначають, що в гірших умовах біопродуктивність цих клонів є значно нижчою — в провінції Кордоба, відповідно 1,7 і 2,3 т сухої речовини на 1 га [35].

У моделі визначення вуглецепоглиняльної та киснетвірної здатності павловнії однією з ключових екзогенних змінних є обсяг продукрованої фітомаси на її плантаціях різного типу, яка також значно варіює в різних умовах вирощування. Так, в Італії, в північно-західній частині о. Сіцилія, плантації павловнії клоны in vitro 112® (*Paulownia elongata* × *P. fortunei*) з цільовим призначенням — деревина і паливна тріска — створюють з густотою садіння 500–700 шт-га-1. Їх життєвий цикл становить 20 років, а періодичність заготівлі деревини — 4–5 років. Під час кожного рубання можна отримати 65–90 т-га-1 продукції, з яких 50% це деревина, а 50% — інша біомаса.

Плантації, призначені виключно для заготівлі біомаси, створюють значно густішими з кількістю садивних місць 1500–3000 шт-га-1 на менш короткий період — 14 років. На таких плантаціях кожних 2–3 роки отримують 40–70 т-га-1 біомаси [29].

Результати досліджень у віддаленій сільській місцевості в Непалі показали, що середня загальна біомаса вуглецю п'ятирічного дерева павловнії становила $4,52 \pm 0,53$ кг С · рік⁻¹ на дерево, тобто $9,04 \pm 1,06$ тонн С га⁻¹ рік⁻¹ за густини посадки 2000 рослин на гектар. Подібним чином було встановлено, що середня загальна біомаса вуглецю нещодавно висадженого *P. tomentosa* протягом 4 місяців становила $6,07 \pm 0,38$ кг. Розрахункова біомаса вуглецю за один рік новопосаджених рослин становила $18,21 \pm 1,14$ кг рік⁻¹, тобто $0,36$ тонн С га⁻¹ рік⁻¹ [20].

У Північній Ірландії впродовж трьох років випробовувалися клони павловнії із Іспанії та Марокко. Встановлено, що біомаса одного свіжозрубаного дерева павловнії у віці 3 роки коливалася від 0,9 до 26,4 кг, при цьому відсоток сухої речовини коливався також дуже суттєво — від 32,6 до 48,1%. Варіабельність вмісту вуглецю в 1 кг сухої речовини виявилася значно меншою — від 482,9 г до 493,2 г. Урожай біомаси *P. fortunei*, *P. elongata* × *fortunei* та *P. elongata* в цьому експерименті становив, відповідно, 6,6; 3,4 і 1,9 т сухої речовини га⁻¹ рік⁻¹ [24].

У південній частині Іспанії (провінція Кастилія-Ла-Манча) клон павловнії in vitro 112® (*Paulownia elongata* × *P. fortunei*) впродовж другого вегетаційного періоду сформував стовбурову біомасу від 2,14 до 4,50 т га⁻¹. Вищий показник забезпечило зрошення плантації в поєднанні з підживленням ґрунту [3].

В Азії 16-річний експеримент, проведений з *P. tomentosa* в Азії показав, що ця рослина може депонувати 38,8 т С га⁻¹, тоді як 21-річна плантація — понад 105 т С га⁻¹ [14].

У південно-східній частині США після 30 місяців (за три вегетаційних періоди) *Paulownia elongata* показала продуктивність 92 кг на одне дерево [32].

В одній із статей зазначається, що в сприятливих умовах, на 5–7 річних плантаціях з 2000 деревами на га можна отримувати до 150–300 т деревини щорічно [13].

Економічні розрахунки економічної ефективності вирощування павловнії на землях колишніх виноградарників в Італії показали, що щорічний прибуток із плантації павловнії, створеної з метою вирощування деревини та деревної тріски становить 357,91 євро-га⁻¹, в той час як від альтернативного використання цієї ж ділянки землі під виноградники можна отримати лише 237,41 євро-га⁻¹. Плантації павловнії, які створені виключно для отримання

Таблиця 1

Динаміка обсягів депонування вуглецю та секвестрування CO₂ на плантаціях павловнії

Рік вирощування	Обсяг депонування вуглецю в тга ⁻¹					Обсяг секвестрування CO ₂ , тга ⁻¹
	у стовбуровій деревині	у гілках і листі	у надземній біомасі	у підземній біомасі	у загальній біомасі	
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]						
1	0,64	0,27	0,91	0,23	1,14	4,17
2	1,74	0,72	2,46	0,72	3,18	11,63
3	4,39	1,96	6,35	1,86	8,21	30,11
4	10,40	7,51	17,91	5,37	23,28	85,36
5	16,47	13,80	30,27	8,83	39,10	143,36
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]						
1	0,40	0,20	0,60	0,18	0,78	2,86
2	1,30	0,63	1,93	0,57	2,50	9,13
3	5,34	2,85	8,19	2,42	10,61	38,90
4	7,39	6,08	13,47	4,02	17,49	64,11
5	10,23	12,51	22,74	6,88	29,62	108,57

Таблиця 2

Динаміка киснепродуктивності павловнії на її плантаціях

Рік вирощування	Загальний обсяг біомаси, т га ⁻¹	Загальний обсяг продукування кисню, т га ⁻¹	Середньорічна киснепродуктивність, т га ⁻¹
Clone in vitro-112 [<i>Paulownia elongata</i> S.Y.Hu × <i>P. fortunei</i> (Seem.) Hemsl.]			
1	2,28	2,73	2,73
2	6,34	7,61	3,81
3	16,42	19,71	6,57
4	46,56	55,87	13,97
5	78,20	93,84	18,77
Павловнія повстиста [<i>P. tomentosa</i> (Thunb.) Steud.]			
1	1,56	1,87	1,87
2	4,98	5,98	2,99
3	21,22	25,46	8,49
4	34,97	41,97	10,49
5	59,22	71,07	14,21

біомаси, можуть дати значно менший прибуток — всього 4,22 євро-га⁻¹ [29].

Матеріали та методи досліджень.

Об'єктом наших досліджень була плантація павловнії, створена М. Я. Гументиком в сприятливих умовах середмістя м. Києва, де рослини павловнії захищені від надмірних коливань температури (особливо в зимовий період), вологості повітря та ґрунту. На цій плантації вирощуються рослини "Clone in vitro –112" [*Paulownia elongata* S, Y, Hu × *P. fortunei* (Seem.) Hemsl.] та павловнії повстистої [*P. tomentosa* (Thunb.) Steud.]. Схема розміщення рослин павловнії 4 × 4 м, що відповідає густоті садіння 625

шт-га⁻¹. Дослідження біопродуктивності культиварів павловнії на цій плантації проведено Гументиком М. Я. та Бродусь О. Ю. [4].

Для визначення вуглецепоглиальної здатності та киснепродуктивності павловнії використано апробовані методи [8, 9], які базуються на даних щодо обсягів накопичення окремих фракцій біомаси деревних рослин.

Надземну біомасу (Above Ground Biomass) визначали за формулою:

$AGB (т/га) = SB + BLB$, де SB (Stem Biomass) — фітомаса стовбура, BLB (Branch and Leave Biomass) — фітомаса гілок і листя.

Для оцінки підземної біомаси (Below Ground Biomass) надземна біомаса множилася на коефіцієнт 0,25 [9]:

$$BGB \text{ (т/га)} = AGB \times 0,25$$

Загальна біомаса (Total Biomass)

обчислювалася шляхом додавання біомаси всіх компонентів (підземної та надземної):

$$TB \text{ (т/га)} = AGB + BGB$$

Депонований вуглець (Carbon

Stock) оцінювався шляхом множення величини біомаси на концентрацію вуглецю (CF), яка приймається рівною 0,50 [8]:

$$CS \text{ (т/га)} = TB \text{ (т/га)} \times CF$$

Оцінка секвестрації діоксиду вуглецю (CO₂) здійснювалася шляхом множення запасу вуглецю на коефіцієнт 44/12 [9]:

$$CO_2 \text{ sequestration (т/га)} = \text{Carbon stock (т/га)} \times (44/12)$$

Для оцінки виходу енергії із біомаси використовували значення питомої теплоти згорання біомаси павловнії повстистої (19,71 МДж кг⁻¹) [34] та клонів павловнії (19,50 МДж кг⁻¹) [30].

Результати досліджень та їх обговорення. Як бачимо із табл. 1 і 2, павловнія Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S. Y. Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.] та павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.] характеризуються досить високою продуктивністю біомаси вже в перші роки культивування.

При цьому потенціал біопродуктивності клону гібриду є дещо вищим упродовж майже всього 5-річного циклу вирощування. Так, у однорічному віці павловнія Clone in vitro-112 продукувала 2,28 т-га⁻¹ сухої загальної біомаси, а павловнія повстиста — лише 1,56 т-га⁻¹, тобто на 31,6% менше, а на п'ятирічній плантації ця різниця становила 18,98 т-га⁻¹ або 24,3%. Лише на трирічній плантації павловнія повстиста мала більший запас біомаси, переважно за рахунок нарощування за поточний період більшої фітомаси гілок та листя. Імовірно, це відбулося завдяки специфічній позитивній нормі реакції цього виду павловнії на особливі погодні умови третього року вирощування, який характеризувався високим значенням ГТК (2,3) впродовж травня місяця [4]. Якщо ж аналізувати фракційну структуру накопиченої біомаси павловнії, то для обох видів характерною є подібна закономірність — у перші три роки частка стовбурової біомаси перевищує 50% загальної біомаси, починаючи з четвертого року вирощування більша частка уже належить іншим фракціям (гілкам, листю і кореням).

З табл. 1 видно, що обсяги депоновання вуглецю окремими фракціями фітомаси павловнії при збільшенні віку плантації зростають прискорено, що спонукало нас у процесі специфікації моделі зробити припущення, що найадекватніше вікову динаміку вуглецепоглиняльної здатності павловнії описуватиме поліном другого ступеня або експоненціальною регресією.

Побудовані графіки регресійних моделей поліномів другого ступеня

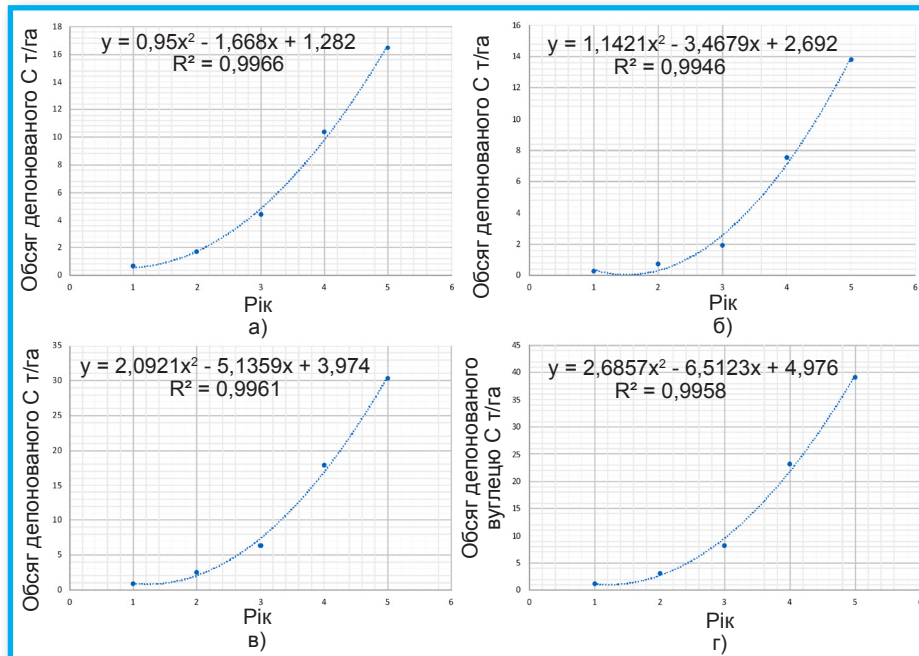


Рис. 1. Моделі динаміки вуглецепоглиняльної здатності окремих фракцій фітомаси Clone in vitro-112

Залежна змінна — обсяг депонованого вуглецю в:

а) у стовбуровій деревині, б) в гілках і листі, в) в надземній фітомасі, г) в загальній фітомасі

Таблиця 3

Критерії якості побудованих регресійних моделей (поліномів другого ступеня) динаміки вуглецепоглиняльної здатності павловнії

№ мо- делі	Модель	R2	F-критерій Фішера		Значущість параме- трів моделі, p <		
			зна- чення	p <	a0	a1	a2
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]							
1	Y1 = 1,274 – 1,664X + 0,949X2	0,997	298,4	0,0033	0,3874	0,2011	0,0224
2	Y2 = 2,694 – 3,470X + 1,142X2	0,995	184,5	0,0054	0,1713	0,0714	0,0191
3	Y3 = 3,968 – 5,133X + 2,092X2	0,996	259,5	0,0038	0,2304	0,1016	0,0187
4	Y4 = 4,972 – 6,512X + 2,686X2	0,996	237,5	0,0042	0,2550	0,1131	0,0207
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]							
5	Y1 = - 1,856 + 1,770X + 0,134X2	0,979	46,1	0,0212	0,4156	0,3305	0,6144
6	Y2 = 1,946 – 2,574X + 0,930X2	0,997	320,7	0,0031	0,1514	0,0588	0,0129
7	Y3 = 0,090 – 0,805X + 1,064X2	0,995	183,6	0,0054	0,9687	0,6540	0,0519
8	Y4 = 0,191 – 1,128X + 1,140X2	0,995	185,7	0,0051	0,9485	0,6293	0,0505

Примітка: Залежна змінна — обсяг депонованого вуглецю в: Y1 - у стовбуровій деревині, Y2 - в гілках і листі, Y3 - в надземній фітомасі, Y4 - в загальній фітомасі. Незалежна змінна X — вік плантації.

(рис. 1) як візуально, так і формально (на основі високих значень коефіцієнтів детермінації, що близькі до значення 0,999), здавалося б адекватно описують динаміку депонування вуглецю в окремих фракціях фітомаси Clone in vitro-112 на плантаціях різного віку. Однак результати більш глибокого аналізу показали, що цей тип моделі (поліном другого ступеня) за додатковими критеріями якості не є найкращим для конкретної ситуації (див. табл. 3). Про це свідчать статистично незначущі параметри багатьох моделей. Внесені корективи в специфікацію моделей дозволили отримати серію більш адекватних експоненціальних регресійних рівнянь.

Такі моделі в аналітичній формі та критерії оцінки їх якості наведені в табл. 4. Як бачимо, майже всі моделі за використаними критеріями адекватно описують емпіричну динаміку проаналізованих показників вуглецепоглиняльної здатності та киснепродуктивності павловнії. Моделі показують, що впродовж перших п'яти років вирощування плантацій як Clone in vitro-112, так і павловнії повстистої спостерігається не лінійне, а експоненціальне зростання вищезгаданих показників, тобто їх збільшення із прискоренням. Швидкість зростання показників за один рік відображається в цих моделях коефіцієнтом b . Таким чином, щорічний темп приросту обсягів депонування вуглецю в деревині павловнії становить 82,2 і 82,8%, у гілках і листі дещо вищий — 102,1 і 105,4%, а у загальній фітомасі — 90,6 і 92,2% (перші значення стосуються Clone in vitro-112, другі — павловнії повстистої).

Загальна киснепродуктивність павловнії на плантації також в перші 5 років збільшується із прискоренням (табл. 5). Швидкість таких змін є досить високою — 90,7% Clone in vitro-112 і 92,2% у павловнії повстистої. Значно меншими темпами змінюється середньорічна киснепродуктивність. Так, у Clone in vitro-112 вона щороку збільшується на 51,6%, а у павловнії повстистої — 53,1%.

Інтерес до видів і гібридів павловнії як джерела біопалива, тобто важливого виду ресурсних екосистемних послуг (provisioning services), виник зовсім недавно — на початку поточного століття. Є думка, що, маючи при високій швидкості росту низьку щільність деревини, біомаса павловнії є недостатньо ефективним паливом. Так, порівняння пелет, вироблених із біомаси молодих плантацій *P. elongata* × *P. fortunei*, показало їх нижчу якість порівняно з пелетами *Pinus radiata* та *Eucalyptus nitens*

Критерії якості побудованих експоненціальних регресійних моделей ($Y = a \cdot e^{bx}$) вуглецепоглиняльної здатності павловнії

Таблиця 4

№ мо- делі	Модель	R2	F-критерій Фішера		Значущість параметрів моделі, p <		Критерій Дарбіна -Уотсона
			зна- чення	p <	a	b	
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]							
9	Y1 = 0,320□e0,828x	0,985	194,2	0,0008	0,0103	0,0008	1,66
10	Y2 = 0,097□e1,021x	0,991	324,0	0,0004	0,0011	0,0004	2,86
11	Y3 = 0,403□e0,899x	0,991	299,1	0,0004	0,0133	0,0004	2,10
12	Y4 = 0,508□e0,906x	0,989	275,6	0,0005	0,0334	0,0005	2,07
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]							
13	Y1 = 0,247□e0,822x	0,913	34,1	0,0113	0,0641	0,0113	1,50
14	Y2 = 0,082□e1,054x	0,978	134,8	0,0014	0,0037	0,0014	1,68
15	Y3 = 0,311□e0,921x	0,951	58,8	0,0046	0,0608	0,0046	1,56
16	Y4 = 0,403□e0,922x	0,952	59,6	0,0045	0,1053	0,0045	1,56

Примітка: Залежна змінна — обсяг депонованого вуглецю в: Y_1 - у стовбуровій деревині, Y_2 - в гілках і листі, Y_3 - в надземній фітомасі, Y_4 - в загальній фітомасі. Незалежна змінна X — вік плантації.

Критерії якості побудованих експоненціальних регресійних моделей ($Y = a \cdot e^{bx}$) динаміки киснепродуктивності павловнії

Таблиця 5

№ мо- делі	Модель	R2	F-критерій Фішера		Значущість параметрів моделі, p <		Критерій Дарбіна -Уотсона
			зна- чення	p <	a	b	
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]							
17	Y1 = 1,215□e0,907x	0,989	275,0	0,0005	0,3601	0,0005	2,06
18	Y2 = 1,510□e0,516x	0,981	151,6	0,0011	0,0591	0,0011	2,65
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]							
19	Y1 = 0,964□e0,922x	0,952	59,5	0,0045	0,9320	0,0045	1,56
20	Y2 = 1,197□e0,531x	0,935	42,8	0,0073	0,5524	0,0073	2,13

Примітка: Залежна змінна — Y_1 - загальна киснепродуктивність, Y_2 - середньорічна киснепродуктивність.

[25]. Проте в іншому дослідженні, в якому оцінювалась якість брикетів і пелет із тирси, було отримано задовільний енергетичний ефект для *P. tomentosa* і *P. elongata* [28]. Калорійність біомаси павловнії близька до фітомаси енергетичних видів, які вже вирощуються в Європі. Протестовані гібриди (9501 і Shan Tong) дали лише трохи нижчу високу те-

плотворну здатність 19,5 МДж·кг⁻¹ (гібрид 9501) і 19,6 МДж·кг⁻¹ (Shan Tong), ніж верба (19,9 МДж·кг⁻¹) і тополя (19,8 МДж·кг⁻¹) [30]. Подібні значення були оприлюднені Zachar et al. [34] для *P. tomentosa* — 19,71 МДж·кг⁻¹. Згідно з результатами досліджень Lopez F., теплотворна здатність біомаси павловнії 20,3 МДж·кг⁻¹. Це дещо вище, ніж

Таблиця 6
Компаративістський аналіз енергетичної ємності біоенергетичних культур

Культура	Продуктивність сухої біомаси, т·га ⁻¹	Теплота згоряння, МДж·м ⁻³	Виробництво тепла, Гкал·га ⁻¹
Павловнія	20	15,0	62,5
Верба	15	13,0	42,8
Тополя	12	14,0	34,2
Міскантус	25	16,0	80,0
Просо прутіоподібне	18	15,5	57,0

Джерело: складено на основі [7].

Таблиця 7
Динаміка біоенергетичної продуктивності павловнії на її плантаціях

Рік вирощування	Надземна біомаса, т·га ⁻¹	Вихід енергії, ГДж·га ⁻¹	Вихід умовного палива, т·га ⁻¹
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]			
1	2,28	44,5	1,5
2	6,34	123,6	4,2
3	16,42	320,2	10,9
4	46,56	907,9	31,0
5	78,20	1524,9	52,0
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]			
1	1,56	30,7	1,0
2	4,98	98,2	3,4
3	21,22	418,2	14,3
4	34,97	689,3	23,5
5	59,22	1167,2	39,8

Таблиця 8
Критерії якості побудованих експоненціальних регресійних моделей ($Y = a \cdot e^{bx}$) динаміки біоенергетичної продуктивності павловнії (залежна змінна – вихід енергії, ГДж·га⁻¹, незалежна – рік вирощування плантації)

№ мо- делі	Модель	R2	F-критерій Фішера		Значущість параметрів моделі, p <		Критерій Дарбіна -Уотсона
			зна- чення	p <	a	b	
Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S.Y.Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.]							
21	Y = 19,79□e0,909x	0,989	276,2	0,0005	0,0005	0,0005	2,07
Павловнія повстиста [P. tomentosa (Thunb.) Steud.]							
22	Y = 15,83□e0,922x	0,952	59,6	0,0045	0,0061	0,0045	1,56

для листяної деревини, трохи вище, ніж для Pinus pinaster і м'якої деревини, і набагато вище, ніж для залишків харчових рослин і сільськогосподарських культур. Все це підтверджує доцільність використання роду Paulownia як енергетичної культури [19].

Економічне та біоенергетичне значення павловнії зростає в міру того, як з'являються нові напрями її використан-

ня та пов'язані з нею продукти. Тому фітомаса павловнії об'єднується розглядається як лігноцелюлозна сировина для виробництва біоетанолу на південному сході США [32].

Біоенергетична цінність біомаси павловнії підтверджується також даними табл. 6, у якій порівнюється енергетична продуктивність найбільш поширених біоенергетичних рослин.

Результати нашого дослідження, які представлені (табл. 7), підтверджують гіпотезу, що в біомасі павловнії акумулюються значні запаси енергії, які з віком плантації можуть збільшуватися прискореним темпом. Так, на однорічній плантації ці запаси становили в залежності від виду павловнії — 30,7 ГДж·га⁻¹ і 44,5 ГДж·га⁻¹, а на п'ятирічній — відповідно, 1167,2 та 1524,9 ГДж·га⁻¹. Побудовані регресійні моделі (табл. 8) показують, що щорічна швидкість такого збільшення є досить значною — 90,9% у павловнії Clone in vitro-112, і 92,2% на плантації павловнії повстистої.

Висновки. Плантації павловнії потрібно розглядати як важливе й ефективне джерело різноманітних регуляторних та ресурсних екосистемних послуг. Павловнія Clone in vitro-112 і павловнія повстиста характеризуються швидкими темпами накопичення усіх компонентів підземної та надземної біомаси, серед яких у перші три роки переважає стовбурова фітомаса, а також відзначаються високою вуглецепоглиняльною та значною киснетвірною здатностями. Динаміка цих показників упродовж п'ятирічного періоду культивування цих сортів павловнії найадекватніше описується експоненціальною функцією. Згідно побудованих моделей, щорічний темп приросту обсягів депонування вуглецю в деревині павловнії становить, відповідно, для Clone in vitro-112 і павловнії повстистої 82,2 і 82,8%, у гілках і листі — 102,1 і 105,4%, а у загальній фітомасі — 90,6 і 92,2%. Загальна киснепродуктивність павловнії на плантації також у перші 5 років збільшується із прискоренням. Швидкість таких змін є досить високою — 90,7% у Clone in vitro-112 і 92,2% у павловнії повстистої.

У біомасі павловнії акумулюються значні запаси енергії, які з віком плантації збільшуються також прискореним темпом. На п'ятирічній плантації біоенергетична продуктивність павловнії повстистої становить 1167,2 ГДж·га⁻¹, а Clone in vitro-112—1524,9 ГДж·га⁻¹. Враховуючи вищу ефективність генерування розглянутих екосистемних послуг, а також стерильність рослин павловнії Clone in vitro-112, саме цей гібрид варто рекомендувати для ширшого культивування в умовах України.

Фінансування досліджень. Статтю підготовлено у межах реалізації проекту з виконання наукового дослідження і розробки 2021.01/0416 «Впровадження кліматично-нейтральних інновацій в управління аграрним природокористуванням у контексті еколого-енергетичної безпеки України» за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України.

REFERENCES

- Bordus, O. Y., & Humentyk, M. Y. (2023). Improvement of Paulownia cultivation technology as a raw material for biofuel production. II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference «Innovative Environmentally Friendly Technologies of Crop Production in Wartime Conditions.» August 31, 2023, Bila Tserkva. BCAU, pp. 36–38.
- Duralov, D. M., Tazabekov, A. Ch., Mirzaev, A. U., Nurbayev, K. M., Istablyaev, F. F., & Kurbunova, Sh. R. (2019). Advantages of Paulownia plantation cultivation experience of the Bulgarian company «Paulownia BG». International Conference of Young Scientists «Science and Innovation.» Tashkent, pp. 29–31.
- García-Morote, F. A., López-Serrano, F. R., Martínez-García, E., Andrés-Abellán, M., Dadi, T., Candel, D., Lucas-Borja, M. E. (2014). Stem biomass production of *Paulownia elongata* × *P. fortunei* under low irrigation in a semi-arid environment. *Forests*, 5(10), 2505–2520.
- Humentyk, M. Y., & Bordus, O. Y. (2023). Features of growth, development, and chemical composition formation of Paulownia biomass. *Novitri Aghrotechnologii*, 11(3).
- Humentyk, M., Bordus, O., Fuchylo, Y., Atamaniuk, O., Zatserkovna, N., & Yakymenko, O. (2023). Prospects for Paulownia cultivation in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Bulletin of Malyn Professional College*, (2), 19–28.
- Humentyk, M. Y., & Yabolnyk, O. O. (2020). Paulownia — a high-yielding crop for biofuel and timber production. *Bioenergetyka*, (2), 6–8.
- Iesipov, O., Polyashenko, S., & Sorokin, S. (2023). Paulownia as a renewable energy source. Modern engineering and innovative technologies. (25–01). 48–53.
- IPCC (1996). Land use change and forestry. In Revised. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. The Institute for Global Environmental Strategies (IGES). URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- Ivaniuk, A. P., Zayachuk, V. Y., Kharachko, T. I., Kolodiy, T. V., & Myakush, B. M. (2021). Physical properties of Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud. wood. *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 31(4), 71–75.
- Ivaniuk, A. P., Zayachuk, V. Y., Lysiuk, R. M., & Darmohray, R. Y. (2023). Prospects for the use of Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud. wood. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. The series: Agronomy and Biology*, 52(2), 38–46.
- Jakubowski, M., (2022). Cultivation potential and uses of Paulownia wood: A review. *Forests*, 13(5), 668.
- Jiménez L., Rodríguez A., Ferrer J. L., Pérez, A., & Angulo, V. Paulownia. a Fast Growing Plant. as a Raw Material for Paper Manufacturing. *Afinidad*. Vol. 62. No. 516. 2005. pp. 100–105.
- Joshi, N. R., Karki, S., Adhikari, M. D., Udas, E., Sherpa, S., Karki, B. S., Ning, W. (2015). Development of Allometric equations for Paulownia tomentosa to estimate biomass and carbon stocks: an assessment from ICIMOD Knowledge Park. Godavari. Nepal (p. 38). ICIMOD Working Paper 2015/10.
- Karpuk, L. M., & Titarenko, V. A. (2023). Dry matter and chlorophyll content in Paulownia plants of different vegetation years in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine. *Scientific Papers of the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beets*, (31), 38–46.
- Klymenko, L. O., & Myronenko, I. V. (2020). Introduction and adaptation of Paulownia tomentosa in educational and research plots of secondary schools in Mykolaiv region (regional ecological project). *Innovatika v Osviti*, September (1), 75–79.
- Kozakiewicz, P., Laskowka, A., & Ciolek, S. (2020). A Study of Selected Features of Shan Tong Variety of Plantation Paulownia and Its Wood Properties. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. SGGW. Forestry and Wood Technology* 111: 116–123. URL: <https://www.researchgate.net/publication/348761752>
- Linnik, A. (2020). Paulownia as power culture. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Agricultural Sciences*, 22(92), 19–22.
- López, F., Pérez, A., Zamudio, M. A., De Alva, H. E., & García, J. C. (2012). Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. *Biomass and Bioenergy*, 45, 77–86.
- Magar, L., B., Khadka, S., Joshi, J. R. R., Pokharel, U., Rana, N., Thapa, P., & Parajuli, N. (2018). Total biomass carbon sequestration ability under the changing climatic condition by Paulownia tomentosa Steud. *International Journal of Applied Sciences and Biotechnology*, 6(3), 220–226.
- Makukh, Y. P., Remenyuk, S. O., Riznyk, V. M., & Moshkivska, S. V. (2022). The influence of weeds on the growth and development of Paulownia. *Bioenergetyka*, (1–2), 45–47.
- Martenyuk, H. M., Borysevykh, L. V., & Buhaienko, R. V. (2021). Paulownia — a promising tree species. Aspects of Sustainable Development of Forestry, Agriculture, Water, and Energy Management in the Polissya Zone of Ukraine: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference (April 11, 2021), Zhytomyr, p. 120.
- Matskevych, O. V., & Lisovy, M. M. (2023). Features of in vitro propagation of Paulownia hybrid. VI International Scientific and Practical Conference «Biotechnology: Achievements and Hopes» (Dedicated to the 120th Anniversary of NUBiP of Ukraine), p. 218.
- Olave, R., Forbes, G., Muñoz, F., & Lyons, G. (2015). Survival, early growth and chemical characteristics of Paulownia trees for potential biomass production in a cool temperate climate. *Irish Forestry*, Vol. 72, 42–57.
- Pegoretti Leite de Souza, H.J., Muñoz, F., Mendonça, R.T.; Sáez, K.; Olave, R.; Segura, C.; de Souza, D.P.L.; de Paula Protásio, T.; Rodríguez-Soalleiro, R. Influence of Lignin Distribution, Physicochemical Characteristics and Microstructure on the Quality of Biofuel Pellets Made from Four Different Types of Biomass. *Renew. Energy* 2021, 163, 1802–1816.
- Podhayetskyi, A. A., Matskevych, V. V., Filipova, L. M., Kravchenko, N. V., & Karpuk, L. M. (2022). Optimization of Paulownia (Paulownia Siebold & Zucc.) in vitro cultivation technology. *Journal of Native and Alien Plant Studies*, (18), 191–208.
- Roik, M., Kovalchuk, N., & Humentyk, V. (2023). Features of Paulownia hybrid propagation in vitro and methods of transferring plantlets to soil conditions. *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference «Innovative Development of Agriculture on the Basis of Ecological and Economic Balance.» Rivne*, pp. 113–114. Domínguez, E., Román, A., Domínguez, L., & Garrote, G. (2017). Evaluation of strategies for second generation bioethanol production from fast growing biomass Paulownia within a biorefinery scheme. *Applied Energy*, 187, 777–789.
- Spirchez, C., Japalela, V., Lunguleasa, A.; Buduroi, D. (2021). Analysis of Briquettes and Pellets Obtained from Two Types of Paulownia (Paulownia tomentosa and Paulownia elongata) Sawdust. *BioResources*, 16, 5083–5095.
- Testa, R., Schifani, G., Rizzo, G., & Migliore, G. (2022). Assessing the economic profitability of Paulownia as a biomass crop in Southern Mediterranean area. *Journal of Cleaner Production*, 336, 130426.
- Vusić, D.; Migalić, M.; Zečić, Ž.; Trkmić, M.; Bešlić, A.; Drvodelić, D. Fuel Properties of Paulownia Biomass. In *Proceedings of the Natural Resources, Green Technology and Sustainable Development/3-GREEN*, Zagreb, Croatia, 5–8 June 2018; pp. 126–130. URL: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:838890> (accessed on 22 April 2022).
- What are the Sustainable Development Goals? URL: <https://www.undp.org/ukraine/sustainable-development-goals>
- Yadav, N. K., Vaidya, B. N., Henderson, K., Lee, J. F., Stewart, W. M., Dhekney, S. A., & Joshee, N. (2013). A review of Paulownia biotechnology: A short rotation, fast growing multipurpose bioenergy tree. *American Journal of Plant Sciences*, 4(11), 2070–2082.
- Yadav, N., Rakholia, S., & Yosef, R. (2024). Decision Support Systems in Forestry and Tree-Planting Practices and the Prioritization of Ecosystem Services: A Review. *Land*, 13(2), 230.
- Zachar, M.; Lieskovský, M.; Majlingová, A.; Mitterová, I. Comparison of Thermal Properties of the Fast-Growing Tree Species and Energy Crop Species to Be Used as a Renewable and Energy-Efficient Resource. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2018, 134, 543–548.
- Zuazo, V. H. D., Bocanegra, J. A. J., Torres, F. P., Pleguezuelo, C. R. R., & Martínez, J. R. F. (2013). Biomass yield potential of paulownia trees in a semi-arid Mediterranean environment (S Spain). *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(4), 789–793.

АНОТАЦІЯ.

УДК 630*165:502.55:631.95

Потенціал екосистемних послуг плантації павловнії в Україні: моделювання вікової динаміки

В. Я. Брич, Ю. І. Гайда, Я. Д. Фучило, В. М. Гументик, А. М. Шувар, О. В. Борисяк

У статті наведено результати кількісної оцінки потенціалу депонування вуглецю, секвестрування вуглекислого газу, киснепродуктивності та біоенергетичної продуктивності павловнії Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S. Y. Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.] і павловнії повстистої [P. tomentosa (Thunb.) Steud.] впродовж перших п'яти років культивування на плантації у середмісті м. Києва. Встановлено, що у сприятливих умовах павловнія може генерувати значні обсяги ресурсних і регуляторних екосистемних послуг. П'ятирічні плантації павловнії повстистої і Clone in vitro-112 депонували, відповідно, 29,62 і 39,10 т С на 1 га, секвестрували 108,57 і 143,36 т CO₂ на 1 га, продукували 14,21 і 18,77 т кисню на 1 га. Біоенергетична продуктивність таких плантацій також є достатньо високою — відповідно, 1167,2 і 1524,9 ГДж/га-1. Динаміка обсягів екосистемних послуг у перші п'ять років культивування є висхідною й адекватно апроксимується моделями експоненціальної регресії. Враховуючи вищу біопроductivність та низьку інвазійну здатність через стерильність насіння, сорт павловнії Clone in vitro-112 рекомендовано до ширшого культивування в Україні.

Ключові слова: павловнія, депонування вуглецю, киснепродуктивність, біопаливо, екосистемні послуги

ABSTRACT

Potential of Ecosystem Services of Paulownia Plantations in Ukraine: Modeling Age Dynamics

Brych V., Hayda Yu., Fuchylo Ya., Humentyk V., Shuvar A., Borysiak O.

The article presents the results of a quantitative assessment of the carbon deposition potential, carbon dioxide sequestration, oxygen production, and bioenergetic productivity of Paulownia Clone in vitro-112 [Paulownia elongata S. Y. Hu × P. fortunei (Seem.) Hemsl.] and Paulownia tomentosa [(Thunb.) Steud.] during the first five years of cultivation in a plantation located in the central part of Kyiv, Ukraine. The study demonstrates that under favorable conditions, Paulownia can generate substantial amounts of resource and regulatory ecosystem services. Five-year-old plantations of P. tomentosa and Clone in vitro-112 deposited 29.62 and 39.10 t C ha⁻¹, sequestered 108.57 and 143.36 t CO₂ ha⁻¹, and produced 14.21 and 18.77 t O₂ ha⁻¹, respectively. The bioenergetic productivity of these plantations was also relatively high, reaching 1167.2 and 1524.9 GJ ha⁻¹, respectively. The dynamics of ecosystem service provision over the first five years followed an upward trend and were well approximated by exponential regression models. Given its higher biomass productivity and low invasive potential due to seed sterility, the Paulownia Clone in vitro-112 cultivar is recommended for broader cultivation in Ukraine.

Keywords: Paulownia, carbon deposition, oxygen production, biofuel, ecosystem services