

УДК 662.9:630.3

Ю. І. Гайда,

д. с.-г. н., професор, професор кафедри аграрних технологій та лісового господарства,
Національний університет "Чернігівська політехніка"ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6019-9654>

Я. Д. Фучило,

д.с.-г.н., професор, головний науковий співробітник,
Інститут біоенергетичних культур та цукрового буряка НААН УкраїниORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2669-5176>

В. Я. Брич,

д. е. н., професор, директор Навчально-наукового інституту інноватики,
природокористування та інфраструктури, Західноукраїнський національний університетORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4277-5213>

А. М. Шувар,

д. с.-г. н., с. н. с., завідувач кафедри агробіотехнологій,
Західноукраїнський національний університетORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6016-0896>

Т. Ю. Гайда,

к. е. н., докторант, Західноукраїнський національний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-8772>

DOI: 10.32702/2306-6792.2024.13.21

БІОЕНЕРГЕТИЧНА ТА ВУГЛЕЦЕПОГЛИНАЛЬНА ПРОДУКТИВНІСТЬ КУЛЬТИВАРІВ ТОПОЛІ В УМОВАХ ЗАХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ

Yu. Hayda,

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Department
of Agrarian Technologies and Forestry, Chernihiv Polytechnic National University

Ya. Fuchylo,

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Chief Researcher,
Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, National Academy of Sciences of Ukraine

V. Brych,

Doctor of Economics, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute
of Innovation, Nature Management and Infrastructure, West Ukrainian National University

A. Shuvar,

Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Agrobiotechnologies,
West Ukrainian National University

T. Haida,

PhD in Economics, Doctoral candidate, West Ukrainian National University

BIOENERGETIC AND CARBON-ABSORBING PRODUCTIVITY OF POPLAR CULTIVARS IN THE CONDITIONS OF THE WESTERN FOREST STEPPE

У статті наведено результати 15-річного випробування 19 культиварів тополі української та зарубіжної селекції в умовах Західного Лісостепу України. Зазначена важлива роль плантацій сортів тополі як джерел виробництва альтернативних видів біопалива та надання важливих екосистемних послуг (секвестрування викидів парникових газів, зокрема діоксиду вуглецю). Кількісно оцінено параметри росту деревостанів різних культиварів тополі, а також запаси стовбурової деревини. Визначено обсяги надземної та підземної фітомаси культиварів тополі, їх енергопро-

дуктивність та запаси депонованого вуглецю. Відзначена і кількісно оцінено внесок плантацій тополь у поглинання вуглекислого газу. Встановлено, що найбільш продуктивними у віці 15 років виявилися культивари Gerlica, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, I 214, Стрілоподібна, Дружба, обсяги загальної біомаси яких становлять 103,1—173,8 т·га⁻¹. Деревостани цих же культиварів найбільш інтенсивно депонують вуглець — від 51,6 до 86,9 т·га⁻¹, секвеструючи з атмосфери значні об'єми CO₂ (189,1—318,7 т·га⁻¹). Біомаса культиварів тополі є також надійним відновлювальним джерелом енергії, адже з надземної біомаси більшості із них можна отримати понад 1000 ГДж·га⁻¹, що замінює більше 34,1 т умовного палива.

Depletion of traditional fossil energy resources and the need to reduce greenhouse gas emissions in the face of global climate change stimulate the search for new renewable energy sources. One of the promising ways to solve this problem is the cultivation of fast-growing tree species for bioenergy needs and sequestration of carbon dioxide, in particular species and cultivars of poplar (*Populus* spp.). To date, three research centers of poplar species and varieties as promising sources of energy biomass have been formed in Ukraine: the Ukrainian Research Institute of Forestry and the Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet, Vinnytsia National Agrarian University. The article presents the results of a 15-year test of 19 poplar cultivars of Ukrainian and foreign selection in the conditions of the Western Forest Steppe of Ukraine on a collection plantation created in 2010 in the 17th quarter of the Ternopil Forestry of the former Ternopil Forest Enterprise (now the Kremenets Forestry Branch of the Podil Office of the State Enterprise "Forests of Ukraine"). The plantation is established in the type of forest vegetation conditions D2 (fresh and fertile soil). The important role of plantations of poplar varieties as sources of production of alternative types of biofuel and provision of important ecosystem services (sequestration of greenhouse gas emissions, in particular carbon dioxide) is indicated. Growth parameters of stands of different poplar cultivars, as well as trunk wood stocks, were quantitatively assessed. The amounts of above-ground and underground phytomass of poplar cultivars, their energy productivity and deposited carbon stocks were determined. The contribution of poplar plantations in the absorption of carbon dioxide was noted and quantified. It was established that the cultivars Gerlica, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, I 214, Strilopodibna, Druzhba, whose total biomass amounts to 103.1—173.8 t·ha⁻¹, were the most productive at the age of 15 years. The stands of the same cultivars deposit carbon most intensively — from 51.6 to 86.9 t·ha⁻¹, sequestering significant volumes of CO₂ from the atmosphere (189.1—318.7 t·ha⁻¹). The biomass of poplar cultivars is also a reliable renewable source of energy, as more than 1000 GJ·ha⁻¹ can be obtained from the above-ground biomass of most of them, which replaces more than 34.1 t of conditional fuel.

Ключові слова: біоенергетика, зміни клімату, культивари тополі, вуглецепоглиняльна здатність, секвестрування діоксиду вуглецю.

Key words: bioenergy, climate change, Poplar cultivars, carbon sequestration capacity, carbon dioxide sequestration.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Енергетична криза, пов'язана із виснаженням традиційних викопних енергетичних ресурсів, та необхідність зменшення викидів парникових газів в умовах глобальних змін клімату стимулюють пошук нових відновлюваних джерел енергії. Одним з перспективних напрямків вирішення цієї проблеми є вирощування швидкорослих деревних порід для біоенергетичних потреб та секвестрування вуглекислого газу. Особливу увагу привертає тополя (*Populus* spp.), яка відзначається високою швидкістю росту та значною здатністю до накопичення фітомаси [18]. В умовах України, зокрема в її західному регіоні, культивари тополі володіють значним потенціалом щодо їх використання в еколого-енергетичних програмах. Не менш важливу роль плантації культиварів тополі можуть відігравати як депозитарії атмосферного вуглецю, зменшуючи таким чином концентрацію в атмосфері одного із найважливіших парникових газів — діоксиду вуглецю.

Для виявлення і оцінки біоенергетичного та вуглецепоглиняльного потенціалів тополь актуальним науковим завданням є експериментальне випробування їх сортів (культиварів) в конкретних лісорослинних умовах та природних зонах України.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

В Україні загальна площа насаджень різних видів та сортів тополі у лісовому фонді Державного агентства лісових ресурсів станом на початок 2011 року становила понад 65 тис. га [4], а автохтонними є три види тополі: тополя чорна (*P. nigra* L.), тополя біла (*P. alba* L.) і тремтяча (*P. tremula* L.). У світі серед численних видів роду Тополь найбільше для створення біоенергетичних плантацій використовуються чорні тополі (*Aigerios* Duby.), бальзамічні тополі (*Tasamahaca* Spach) та євроамериканські гібриди чорних тополь (*Populus* × *euramericana* (Dode) Guinier) [5]. Крім названих видів, знач-

ний інтерес для плантаційного лісовирощування і отримання енергетичної біомаси мають тополя дельтовидна (*P. deltoides* Marsh.) і її гібриди з тополею чорною, які отримали статус сортів (культivarів) — *Marilandica*, *Robusta*, *Serotina*, *Gelrica*, *Regenerata*, *I-214*, *I-45/51* [20].

Тополі за біометричними показниками є деревами першої величини, які у віці стиглості можуть досягати висоти 40-45 м та діаметра стовбура на висоті грудей — 1,5-2,0 м [14]. Тому зазвичай деревостани різних видів тополь характеризуються значними запасами стовбурової деревини. Так, в Україні в природних умовах спостерігається помітна диференціація запасів осокорових (чорнотополевих) деревостанів в різних фізико-географічних зонах та едатопах. У зоні мішаних лісів Полісся фактичні максимальні показники запасу відзначено у віці 45 років в умовах C_3 ($337 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) і C_2 ($315 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$), у зоні широколистяних лісів Лісостепу — у насадженнях X—XI класів віку в умовах вологого грудю ($259 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$), у Степу — у деревостанах X—XIII класів віку у вологому груді ($279 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$) [3].

В Україні на сьогоднішній день сформувався три центри дослідження видів і сортів тополь як перспективних джерел отримання енергетичної біомаси: Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації [2, 9, 15, 17], Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків [18, 19], Вінницький національний аграрний університет [7, 16]. Найпродуктивнішою науковою школою, яка спеціалізується, зокрема, на дослідженні біопродуктивності та вуглецепоглиальної здатності лісових деревних порід є школа проф. П.І. Лакиди в Національному університеті біоресурсів та природокористування [1, 10, 11, 12, 13].

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою статті є висвітлення результатів кількісної оцінки продуктивності культиварів тополі в умовах Західного Лісостепу України на основі їх багаторічного випробування на колекційній плантації та визначення найбільш продуктивні культиварів для подальшого використання в біоенергетичних програмах та заходах з пом'якшення змін клімату.

Таблиця 1. Таксономічна характеристика культиварів тополі в колекційній плантації в Тернопільському лісництві Філії "Кременецьке лісове господарство"

Культивар	Належність до виду	Латинська назва
Gelrica	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Gerlica'
Blanc du Poitou	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Blanc du Poitou'
Rochester	Гібрид між тополею бальзамічною і чорною	<i>P. nigra</i> x <i>P. Maximowiczii</i> Henry, cv. 'Rochester'
Vereecken	Тополя чорна	<i>Populus nigra</i> L. cv. 'Vereecken'
Dorskamp	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Dorskamp'
Robusta	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Robusta'
Marilandica	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Marilandica'
Sun Giorgio	Тополя чорна	<i>Populus nigra</i> L. cv. 'Sun Giorgio'
Heidemij	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Heidemij'
Ghoy	Тополя чорна	<i>Populus nigra</i> L. cv. 'Ghoy'
Serotina	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Serotina'
Tardif de Champagne	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Tardif de Champagne'
Ijzer - 5	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'Ijzer - 5'
I 45/51	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'I 45/51'
I 214	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier cv. 'I 214'
Новоберлінський	Гібрид тополі пірамідальної	<i>Populus pyramidalis</i> Rosier x <i>Populus laurifolia</i> Ldb.
Стрілоподібна	Гібрид тополі дельтовидної та пірамідальної	<i>P. x euramericana</i> (Dode) Guinier x <i>P. Pyramidalis</i> Rosier
Дружба	Гібрид тополі волосистоплідної та лавролистої	<i>Populus trichocarpa</i> Torr. & Gray x <i>Populus laurifolia</i> Ldb.
Тронко	Євро-американський гібрид тополі чорної	<i>Populus x euramericana</i> (Dode) Gunier

Джерело: сформовано авторами.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проведені на базі колекційної плантації культиварів тополі, створеної у 2010 році у 17 кварталі Тернопільського лісництва колишнього Тернопільського лісгоспу (нині Філія "Кременецьке лісове господарство" Подільського офісу ДП "Ліси України"). Плантація закладена в типі лісорослинних умов D_2 (свіжій діброві), тобто на ділянці з багатими ґрунтами і помірним їх зволоженням. Схема розміщення рослин: відстань між рядами — 2 м, відстань між садивними місцями у ряду — 1 м. Кількість висаджених вкорінених живців одного культивару — 35.

Коротка характеристика культиварів тополі, які випробовуються на колекційній плантації, наведена у табл. 1.

Для кількісної оцінки вуглецепоглиальної здатності культиварів тополі використовувалася наступна модель (рис. 1).

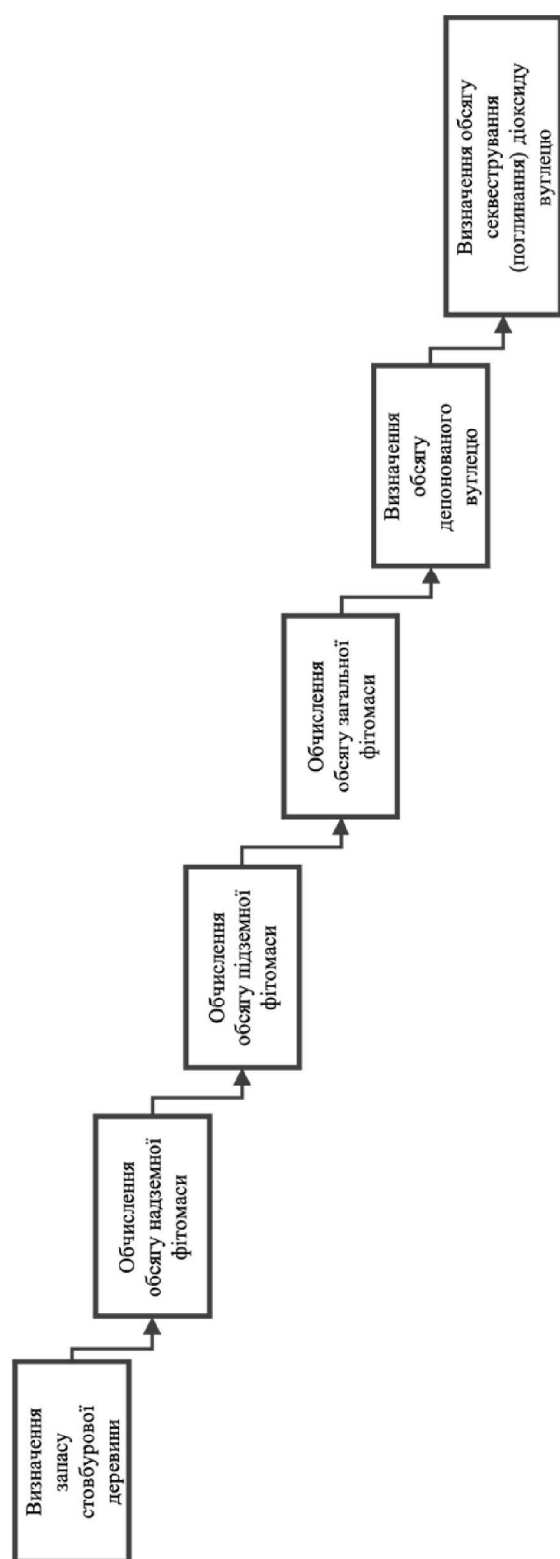


Рис. 1. Модель кількісної оцінки вуглецепоглиняльної здатності культиварів тополі

Кількісна оцінка біоенергетичної продуктивності культиварів тополі проводилася згідно наступної моделі (рис. 2).

Нижче наведено алгоритми розрахунків окремих елементів вищенаведених моделей. Визначення запасів стовбурової деревини проводилися за загальноприйнятими у лісовій таксації методиками — обмірялися діаметри стовбура на висоті 1,3 м, висота дерев за допомогою висотоміра "Forestry Pro II", обраховувалися площа перерізів стовбурів, видові числа.

Для оцінки виходу енергії із біомаси тополь використовували середнє значення питомої теплоти згорання біомаси тополі (18,53 КДж/г), визначеної для 19 культиварів тополі [8].

Надземну біомасу (Above Ground Biomass) визначали за допомогою формули [24]:

$$AGB \text{ (т/га)} = \text{Запас (м}^3\text{)} \times WD \times BEF,$$

де WD (Wood Density) — базисна щільність деревини (для тополі — 0,440 т·(м³)⁻¹).

BEF (Biomass Expansion Factor) — коефіцієнт "розширення" біомаси, який забезпечує визначення усіх елементів надземної біомаси, окрім стовбураз корою, також листя і гілок [21, 23]. В нашому дослідженні використовувалося значення 1,37 [6].

Для оцінки підземної біомаси (Below Ground Biomass) надземна біомаса множилася на коефіцієнт 0,25 [23]:

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

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 [22]:

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

Оцінка секвестрації діоксиду вуглецю (CO₂) здійснювалася шляхом множення запасу вуглецю на коефіцієнт 44/12 [23]:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 \text{ sequestration (т/га)} &= \\ &= \text{Carbon stock (т/га)} \times (44/12). \end{aligned}$$

У табл. 2 наведено характеристику росту і збереженості дерев культиварів тополі на дослідженій плантації. Як бачимо, найвищою збереженістю у 15-річному віці відзначаються наступні культивари — Gerlica, Rochester, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, Стрілоподібна та Дружба. Відсоток збережених рослин у них є більшим за 30 %. Найкращими за показниками росту у висоту та за діаметром середніх сортів виявилися Gerlica, Serotina, Ijzer 5, Стрілоподібна, дерева яких росли краще за середні показники на плантації. Інтенсивним

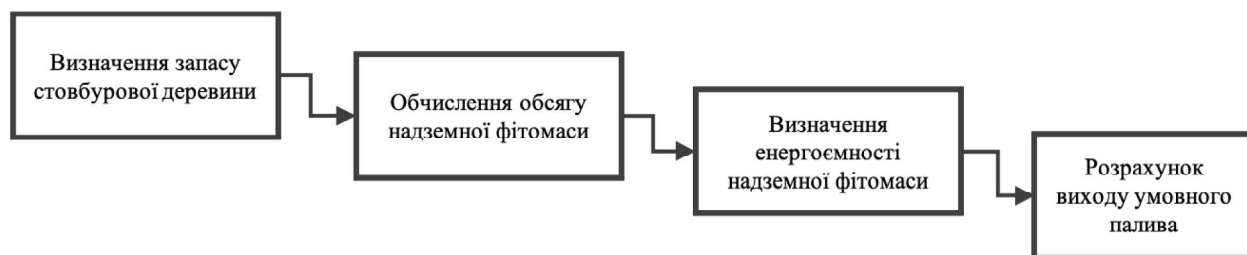


Рис. 2. Модель кількісної оцінки біоенергетичної продуктивності культиварів тополі

ростом характеризуються також рослини культиварів Robusta та I 214, однак їх збереженість є дещо нижчою (відповідно 20,0 % і 28,6 %). Найнижча збереженість характерна для рослин культиварів Blank du Poitou та Ghoy. Слабким ростом відзначаються дерева культиварів I 45/51, Blank du Poitou, Sun Giorgio.

Значна варіабельність збереженості рослин культиварів тополі та їх показників росту віці 15 років обумовила суттєву мінливість запасів стовбурової деревини — від 12,8 м³га⁻¹ у культивару Ghoy до 243,5 м³га⁻¹ в сорту Ijzer 5 (табл.3.) До високопродуктивних варіантів варто віднести також Gerlica, Serotina, Tardif de Champagne, I 214, Стрілоподібна, Дружба. Середньою продуктивністю відзначаються такі культивари: Rochester, Robusta, Marilandica, Новоберлінський. Дуже низькою збереженістю, а відповідно і низьким запасом стовбурової деревини характеризуються, окрім сорту Ghoy, також Blanc du Poitou, Sun Giorgio, I 45/51.

При розрахунку виходу енергії з деревини плантацій тополі ми враховували лише надземну біомасу (легше доступну для заготівлі), обсяги якої в розрізі культиварів варіюють аналогічно до запасів деревини. Відповідно і вихід енергії та умовного палива виявився найбільшим у культиварів з інтенсивним ростом та продуктивністю — Gerlica, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, I 214, Стрілоподібна, Дружба. Вихід енергії у цих сортів становить 1795,7 — 2719,7 ГДж·га⁻¹, що еквівалентно енергії від спалювання 61,2—92,7 т умовного палива. Для порівняння отриманих нами результатів використано дані проф. Василюшина Р.Д. щодо енергопродуктивності штучних деревостанів найвищої продуктивності ялини європейської, ялиці білої, бука лісового в насадженнях Українських Карпат [1]. Так, енергоемність надземної

Таблиця 2. Показники росту та збереженість культиварів тополі на колекційній плантації

Культивар	Середня висота, м	Середній діаметр стовбура, см	Збереженість, %
Gelrica	14,3	19,9	42,9
Blanc du Poitou	9,2	11,4	8,6
Rochester	12,6	12,8	31,4
Vereecken	13,2	10,2	28,5
Dorskamp	13,4	12,0	17,1
Robusta	15,1	14,3	20,0
Marilandica	13,5	17,6	17,1
Sun Giorgio	11,6	11,4	11,4
Heidemij	13,5	10,8	25,7
Ghoy	10,4	14,6	2,9
Serotina	13,9	13,9	31,4
Tardif de Champagne	12,2	15,7	31,4
Ijzer 5	13,6	15,3	40,0
I 45/51	9,6	9,9	14,3
I 214	15,7	15,4	28,6
Новоберлінський	16,3	13,7	25,7
Стрілоподібна	14,0	13,9	37,1
Дружба	14,4	13,6	45,7
Тронко	12,6	13,3	22,9
Середнє	13,1	13,7	25,4

Джерело: складено авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 3. Біоенергетична продуктивність культиварів тополі

Культивар	Запас стовбурової деревини, м ³ ·га ⁻¹	Надземна біомаса, т·га ⁻¹	Вихід енергії, ГДж·га ⁻¹	Вихід умовного палива, т·га ⁻¹
Gelrica	230,7	139,1	2577,0	87,9
Blanc du Poitou	20,9	12,6	233,8	8,0
Rochester	125,3	75,5	1399,2	47,7
Vereecken	75,1	45,3	839,3	28,6
Dorskamp	63,2	38,1	706,1	24,1
Robusta	116,5	70,2	1301,2	44,4
Marilandica	136,9	82,5	1528,7	52,1
Sun Giorgio	33,6	20,3	375,6	12,8
Heidemij	77,5	46,7	865,1	29,5
Ghoy	12,8	7,7	143,0	4,9
Serotina	160,8	96,9	1795,7	61,2
Tardif de Champagne	183,3	110,5	2047,9	69,8
Ijzer 5	243,5	146,8	2719,7	92,7
I 45/51	27,2	16,4	303,6	10,3
I 214	199,9	120,5	2233,1	76,1
Новоберлінський	147,0	88,6	1641,5	56,0
Стрілоподібна	191,1	115,2	2134,9	72,8
Дружба	231,0	139,2	2580,0	88,0
Тронко	98,6	59,5	1101,7	37,6
Середнє	125,6	75,7	1402,9	47,8

Джерело: складено авторами на основі власних досліджень.

Таблиця 4. Вуглецепоглиняльна здатність культиварів тополі

Культивар	Загальна біомаса, т·га ⁻¹	Депонований вуглець, т·га ⁻¹	Секвестрування CO ₂ , т·га ⁻¹
Gerlica	173,8	86,9	318,7
Blanc du Poitou	15,8	7,9	28,9
Rochester	94,4	47,2	173,0
Vereecken	56,6	28,3	103,8
Dorskamp	47,6	23,8	87,3
Robusta	87,8	43,9	160,9
Marilandica	103,1	51,6	189,1
Sun Giorgio	25,3	12,7	46,5
Heidemij	58,4	29,2	107,0
Ghoy	9,6	4,8	17,7
Serotina	121,1	60,6	222,1
Tardif de Champagne	138,1	69,1	253,3
Ijzer 5	183,5	91,7	336,3
I 45/51	20,5	10,2	37,5
I 214	150,6	75,3	276,2
Новоберлінський	110,7	55,4	203,0
Стрілоподібна	144,0	72,0	264,0
Дружба	174,0	87,0	319,1
Тронко	74,3	37,2	136,3
Середнє:	94,6	47,3	173,5

Джерело: складено авторами на основі власних досліджень.

фітомаси ялини у віці 15 років становить близько 323,6 ГДж·га⁻¹, ялиці — 468, ГДж·га⁻¹, бука — 766,5 ГДж·га⁻¹. Як бачимо, енергопродуктивність багатьох культиварів тополі є суттєво вищою, що ще раз свідчить про перспективність та високу ефективність створення біоенергетичних плантацій тополь. Значна частка випробуваних культиварів володіють високим потенціалом депонування атмосферного вуглецю (табл. 4). Дев'ять із 19 культиварів (Gerlica, Marilandica, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, I 214, Стрілоподібна, Дружба) депонують вуглець в обсягах, що перевищує середнє значення показника на плантації. У надземній та підземній біомасі цих сортів у 15-річному віці акумулюється 51,6 — 91,7 т·га⁻¹ вуглецю.

Обсяги секвестрування (поглинання) вуглекислого газу із атмосфери розраховані на основі даних про обсяги депонування вуглецю у загальній фітомасі культиварів тополі. Для цього використовувався коефіцієнт (44/12), який відображає пропорцію молекулярних мас кисню та вуглецю в молекулі вуглекислого газу. Як бачимо із табл. 4 найбільш продуктивні культивари тополі в умовах Західного Лісостепу можуть поглинати від 189,1 до 336,3 т CO₂·га⁻¹. Якщо взяти до уваги, що середній легковий автомобіль викидає приблизно від 2,4 до 2,9 тонн CO₂ на рік, залежно від його ефективності та умов експлуатації, тоді 1 га плантації тополі може секвеструвати річні викиди приблизно 100 автомобілів.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

В результаті 15-річного випробовування клонів тополі в умовах свіжої діброви Західного Лісостепу встановлено, що найбільш продуктивними виявилися культивари Gerlica, Serotina, Tardif de Champagne, Ijzer 5, I 214, Стрілоподібна, Дружба, обсяги загальної біомаси яких становлять 103,1—173,8 т·га⁻¹. Деревостани цих же культиварів найбільш інтенсивно депонують вуглець — від 51,6 до 86,9 т·га⁻¹, секвеструючи з атмосфери значні об'єми CO₂ (189,1-318,7 т·га⁻¹). Біомаса культиварів тополі є також надійним відновлювальним джерелом енергії, адже з надземної біомаси більшості із них можна отримати понад 1000 ГДж ГДж·га⁻¹, що замінює більше 34,1 т умовного палива.

Перспективами подальших наукових розвідок є вивчення елементної структури фітомаси дерев культиварів тополі (стовбура, кори, гілок, листя) та визначення питомої енергемісткості її фракцій, економічної ефективності плантацій тополь.

ФІНАНСУВАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

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

Література:

1. Васишин Р.Д. Ліси Українських Карпат: особливості росту, біологічна та енергетична продуктивність: монографія. К.:ТОВ "ЦП" КОМПРИНТ". 2016.418 с.
2. Висоцька Н. Ю. Перспективи використання гібридних тополь в Україні на прикладі клону "Дружба" (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray × *Populus laurifolia* Ldb.). Науковий вісник НАТУ України. 2014. Т. 24. №. 9. С. 54—60.
3. Висоцька Н. Ю. Лісотипологічна структура та продуктивність деревостанів тополі чорної в різних природно-кліматичних зонах рівнинної частини України. Лісівництво і агролісомеліорація. 2017. №. 131. С. 11—22.
4. Висоцька Н. Ю., Ткач В. П. Деревостани тополі та осики в Україні. Лісівництво і агролісомеліорація. 2016. №. 128. С. 20—27.
5. Дебринюк Ю.М., Фучило Я.Д., Гузь М.М. Плантаційне лісовирощування: навч. посібник. Львів: Галицька видавнича спілка. 2020. 428 с.

6. Дебринюк Ю.М., Фучило Я.Д. Плантаційні лісові насадження в Україні: концептуальні засади, ресурсний потенціал та енергетичне використання: монографія. Львів. Галицька Видавнича Спілка. 2020. 504 с.

7. Калетнік Г. М., Токарчук Д. М. Ефективність вирощування енергетичних культур та їх переробки на біопаливо в контексті забезпечення енергетичної автономії аграрних підприємств. Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики. 2021. № 1. С. 7—25. 2021.

8. Куцоконь, Н. К., Рахметов, Д. Б., Худолєєва, Л. В., Рахметова, С. О., Фіщенко, В. В., Нестеренко, О. Г., & Рашидов, Н. М. (2017). Ростові характеристики та енергопродуктивність тополь і верб короткоротаційній плантації за перший рік вегетації. Біологічні системи, (9, Вип. 2), 238—246.

9. Куцоконь Н. К., Худолєєва, Л. В., Лось, С. А., Висоцька, Н. Ю., Торосова, Л. О., Ткач, В. П., Нестеренко О.Г., Рашидов, Н. М. Оцінка ростових показників однорічних клонів тополі та верби на короткоротаційній плантації у Харківській області. Біологічні студії. 2018. №. 12, № 1. С. 55—64.

10. Лакида П. І. Фітомаса лісів України: монографія. Тернопіль: Вид-во "Збруч". 2002.

11. Лакида П. І., Блищик В. І. Прогноз стоку вуглецю та киснепродуктивність вільхових насаджень Українського Полісся. Біоресурси і природокористування. 2014. Т. 6, № 1—2. С. 91—98.

12. Лакида П.І., Васишин Р.Д., Васишин О.М. Надземна фітомаса та вуглецево-енергетичний потенціал ялицевих деревостанів Українських Карпат: монографія. Корсунь-Шевченківський: ФОП В.М. Гавришенко, 2010. 240 с.

13. Лакида, П. І., Васишин, Р. Д., Домашовець, Г. С., Терент'єв, А. Ю., Лашенко, А. Г., & Лакида, І. П. (2011). Біопродуктивність та депонований вуглець соснових насаджень, створених на землях, що вийшли із сільськогосподарського використання. Науково-виробниче видання "Лісовий журнал". С. 53—57.

14. Методологія дослідження енергетичних плантацій верб і тополь: монографія / за ред. члена-кореспондента НААН В.М. Сінченка / [Я.Д. Фучило, В.М. Сінченко, О.М. Ганженко, М.Я. Гументик та ін.]. — К.: ТОВ "ЦП "Компринт", 2018. 137 с.

15. Патлай І.М., Журова П.Т., Гайда Ю.І., Руденко В.М. Сортовипробування лісових порід в Україні. Лісівництво і агролісомеліорація. Харків, 1999. Вип. 96. С. 3—9.

16. Пришляк Н. В. Потенційні можливості вирощування біоенергетичної сировини на виробництво твердого біопалива. Агросвіт. 2021. № 1—2. С. 33—45.

17. Старова Н. В. Межвидовая гибридизация тополей и гетерозис. Лесоводство и агролесомелиорация: сб. науч. тр. 1977. № 48. С. 52—57.

18. Фучило Я.Д., Дебринюк Ю.М., Бровко Ф.М., Гайда Ю.І., Сбитна М.В., Фучило Д.Я. Плантаційне лісовирощування промислового і енергетичного призначення: концептуальні засади, технологічні особливості та перспективи: монографія. Київ, ЦП "Компринт". 2018. 321 с.

19. Фучило Я., Кирилко Я. Продуктивність енергетичних плантацій тополі на малогумусних чорноземах Правобережного Лісостепу України. Наукові праці Лісівничої академії наук України. 2023. №. 25. С. 122—127.

20. Фучило Я., Сбитна М., Літвін В. (2009). Досвід та перспективи вирощування тополі (*Populus sp. L.*) у Південному Степу України. Наукові праці Лісівничої академії наук України, (7), 66—69.

21. Brown, S. & Lugo, A. E. (1992). Above-ground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia*. Caracas, 17 (1), 8—18.

22. IPCC (1996) Land use change and forestry. In Revised. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

23. 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/>

24. Tomar, A., Singh, B. K., Khan, F. A., Srivastava, A., & Singh, S. (2024). Growth, Biomass and Carbon Sequestration of *Populus deltoides* Clones. *Environment and Ecology*, 42 (2), 541—546.

References:

1. Vasylyshyn, R.D. (2016), *Lisy Ukrain's'kykh Karpat: osoblyvosti rostu, biolohichna ta enerhetychna produktyvnist'* [Forests of the Ukrainian Carpathians: growth characteristics, biological and energy productivity], KOMPRYNТ, Kyiv, Ukraine.

2. Vysots'ka, N.Yu. (2014), "Prospects for the use of hybrid poplars in Ukraine using the example of the "Druzhba" clone (*Populus trichocarpa* Torr. & Gray × *Populus laurifolia* Ldb.)", *Naukovyj visnyk NLTU Ukrainy*, vol. 24, no. 9, pp. 54—60.

3. Vysots'ka, N.Yu. (2017), "Forest typological structure and productivity of black poplar stands

in different natural and climatic zones of the plain part of Ukraine", *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia*, vol. 131, pp. 11—22.

4. Vysots'ka, N.Yu. and Tkach, V.P. (2016), "Poplar and aspen stands in Ukraine", *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia*, vol. 128, pp. 20—27.

5. Debryniuk, Yu.M. Fuchylo, Ya.D. and Huz', M.M. (2020), *Plantatsijne lisovyroschuvannia [Plantation forestry]*, Halyts'ka vydavnycha spilka, L'viv, Ukraine.

6. Debryniuk, Yu.M. and Fuchylo, Ya.D. (2020), *Plantatsijni lisovi nasadzhennia v Ukraini: kontseptual'ni zasady, resursnyj potentsial ta enerhetychne vykorystannia [Plantation forests in Ukraine: conceptual foundations, resource potential and energy use]*, Halyts'ka Vydavnycha Spilka, L'viv, Ukraine.

7. Kaletnik, H.M. and Tokarchuk, D.M. (2021), "Effectiveness of growing energy crops and their processing into biofuel in the context of ensuring the energy autonomy of agricultural enterprises", *Ekonomika, finansy, menedzhment: aktual'ni pytannia nauky i praktyky*, vol. 1, pp. 7—25. 2021.

8. Kutsokon', N.K. Rakhmetov, D.B. Khudolieieva, L.V. Rakhmetova, S.O. Fischenko, V.V. Nesterenko, O.H. and Rashydov, N.M. (2017), "Growth characteristics and energy productivity of poplars and willows of a short-rotation plantation during the first year of vegetation", *Biologichni systemy*, vol. 9, no. 2, pp. 238—246.

9. Kutsokon' N.K. Khudolieieva, L.V. Los', S.A. Vysots'ka, N. Yu. Torosova, L.O. Tkach, V.P. Nesterenko O.H. and Rashydov, N.M. (2018), "Assessment of growth indicators of one-year clones of poplar and willow on a short-rotation plantation in the Kharkiv region", *Biologichni studii*, vol. 12, № 1, pp. 55—64.

10. Lakyda, P.I. (2002), *Fitomasa lisiv Ukrainy [Phytomass of forests of Ukraine]*, Vyd-vo "Zbruch", Ternopil', Ukraine.

11. Lakyda, P.I. and Blyshchik, V.I. (2014), "Forecast of carbon flow and oxygen productivity of alder plantations of the Ukrainian Polissia", *Bioresursy i pryrodokorystuvannia*, vol. 6, no. 1-2, pp. 91—98.

12. Lakyda, P.I. Vasylyshyn, R.D. and Vasylyshyn, O.M. (2010), *Nadzemna fitomasa ta vuhletsevo-enerhetychnyj potentsial ialytsevykh derevostaniv Ukrains'kykh Karpat [Above-ground phytomass and carbon-energy potential of fir stands of the Ukrainian Carpathians]*, FOP V.M. Havryshenko, Korsun'-Shevchenkivs'kyj, Ukraine.

13. Lakyda, P.I. Vasylyshyn, R.D. Domashovets', H.S. Terent'iev, A.Yu. Laschenko, A.H. and Lakyda, I.P. (2011), "Bioproductivity and

deposited carbon of pine plantations created on lands left from agricultural use", *Naukovo-vyrobnyche vydannia "Lisovyj zhurnal"*, pp. 53—57.

14. Sinchenko, V.M. (2018), *Metodolohiia doslidzhennia enerhetychnykh plantatsij verb i topol' [Research methodology of willow and poplar energy plantations]*, Komprynt, Kyiv, Ukraine.

15. Patlaj, I.M. Zhurova, P.T. Hajda, Yu.I. and Rudenko, V.M. (1999), "Varietal testing of forest species in Ukraine", *Lisivnytstvo i ahrolisomelioratsiia*, vol. 96, pp. 3—9.

16. Pryshliak, N. (2021), "Potential possibilities of growing bioenergy crops for the production of solid biofuels", *Agrosvit*, vol. 1—2, pp. 33—45.

17. Starova, N.V. (1977), "Interspecific hybridization of poplars and heterosis", *Lesovodstvo y ahrolesomelyoratsiia: sb. nauch. tr*, vol. 48, pp. 52—57.

18. Fuchylo, Ya.D. Debryniuk, Yu.M. Brovko, F.M. Hajda, Yu.I. Sbytna, M.V. and Fuchylo, D.Ya. (2018), *Plantatsijne lisovyroschuvannia promyslovoho i enerhetychnoho pryznachennia: kontseptual'ni zasady, tekhnologichni osoblyvosti ta perspektyvy [Plantation afforestation for industrial and energy purposes: conceptual foundations, technological features and prospects]*, Komprynt, Kyiv, Ukraine.

19. Fuchylo, Ya. and Kyrylko, Ya. (2023), "Productivity of poplar energy plantations on low-humus chernozems of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine", *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy*, vol. 25, pp. 122—127.

20. Fuchylo, Ya. Sbytna, M. and Litvin, V. (2009), "Experience and prospects of growing poplar (*Populus* sp. L.) in the Southern Steppe of Ukraine", *Naukovi pratsi Lisivnychoi akademii nauk Ukrainy*, vol. (7), pp. 66—69.

21. Brown, S. and Lugo, A.E. (1992), "Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon", *Inter-ciencia*. Caracas, vol. 17 (1), pp. 8—18.

22. IPCC (1996), *Land use change and forestry*, In Revised, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

23. IPCC (2006), "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", The Institute for Global Environmental Strategies (IGES), available at: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (Accessed 15 June 2024).

24. Tomar, A. Singh, B.K. Khan, F.A. Srivastava, A. and Singh, S. (2024), "Growth, Biomass and Carbon Sequestration of *Populus deltoides* Clones", *Environment and Ecology*, vol. 42 (2), pp. 541—546. *Стаття надійшла до редакції 26.06.2024 р.*