

1. БІОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ РОСЛИННИХ УГРУПОВАНЬ



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

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412501>
Article received 2025.12.24
Article revised 2025.01.13
Article accepted 2025.05.19
Article published 2025.08.29

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
✉ Correspondence author
Vasyl Vaidanych
vasyl.vaidanych@gmail.com
103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine

УДК 630*182.4:551:521.1

Комплексне пряме визначення мас продуктів фотосинтезу деревостанів за квантами енергії сонячної радіації

В.І. Вайданич¹, А.М. Дейнека², С.І. Миклуш³, І.Б. Пірко⁴, Т.В. Вайданич⁵

Запропоновано комплексний прямий квантово-оптичний метод визначення мас продуктів фотосинтезу деревостанів за квантами енергії сонячної радіації, що надійшла за відповідний проміжок часу з середньою температурою вегетації $T \geq 5^\circ\text{C}$. Енергія сонячної радіації визначена через кількість фотонів, що потрапили в деревостан, та їх енергію в смугах поглинання хлорофілу з довжинами хвиль 440 та 660 нм.

Продукти фотосинтезу деревостанів, зокрема, фітомасу, фотосинтетично зв'язаний вуглекислий газ, депонований вуглець, воду та кисень, досі визначають непрямими методами через різноманітні зовнішні ознаки деревостану без урахування головного чинника процесу фотосинтезу – енергії сонячної радіації. Всі вони винятково трудомісткі та енерговитратні. Вуглекислий газ, кисень і депонований вуглець, зазвичай визначають непрямо через попередньо знайдену непрямим способом фітомасу шляхом її перерахунку з використанням молекулярної ваги продукту фотосинтезу. Затрачена на фотосинтез вода майже не вивчена. Запропонований квантово-оптичний прямий метод визначення мас продуктів фотосинтезу ґрунтується на тому, що енергія сонячної радіації, точніше енергія ФАР, поділяється на окремі кванти енергії – фотони, які поглинає хлорофіл з утворення молекул клітковини. Маса останніх пропорційна кількості поглинутих фотонів, тобто падаючій на деревостан енергії ФАР W . У результаті отримаємо зручний вираз прямого визначення маси продуктів фотосинтезу деревостану:

$$m = \mu \cdot A \cdot W,$$

де $A = 11,031 \cdot 10^9$ кДж – стала величина, яку визначено через енергію фотонів смуг поглинання хлорофілу;
 μ – молекулярна вага продукту фотосинтезу.

¹ Вайданич Василь Іванович – кандидат фізико-математичних наук, професор, Заслужений працівник освіти України. м. Львів, 79057, Україна. E-mail: vasyl.vaidanych@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1378-0791>

² Дейнека Анатолій Михайлович – академік Лісівничої академії наук України, доктор економічних наук, професор, начальник Західного міжрегіонального управління лісового та мисливського господарства, вул. Яворницького, 8Б, м. Львів, 79054, Україна. E-mail: andey67@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-5070-9759>

³ Миклуш Степан Іванович – академік Лісівничої академії наук України, доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри лісової таксації та лісовпорядкування. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: msi_s@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9762-1190>

⁴ Пірко Ігор Богданович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: pirko@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2378-2929>

⁵ Вайданич Тетяна Василівна – старший викладач кафедри маркетингу та логістики. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: vaidanych@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9930-5310>

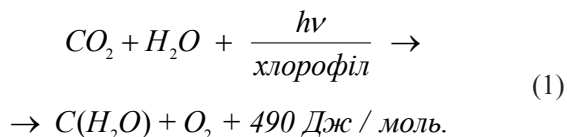
Встановлена залежність приросту мас продуктів фотосинтезу від енергії ФАР отримана для повністю зімкнутих деревостанів. У реальності потрібно вводити корегувальні коефіцієнти стану зімкнутості крон, віку насаджень, класу бонітету, деревних порід та ін.

Лінійна залежність мас продуктів фотосинтезу від енергії сонячної радіації W дає змогу автоматизувати процес і, ввівши сталі значення A та μ , визначати маси всіх продуктів фотосинтезу одночасно як в неперервному режимі, так і за дискретні проміжки часу.

Ключові слова: фотосинтез; фотони; енергія фотонів; енергія сонячної радіації; фітомаса; депонований вуглець; квантово-оптичний метод.

Вступ (Introduction).

Лісам, яким донедавна відводилося ключове господарсько-промислове значення, в останні роки все виразніше надається еколого-суспільне значення і, насамперед, домінуюча роль у зв'язуванні парникових газів, а відтак – у збереженні довкілля, придатного для діяльності наступних поколінь. Нагромадження фітомаси деревостаном і продуктів, що утворюються в цьому процесі, відбуваються завдяки фотосинтезу під дією енергії сонячної радіації. Класичне рівняння фотосинтезу з розрахунку на елементарну комірку клітковини, відбувається за відомою схемою (Микрушин та ін., 2006):



У процесі фотосинтезу неорганічна речовина CO_2 та H_2O перетворюється на органічну. То ж вхідними продуктами фотосинтезу є вуглекислий газ і вода, а вихідними продуктами в результаті фотохімічної реакції є клітковина (фітомаса) і кисень.

Розрізняють прямі і непрямі методи визначення фітомаси деревостанів. До прямих методів відносять ваговий. На ділянці лісу вибирають модельні дерева, їх зрубують і поділяють на компоненти (стовбур, гілки, листя/хвою, коріння), зважують свіжу масу, а потім висушують для встановлення сухої маси. Отримані результати поширюють на досліджувану ділянку лісу (Brown, 1989; Лакида, 2002). Метод трудомісткий та енерговитратний, супроводжується руйнуванням деревостану, обмеженою можливістю масштабування. Практичне застосування має метод визначення фітомаси окремих частин дерева (стовбура, гілок, кори, хвої або листя) за показниками щільності деревини та інших компонентів дерева з подальшим їх перерахунком в одиниці маси (Лакида, Лашенко А., Лашенко Н., 2006). Широкого застосування також набув алометричний метод визначення біомаси дерев без знищення рослин (Brown, 1989; Dengsheng, 2006; Лакида та ін., 2006). Метод базується на математичних рівняннях, що пов'язують легко вимірювані характеристики дерев: діаметр на висоті грудей (DBH), висоту дерев (H), клас бонітету. Іноді встановлюють ще й повноту (Василишин

та ін., 2021) та визначають кореневу частину деревостану (Vasylyshyn et al., 2023). На основі цих даних за допомогою математичних моделей визначають фітомасу. Використовуючи коефіцієнтне оцінювання біомаси залежно від типу деревостанів, віку насаджень, типу лісу, визначено середній запас фітомаси в Україні (Лакида, Швиденко та ін., 2013). Дослідниками (Sytnyk et al., 2018) запропоновано рівняння для оцінювання фітомаси листя та гілок на основі об'єму крони. Якнайповніше врахування зовнішніх ознак лісостанів дало змогу оцінити високий потенціал фітомаси лісів України як джерела низьковуглецевої відновлювальної енергії (Vasylyshyn et al., 2022; Vasylyshyn et al., 2023; Vasylyshyn, Yurchuk, 2021).

Метод дистанційного зондування дав можливість оцінити надземну фітомасу лісових насаджень у важко доступних регіонах (Gwal, Singh, & Amand, 2020), здійснити великомасштабну лісову інвентаризацію (Constandache et al., 2021), відслідкувати зміни, що відбуваються у лісових екосистемах впродовж тривалого проміжку часу, зумовлених кліматичними змінами та людською діяльністю (Yude Pan et al., 2013; Myklush et al., 2024; Myroniuk et al., 2022). Отримано також попередні результати застосування аеродинамічного методу для виявлення хворіб лісу, розпізнавання деревних видів, типів лісу (Часковський та ін., 2016).

Масу депонованого деревостаном вуглецю та фотосинтетично зв'язаного в процесі фотосинтезу вуглекислого газу зазвичай визначають через встановлену фітомасу (Dixon et al., 1994; Myroniuk et al., 2022; Zibtsev et al., 2024). Використана система математичних моделей для кількісного оцінювання фітомаси дала змогу розрахувати обсяги органічного вуглецю у різних лісових екосистемах (Василишин та ін., 2021).

Вуглецепоглиняльна здатність залежить також від вікової структури деревостанів (Мороз, 2024). Проведений аналіз структури, розподілу біомаси лісів по всьому світу виявив, що, починаючи з 1990 р., щільність біомаси в усталених лісах зростає, що може свідчити про вплив глобальних факторів, зокрема підвищеного рівня вуглекислого газу (Yude Pan et al., 2013). Оцінювання таких змін важливе з погляду виконання міжнародних зобов'язань у межах Паризької кліматичної угоди.

Масу зв'язаного в процесі фотосинтезу вуглекислого газу та депонованого вуглецю визначають

також хлорофільним способом, який ґрунтується на встановленні вмісту хлорофілу в усіх органах рослин на одиниці вкритої рослинністю площі. Далі розраховують величину депонованого вуглецю на одиницю маси хлорофілу (кілограм вуглецю/кілограм хлорофілу). За отриманим результатом і молярною масою визначають масу депонованого вуглецю і масу фотосинтетично зв'язаного деревостаном атмосферного вуглекислого газу (Matthews, 1993).

Масу води, що разом з вуглекислим газом забезпечує фотосинтез, також визначають непрямим потометричним способом. Потометром вимірюють масу поглинутої води і транспірацію. За їхньою різницею знаходять масу зв'язаної в процесі фотосинтезу води (Larcher, 2003). Спосіб багатостадійний і трудомісткий, його застосовують в основному в лабораторних умовах.

Разом із формуванням фітомаси внаслідок фотосинтезу виділяється молекулярний кисень. Його масу визначають знову ж таки непрямим способом – шляхом виокремлення з сухої фітомаси, враховуючи хімічний склад останньої. Встановлено, що для утворення однієї тонни абсолютно сухої деревини виділяється від 1,398 (для сосни) до 1,423 т/га (для осики) кисню (Миклуш, 2011).

Зазначені вище методи визначення маси продуктів фотосинтезу деревостанів, окрім того, що вони непрямі, вони ще й винятково трудомісткі та енерговитратні. Жоден із дослідників не спромігся визначити всі компоненти фотосинтезу на одній виокремленій ділянці деревостану, а лише фрагментарно, що ускладнює їхнє порівняння. Але найважливішим аспектом є те, що в жодній з робіт не використано для оцінювання маси продуктів фотосинтезу важливий компонент – енергію сонячної радіації, що надходить у деревостан. Якщо на ділянку лісу надійде менше вологи, або в атмосферному повітрі виявиться недостатня концентрація вуглекислого газу, то фотосинтез буде відбуватися, але його інтенсивність зменшиться. Водночас якщо інтенсивність світла буде збережена, але без ділянки спектра, що відповідає смугам поглинання хлорофілу, то фотосинтез взагалі припиниться. Сонячній радіації належить визначальна роль у процесах фотосинтезу і без цієї складової оцінювання мас продуктів фотосинтезу є неповними.

У наших попередніх роботах енергію сонячної радіації використано для встановлення окремих фрагментів продуктів фотосинтезу: фітомаси (Вайданич В., Вайданич Т., 2008; Вайданич В., Довга, Вайданич, Т., 2008); зв'язаного в процесі фотосинтезу атмосферного вуглекислого газу і депонованого вуглецю (Вайданич та ін., 2008); продуктового кисню (Вайданич та ін., 2012). Встановлено, що маси всіх продуктів фотосинтезу прямо пропорційні енергії сонячної радіації, що дає підстави щодо їхнього узагальнення. Фрагментарне, покрокове визначення мас продуктів фотосинтезу створює труднощі в їх вимірюванні, розбалансованості

і, головне, складності і навіть неможливості повного аналізу отриманих результатів.

З огляду на те, що енергія сонячної радіації відіграє домінуючу роль у процесі фотосинтезу, *актуальним завданням* є встановлення зв'язку між величиною цієї енергії, що поступає в деревостан і масами продуктів фотосинтезу, які утворюються у цьому процесі. Важливим є і те, що існуючі методи вимірювання мас продуктів фотосинтезу є непрямыми.

Мета роботи – обґрунтувати засади комплексного прямого визначення мас продуктів фотосинтезу за квантами енергії сонячної радіації впродовж вегетаційного періоду або іншого проміжку часу.

Об'єкти та методика досліджень (Objects and methods).

Об'єкт досліджень – процес фотосинтезу у природних екосистемах. *Предмет досліджень* – встановлення залежності маси продуктів фотосинтезу (фітомаси, продуктового кисню, фотосинтетично зв'язаного вуглекислого газу, депонованого вуглецю та затраченої на процес фотосинтезу води) від величини енергії сонячної радіації.

Для загального розгляду запропоновано повністю зімкнутий однорідний деревостан без аналізу його продуктивності, віку насаджень, деревних видів, характеристики ґрунту тощо. Ці величини потрібно визначати експериментально додатково.

Використано прямий квантово-оптичний метод знаходження мас продуктів фотосинтезу, який започатковано для визначення фітомаси деревостану (Вайданич В., Вайданич Т., 2008) і не передбачає використання лісівничо-таксаційних показників деревостанів, таких як середній діаметр, висота та вік, продуктивність (клас бонітету), об'єм крони та інші. Метод враховує як надземну, так і підземну частини деревостану і ґрунтується на тому, що енергія сонячної радіації поділяється на окремі кванти енергії – фотони, які поглинає хлорофіл з утворенням молекул клітковини. Маса останніх пропорційна кількості поглинутих фотонів, тобто падаючій на деревостан енергії сонячної радіації. Не всі фотони зумовлюють реакцію фотосинтезу. Для цього введено коефіцієнт квантової ефективності.

Результати (Results).

Для знаходження мас продуктів фотосинтезу використаємо алгоритм, наведений у роботі В. Вайданич, Т. Вайданич (2008). Рівняння фотосинтезу (1) лінійне, всі складові одно-молекулярні. Тому кількість вхідних і вихідних молекул однакова. Вуглекислий газ, вступаючи в фотохімічну реакцію з водою під дією квантів світла, призводить до утворення такої ж кількості елементарних молекул клітковини і молекул вільного кисню. Позаяк це єдиний процес, тому маси вихідних, а відтак і вхідних, продуктів фотосинтезу пропорційно залежать від енергії сонячної радіації. Не кожен поглинутий фотон здатний до утворення молекул клітковини і кисню, його енергії у такому разі недостатньо. Встановлено, що в процесі фотосинтезу

на перетворення однієї молекули вуглекислого газу у молекулу вуглеводню (клітковину) і молекулу кисню потрібно затратити 8-12 фотонів (квантів світла) (Giancoli, 1984; Микрушин та ін., 2006), які утворюють пакет фотонів n . Прийmemo усереднене значення цієї величини: $n = 10$. Таким чином, для знаходження маси вибраного продукту фотосинтезу потрібно у затраченій енергії сонячної радіації знайти кількість пакетів фотонів, які забезпечують фотосинтез, і пов'язати їх з кількістю синтезованих молекул продукту фотосинтезу.

Число фотосинтетично зв'язаних молекул продуктів фотосинтезу становить:

$$N_{mol} = N \cdot B, \quad (2)$$

де N – кількість пакетів фотонів (по 10 фотонів у пакеті), що беруть участь у реакції фотосинтезу; B – коефіцієнт, що визначає квантову ефективність процесів фотосинтезу. Для деревостанів $B = 0,05$ (Кучерявий, 2001).

Масу фотосинтетично утвореного продукту фотосинтезу m визначимо через молярну масу:

$$m_i = \frac{\mu_i \cdot N_{mol}}{N_A} = \frac{\mu_i \cdot N \cdot B}{N_A}, \quad (3)$$

де μ_i – молярна маса розглядуваного продукту; $i = 1, 2, 3, 4, 5$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – стала Авогадро.

Кількість пакетів фотонів, які беруть участь у процесах фотосинтезу, знайдемо через загальне число фотонів:

$$N = N' / n,$$

де N' – загальне число фотонів енергії сонячної радіації.

Ні вуглекислий газ, ні вода безпосередньо не поглинають світло. Посередником у взаємодії цих молекул з квантами енергії сонячної радіації слугує хлорофіл, в якому протікають винятково складні біохімічні перетворення. Хлорофіл поглинає фотони в ділянці видимого спектра випромінювання сонячної енергії 400-700 нм, яка отримала назву фотосинтетично активної радіації (ΦAP , PAR) з максимумами поглинання хлорофілу $\lambda_b = 440$ нм – у синій ділянці видимого спектра і $\lambda_r = 660$ нм – у червоній ділянці (Микрушин та ін., 2006). Максимальне значення поглинання хлорофілом та інтенсивність фотосинтезу спостерігається під час освітлення червоним світлом (Бессонова, Яковлева-Носарь, 2004). У подальшому обмежимося червоною довжиною хвилі. Тому загальна кількість фотонів ΦAP , що надійшла на ділянку деревостану впродовж вегетаційного періоду, становить:

$$N' = \frac{W}{h\nu},$$

звідки

$$N = \frac{W}{h\nu \cdot n} = \frac{\lambda \cdot W}{hc \cdot n}, \quad (4)$$

де W – сумарна енергія ΦAP , що відповідає усередненій температурі вегетації рослин $T \geq 5$ °C; ν та λ – відповідно, частота і довжина хвилі поглинання хлорофілом червоного світла; c – швидкість світла; $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ (Джс · с) – стала Планка.

Остаточно для маси нагромадженого зімкненим деревостаном продукту фотосинтезу отримаємо вираз:

$$m_i = \frac{\mu_i \cdot B \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot n \cdot N_A} \cdot W = \mu_i \cdot A \cdot W, \quad (5)$$

де $A = \frac{B \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot n \cdot N_A}$ – стала величина.

Відтак, маса будь якого продукту фотосинтезу залежить лише від його молярної маси та величини енергії ΦAP , що надійшла на досліджувану ділянку деревостану впродовж вегетаційного періоду.

Якщо ввести в коефіцієнт A необхідні величини: $B = 0,05$ (на процеси фотосинтезу використовується близько 5% сонячної енергії (Кучерявий, 2001), $\lambda = 660$ нм та інші відомі величини, то отримаємо: $A = 11,031 \cdot 10^{-9}$ моль/Джс.

Введемо позначення:

$i = 1$; $m_1 = m_f$; $\mu_1 = \mu_f$ – фітомаса, нагромаджена деревостаном впродовж вегетаційного періоду та її молярна вага;

$i = 2$; $m_2 = m_0$; $\mu_2 = \mu_0$ – маса утвореного в результаті фотосинтезу кисню та його молярна вага;

$i = 3$; $m_3 = m_c$; $\mu_3 = \mu_c$ – маса зв'язаного деревостаном атмосферного вуглекислого газу та його молярна вага;

$i = 4$; $m_4 = m_w$; $\mu_4 = \mu_w$ – маса зв'язаної деревостаном внаслідок фотосинтезу води та її молярна вага.

Підставивши у вираз (5) почергово відповідні молярні маси та значення сталої величини A , отримаємо зручні вирази для знаходження продуктів фотосинтезу деревостанів:

$$\begin{aligned} m_f &= 0,331 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг/Джс}; \\ m_0 &= 0,353 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг/Джс}; \\ m_c &= 0,485 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг/Джс}; \\ m_w &= 0,199 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг/Джс}. \end{aligned} \quad (6)$$

Оскільки поряд з клітковиною виділяється кисень, то з вуглекислого газу як з вхідного продукту, залишається вуглець, який депонується (вуглецевий стік) у сухій деревині і вилучається з атмосфери. Таким чином, зменшується його згубна дія на довкілля і зміну клімату. Масу депонованого вуглецю m_{cs} виразимо через фітомасу m_f , а в кінцевому підсумку теж через енергію сонячної радіації W :

$$m_s = m_{cs} = \frac{\mu_c \cdot m_f}{\mu_f} = 0,4 \cdot m_f = 0,132 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг/Джс}. \quad (7)$$

Зауважимо, що вираз (7), як і попередній (6), отримані з розрахунку на один гектар продукту за один рік. Маса депонованого вуглецю, як і кожного з продуктів фотосинтезу, на всіх залісених площах вибраного регіону становить:

$$M_i = m_i \sum_{j=1}^n \Delta S_j, \quad (8)$$

де ΔS_j – площі залісених ділянок.

Дискусія (Discussion).

У таблиці наведено порівняльні результати отриманих нами теоретичних розрахунків параметрів

продуктів фотосинтезу за виразами (6), (7) і даними літературних джерел, отриманих традиційними методами. Загалом теоретичні розрахунки співмірні з наведеними експериментальними результатами. Розходження у визначенні фітомаси деревостанів пояснюються тим, що в наведених експериментах з визначення фітомаси врахована лише надземна частина деревостану без урахування підземної частини і мортмаси. Коренева фітомаса може становити 20,3% від загальної фітомаси деревостану, а мортмаса – понад 10% від загального запасу біомаси (Василишин та ін., 2021).

Таблиця. Порівняльні результати теоретичних розрахунків мас продуктів фотосинтезу деревостанів з літературними джерелами, $m/(га \cdot рік)$

Table. Comparison of the results of theoretical calculations of the masses of photosynthesis products of forest stands with literary sources, $t/(ha \cdot year)$

Регіон (деревостан, бонітет)	Вік, років	W $T \geq 5^\circ C$ $\times 10^{12}$, Дж/га	Фітомаса, m_f		Кисень, m_o		Вода, m_w		Вуглекислий газ, m_c		Депонований вуглець, m_{cs}	
			За джерелами	За виразами (6)	За джерелами	За виразами (6)	За джерелами	За виразами (6)	За джерелами	За виразами (6)	За джерелами	За виразами (7)
Единбург	–	12,09* (a)	3,99* (a)	4,00	–	4,27	–	2,41	–	5,86	1,80 (a)	1,60
Ковель	80	15,22 (b)	3,22 (e)	5,04	–	5,37	–	3,03	–	7,38	–	2,01
Українські Карпати (повні ялицеві насадження, II)	40 50 60 70 80	16, 50 (b)	–	5,46	8,20 7,42 6,31 5,21 4,28 (i)	5,82	–	3, 28	–	8,00	2,85 2,58 2,20 1,83 1,49 (i)	2,18
Поділля (деревостан дуба звичайного, I ^{а0})	40 50 60 70 80	16,58 (c)	4,78 4,69 4,53 4,32 4,09 (f)	5,49	–	5,85	–	3,30	8,04 (f)	8,04	–	2,64 2,58 2,48 2,35 2,22 (f)
Західне Розточчя (сосново-буковий деревостан, I ^а)	50	16,75 (b)	4,53 (g)	5,54	9,0	5,94	–	3,33	3,33 (g)	8,12	–	2,22
Південно-західна частина Поділля (грабово-буковий деревостан, I)	50	17,35 (b)	5,74 (g)	7,5	6,12	6,12	–	3,45	3,45 (g)	8,41	–	2,30
Берегово (листяні ліси Карпат)	100	17,93 (d)	5,08= 5,63	5,93	–	6,33	–	3,57	3,57	–	–	2,37

Примітки. * – енергія ФАР та маси продуктів фотосинтезу деревостанів, розраховані традиційними методами, використані з таких джерел: а – Matthews (1993); b, c – Галік, Басюк (2014); d – Вайданич В., Вайданич Т. (2008); e – Лакида (2002); f – Лакида, Лашенко А., Лашенко Н. (2006); g – Миклуш (2011); i – Василишин (2013).

Нагромаджена фітомаса також залежить від віку (Лакида та ін., 2013), деревних видів (Vasylyshyn, Lakyda, 2021; Myroniuk et al., 2022; Vasylyshyn et al., 2023), густоти насаджень (Лакида та ін., 2013; Zibtsev et al., 2024), лісорослинних, кліматичних (Vasylyshyn, Lakyda, 2021) та інших умов, що не враховано у теоретичних розрахунках. У цьому разі потрібно вводити додаткові експериментально визначені корегувальні коефіцієнти. Відсутність експериментальних даних із затрат води для фотосинтезу рослин пояснюється як труднощами її вимірювання, так і складністю процесів фотосинтезу. Вода в клітині існує у формі лінійно зв'язаної та гідратаційної, і води, що виконує транспортні функції у рослині. Лише перша з них бере участь у реакціях фотосинтезу і витрачається для продукування сухої фітомаси з утворенням кисню. Останні дві після поглинання рослиною видаляються шляхом транспірації. Середній розхід транспірації води з нагромадженням 1 г сухої фітомаси у деяких деревних видів становить: для дуба – 340, берези – 320, смереки – 230, бука – 170 г (Larcher, 2003).

Сільськогосподарські культури ще більш затратні. Так, на утворення 1 г сухої фітомаси кукурудза потребує 200-400 г води, а соняшник – 600-1000 г (Микрушин та ін., 2006). У середньому на синтез 1 г сухої речовини деревостану витрачається близько 300 г води, або лише 0,2% всієї води, що проходить крізь тіло рослини, решту 99,8% вона випаровує (Томільцева, Яцик, Мокін, 2007). Для утворення 1 тонни сухої фітомаси лісові насадження потребують в середньому від 200 (хвойні види) до 1000 тонн (листяні) води. Вологолюбні деревні види використовують води ще більше. Розхід води залежить від деревного виду, кліматичних умов, віку насаджень, типу ґрунту (Бессонова, Яковлева-Носарь, 2004). Хоча на синтез сухої продукції лісу витрачається в сотні разів менше води, ніж на транспірацію, без останньої розвиток рослини, а відтак і фотосинтез – неможливі.

Наведені у таблиці результати киснепродукційної функції повних ялицевих насаджень Українських Карпат отримані шляхом перерахунку приросту сухої фітомаси з урахуванням молярної ваги кисню. Маса депонованого вуглецю розраховано також через фітомасу з використанням відповідних перевідних коефіцієнтів: 0,5 – для деревних фракцій і 0,45 – для листя і нижніх ярусів (Василишин, 2013). Чітко простежується вплив деревних видів і віку деревостанів на отримані результати. Максимальну відповідність розрахункових та експериментальних даних спостережено для вікових груп 60-70 років.

Незважаючи на розбіжності у встановленні фітомаси за квантами енергії сонячної радіації та експериментальними методами, спостерігається задовільна кореляція показників з визначення фотосинтетично зв'язаного вуглекислого газу та депонованого вуглецю.

Визначимо коефіцієнт корисної дії процесів фотосинтезу (η). Зазначалося, що на перетворення однієї молекули CO_2 в молекулу клітковини з утворенням молекули кисню потрібно затратити в середньому $n = 10$ фотонів. Найбільше значення поглинання хлорофілу та інтенсивності фотосинтезу спостерігається з довжиною хвилі $\lambda = 660$ нм (Микрушин та ін., 2006). Затрачена енергія десяти фотонів становить:

$$w_2 = n \cdot h\nu = n \frac{h \cdot c}{\lambda}.$$

Провівши розрахунки з відомими величинами, отримаємо:

$$w_2 = 3,01 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} = 18,81 \text{ eB}.$$

Зворотна хімічна реакція характеризується виділенням енергії $w_2 = 4,9 \text{ eB}$ на одну молекулу CO_2 (Giancoli, 1984). Тому для коефіцієнта корисної дії фотосинтезу, отримаємо:

$$\eta = \frac{w_1}{w_2} \cdot 100 \% = 26,0 \%$$

Реальний коефіцієнт корисної дії значно менший. Навіть якщо припустити, що у фотосинтезі приймає участь також синя ділянка спектра поглинання хлорофілу і провести ті ж розрахунки, то хоча цей коефіцієнт зменшиться, але все ж він буде більшим від реального. Це означає, що переважна частина енергії фотонів витрачається на забезпечення перебігу біохімічних перетворень і лише незначна частина витрачається на утворення продуктів фотосинтезу.

Запропонований метод визначення маси фотосинтетично зв'язаного впродовж року атмосферою вуглекислого газу за квантами енергії ΦAP (вирази 6, 7) дає змогу запровадити дієвий спосіб здійснення моніторингу за станом рівня забрудненості конкретного регіону промисловими викидами вуглекислого газу. Порівнюючи масу фотосинтетично зв'язаного впродовж року атмосферного вуглекислого газу розглядуваного регіону m_c з масою промислових викидів цього газу m_e :

$$\Delta m_{ce} = m_c - m_e = 0,485 \cdot 10^{-9} \cdot W \text{ кг} / \text{Дж} - m_e, \quad (9)$$

можна, залежно від отриманих результатів ($\Delta m_{cs} \geq 0$; $\Delta m_{cs} < 0$), приймати відповідні заходи з недопущення згубної дії на довкілля надлишків промислових викидів вуглекислого газу

Енергію ΦAP та продукти фотосинтезу можна визначати як в автоматизованому режимі, так і без нього. Отримані теоретичні залежності застосують для знаходження складових фотосинтезу деревостану лісів Львівської області. Для цього скористаємось виразами (6, 7). У середньому по області величину ΦAP візьмемо на рівні регіону Розточчя $W = 16,75 \cdot 10^{12} \text{ Дж/(га} \cdot \text{рік)}$ (див. таблицю), що збігається з значенням на ізофарі¹ для Львівщини (Галік, Басюк, 2014). Площа лісів Львівської

¹ ізофара – лінія на поверхні Землі з однаковою енергією ΦAP .

області становить 629,086 тис. га (<https://w.forest.gov.ua/>). Провівши розрахунки, отримаємо:

$$\begin{aligned} m_f &= 3851,04 \text{ тис. тонн}; m_e = 5642,76 \text{ тис. тонн}; \\ m_{cs} &= 1390,91 \text{ тис. тонн}; m_o = 3719,63 \text{ тис. тонн}; \\ m_w &= 2096,90 \text{ тис. тонн}. \end{aligned}$$

Результати отримані для повністю зімкнених деревостанів з урахуванням їхньої підземної частини. Щорічний приріст фітомаси лісів Львівської області за 2006 рік становив 1264,9 тис. тонн, а депонованого вуглецю – 206,7 тис. тонн (Василишин, Домашовець, 2008). Встановлені нами значення помітно вищі: $m_f = 3851,04$ тис. тонн і $m_{cs} = 1390,91$ тис. тонн. З урахуванням стану зімкненості деревостану і корневих систем у ньому, можливої зміни площі лісів, теоретичні розрахунки продуктів фотосинтезу стануть ближчими до традиційно визначених. Для точнішого врахування енергії ΦAP доцільно поєднувати встановлення радіометра над наметом і під наметом деревостану. Різниця між значеннями дасть додаткову інформацію про поглинуту енергію кронами дерев. Поряд з цим, теоретичні дані вказують на значний потенціал приросту фітомаси.

На сьогодні відсутні дані з визначення затрат води на суто реакцію фотосинтезу. Виведені теоретичні розрахунки процесів фотосинтезу вперше дали змогу встановити реальні потреби води для нагромадження фітомаси, які для лісів Львівщини становлять $m_w = 2096,90$ тис. тонн, і разом із затратами води на транспірацію дають можливість раціонального лісгосподарювання, зокрема і в регіонах з дефіцитом водних ресурсів.

Продуктування фітомаси в результаті фотосинтезу супроводжується виділенням молекулярного кисню. Киснепродуктивність перевищує продуктування фітомаси і поступається лише вуглецепродуктивності, що видно з величин коефіцієнтів A_i (вираз 6).

Киснепродуктивність залежить від видового складу деревостанів (Миклуш, 2011), віку насаджень (Миклуш, 2011; Василишин, 2013), класу бонітету (Василишин, 2013). Зокрема, за середньої інтенсивності енергії ΦAP для Українських Карпат $W = 16,5 \cdot 10^{12}$ Дж/(га рік), визначена за виразом (6) киснепродуктивність становить $m_o = 5,82$ т/га. Така киснепродуктивність характерна для повних ялицевих насаджень Українських Карпат віком 70 років I класу і 40 років – IV класу бонітету (Василишин, 2013). Зі зменшенням віку киснепродуктивність зростає, із збільшенням – зменшується. Наші результати відповідають усередненим даним. На завершення відзначимо, що за нашими підрахунками ліси Львівщини впродовж вегетаційного періоду продукують до 3719,63 тис. тонн кисню. Якщо перевести його в об'єм повітря за нормальних умов враховуючи, що у повітрі міститься 20,1% кисню, то отримаємо величину $V = 1,301 \cdot 10^9$ м³. За отриманим результатом можна стверджувати, що ліс представляє собою гігантську фабрику кисню.

Порівняємо масу фотосинтетично зв'язаного атмосферного вуглекислого газу лісами Львівщини з промисловими викидами цього газу. За даними Управління статистики у Львівській області, у 2021 р. викиди вуглекислого газу в атмосферу повітря стаціонарними джерелами склали $m_e = 3126,0$ тис. тонн (Регіональна доповідь..., <https://www.lv.ukrstat.gov.ua/>), що суттєво менше ніж m_{cs} . Ліси Львівщини можуть бути донорами чистого повітря для сусідніх областей, адже Львівщина – одна із найбільш лісистих областей України (Державна цільова програма..., <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/977-2009-n>).

Нагромадження фітомаси відбувається також і завдяки вирощуванню сільськогосподарських культур. Так, фітомаса злакових культур може змінюватися від 2 до 10 тонн на 1 га, що відповідає $0,2-1$ кг/м² (Камінський, Асанішвілі, 2020). Зокрема, фітомаса озимих зернових культур Південного степу з внесенням добрив становить в межах $0,493-0,518$ кг/м² (Drobitko, Kachanova, 2023). У той же час фітомаса рівнинних букових насаджень у свіжих дубово-грабових бучинах становить приблизно $25,6$ кг/м² (Миклуш С., Миклуш Ю., 2009). Тому хоча площа сільськогосподарських земель становить 41,3 млн га (Державної служби України..., <https://land.gov.ua/>) проти 10,4 млн га зайнятих лісами, вклад перших у загальну фітомасу та інші складові фотосинтезу незначний.

Викладені теоретичні засади квантово-оптичного методу визначення мас продуктів фотосинтезу деревостанів вимагають подальшого розвитку та удосконалення. Актуальним завданням залишається з'ясування величини коефіцієнта квантової ефективності процесів фотосинтезу B для різних деревних видів, встановлення коефіцієнту зімкненості деревостану та інших кореляційних коефіцієнтів.

Лінійна залежність мас продуктів фотосинтезу деревостану від надходження енергії ΦAP дає змогу автоматизувати процес і вимірювати одночасно маси усіх продуктів фотосинтезу. Поєднання квантово-оптичного методу з комп'ютерною програмою і використання даних, отриманих від безпілотних літальних апаратів, спростить встановлення кореляційних коефіцієнтів, дасть змогу вчасно виявляти зміни у лісовій екосистемі, зумовлені зміною клімату чи людською діяльністю, і приймати відповідні рішення щодо подальшої стратегії управління лісами.

Висновки (Conclusions).

1. Запропонований комплексний прямий квантово-оптичний метод одночасного визначення мас продуктів фотосинтезу деревостану за квантами енергії сонячної радіації не передбачає використання лісівничо-таксаційних показників деревостану – середніх діаметра і висоти стовбура, віку, продуктивності (класу бонітету), об'єму крони тощо. Враховує як надземну, так і підземну частину деревостану.

2. Встановлено, що синтез молекул клітковини і нагромадження фітомаси забезпечують пакети

фотонів – квантів світла, що поглинаються хлорофілом у червоній ділянці оптичного спектра з довжиною хвилі 660 нм.

3. Отримана лінійна залежність мас продуктів фотосинтезу деревостанів від енергії ΦAP : $m_i = \mu_i \cdot A \cdot W$, де A – характерний коефіцієнт. На засадах квантової оптики визначене значення коефіцієнта A , яке становить $11,031 \cdot 10^{-9}$ моль/Дж.

4. Розраховані за отриманими теоретичними співвідношеннями маси продуктів фотосинтезу лісів Львівської області становлять: фітомаса – 3851,04 тис. тонн, депонований вуглець – 5642,76 тис. тонн, фотосинтетично зв'язаний атмосферний вуглекислий газ – 1390,91 тис. тонн та виділений кисень – 3719,63 тис. тонн. Реальна затрата води на продукування фітомаси становить 2096,90 тис. тонн. Теоретичні розрахунки задовільно співвідносяться з літературними даними, визначеними традиційними методами.

5. Лінійна залежність мас продуктів фотосинтезу від надходження енергії ΦAP дає змогу автоматизувати процес і вимірювати одночасно маси усіх продуктів фотосинтезу.

6. Застосування запропонованого методу в автоматизованій комп'ютерній системі дасть змогу для конкретного деревостану вчасно виявляти хвороби лісу, вплив зміни клімату та людської діяльності, вчасно вносити зміни у стратегію сталого управління лісами.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури (References)

- Bessonova, V.P., & Yakovleva-Nosar, S.O. (2004). *Plant Physiology*. Dnipropetrovsk: Svidler, A.L. Retrieved from <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10162>. [Бессонова, В.П., Яковлева-Носар, С.О. (2004). *Фізіологія рослин*. Дніпропетровськ: Свідлер, А.Л.] (in Ukrainian)
- Brown, S. (1989). Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. *Forest Science*, 35(4), 881-902. <https://doi.org/10.1093/forestscience/35.4.881>
- Chaskovskyi, O.H., Myklush, Yu.S., Kummerle, T., & Pontus, O. (2016). Carbon balance of natural complexes in Western Ukraine. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 26(1), 16-29. <https://doi.org/10.15421/40260102> [Часковський, О.Г., Миклуш, Ю.С., Кюмерле, Т., Понтус, О. (2016). Вуглецевий баланс природних комплексів Західної України. *Науковий вісник НЛТУ України*, 26(1), 16-29] (in Ukrainian)
- Constandache, C., Tudor, C., Vlad, R., Dinca, L., & Popovici, L. (2021). The productivity of pine stands on degraded lands. *Scientific Papers E. Land Reclamation, Earth Observation @ Surveying. Environmental Engineering*, 10, 76-84. <https://landreclamationjournal.usamv.ro/pdf/2021/Art11.pdf>
- Dengsheng, L. (2006). The Potential and Challenge of Remote Sensing-Based Biomass Estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 27(7), 1297-1328. <https://doi.org/10.1080/01431160500486732>.
- Dixon, K.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *February 1 Science*, 263(5144), 185-190. <https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- Drobitko, A., & Kachanova, T. (2023). Agroecological substantiation of technologies for growing grain crops in the conditions of the Southern Steppe of Ukraine. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 27(4), 9-17. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/4.2023.09>
- Giancoli, D.C. (1984). *General Physics*. V 2. Prentice Hall, Inc.
- Gwal, S., Singh, S. & Amand, S. (2020). Understanding forest biomass and net primary productivity in Himalayan ecosystem using geospatial approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(4), 2517-2534. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00844-4>
- Halik, O.I., & Basiuk, T.O. (2014). *Climatic Reference Data of Ukraine*. Rivne: National University of Water and Environmental Engineering. [Галік, О.І., Басюк, Т.О. (2014). *Довідкові дані з клімату України*. Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування] (in Ukrainian)
- Kaminskyi, V.F., & Asanishvili, N.M. (2020). Features of maize growth and development in crops and their photosynthetic activity depending on cultivation technology in forest-steppe conditions. *Foothill and Mountain Agriculture and Animal Husbandry*, 67(11), 92. <https://phzt-journal.isgkr.com.ua>. <https://doi.org/10.32636/01308521.2020-2-6>. [Камінський, В.Ф., Асанішвілі, Н.М. (2020). Особливості росту і розвитку рослин кукурудзи у посівах та їх фотосинтетична діяльність залежно від технології вирощування в умовах Лісостепу. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*, 67(11), 92] (in Ukrainian)
- Kucheriavyi, V.P. (2001). *Ecology*. Lviv: Svit. [Кучерявий, В.П. (2001). *Екологія*. Львів: Світ. 512 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P.I. (2002). *Phytomass of the Forests of Ukraine*. Ternopil: Zbruch. [Лакида, П.І. (2002). *Фітомаса лісів України*. Тернопіль: Збруч. 282 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P.I., Lashchenko, A.H., & Lashchenko, N.M. (2006). *Biological Productivity of Oak Stands in Podillia*. Kyiv: National Scientific Center "Institute of Agrarian Economics" [Лакида, П.І., Лашченко, А.Г., Лашченко, Н.М. (2006). *Біологічна продуктивність дубових деревостанів Поділля*. Київ: Національний науковий центр «Інститут аграрної економіки». 278 с.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P.I., Shvidenko, A.Z., Shchepashchenko, D.H., Vasylyshyn, R.D., Bilous, A.M., Lakyda, I.P., & Matusevych, L.M. (2013). Biotic productivity of forests of Ukraine in the European eco-

- resource context. *Bioresources and Nature Management*, 5(5-6), 111-116. [Лакида, П.І., Швиденко, А.З., Щепашенко, Д.Г., Василишин, Р.Д., Білоус, А.М., Лакида, І.П., Матусевич, Л.М. (2013). Біотична продуктивність лісів України в європейському екоресурсному вимірі. *Біоресурси і природокористування*, 5(5-6), 111-116] (in Ukrainian)
- Larcher, W. (2003). *Plant Ecology*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1093/aob/mch084> https://www.researchgate.net/publication/31113128_h_edn
- Matthews, G. (1993) *The Carbon Content of Trees*. Forestry Commission. Tech. Paper 4. Edinburgh.
- Moroz, V. (2024). Bioproductivity of pine forests in Polissia. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 20(5), 120-134. <https://doi.org/10.31548/dopovid/5.2024.120> [Мороз, В. (2024). Біопродуктивність соснових лісів Полісся. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*, 20(5), 120-134] (in Ukrainian)
- Myklush, S.I. (2011). *Plain Beech Forests of Ukraine: Productivity and Sustainable Management Organization*. Lviv: ZUKTs. [Миклуш, С.І. (2011). *Рівнинні букові ліси України: продуктивність та організація сталого господарства*. Львів: ЗУКЦ. 188 с.] (in Ukrainian)
- Myklush, S.I., & Myklush, Yu.S. (2009). General phytomass of plain beech forests of Ukraine. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 19(4), 16-21. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2009/19_4/16_Myklusz_19_4.pdf [Миклуш, С.І., Миклуш, Ю.С. (2009). Загальна фітомаса рівнинних букових насаджень України. Львів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 19(4), 16-21] (in Ukrainian)
- Myklush, S., Myklush, Yu., Debryniuk, Iu., & Prystupa, R. (2024). Change in the productivity of stands of the spruce (*Picea abies* L.) mountain Carpathian forests district over a 70-year period. *Folia Forestalia Polonica. Series A – Forestry*, 66(2), 61-71. <https://doi.org/10.2478/ffp-0006>
- Mykrushyn, M.M., Mykrushyna, Ye.M., Peterson, M.N., & Melnikov, M.M. (2006). *Plant Physiology*. Vinnytsia: New book. [Микрушин, М.М., Микрушина, Є.М., Петерсон, М.Н., Мельников, М.М. (2006). *Фізіологія рослин*. Вінниця: Нова книга. 424 с.] (in Ukrainian)
- Myroniuk, V., Bell, D.M., Gregory, M.J., Vasylyshyn, R. & Bilous, A. (2022). Uncovering forest dynamics using historical forest inventory data and Landsat time series. *Forest Ecology and Management*, 513, 120184. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120184>
- Official website of Lviv Regional Department of Forestry and Hunting. <https://lvivlis.gov.ua> [Офіційний сайт Львівського обласного управління лісового і мисливського господарства. <https://lvivlis.gov.ua>] (in Ukrainian)
- Regional Report on the State of the Environment in Lviv Oblast for 2021. Main Department of Statistics in Lviv Oblast. <https://www.lv.ukrstat.gov.ua>. [Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Львівській області за 2021 р. Головне управління статистики у Львівській області] (in Ukrainian)
- State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography, and Cadastre. <https://land.gov.ua/> [Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру] (in Ukrainian)
- State Targeted Program of Forest of Ukraine for 2002-2015. №977 : 25. <https://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/977-2009-п> [Державна цільова програма Ліси України на 2002-2015 рр: затверджено Постановою Кабінету міністрів України від 16.09.2009 р. №977] (in Ukraine)
- Sytnyk, S., Lakuda, M., Lakuda, V., & Lakuda, P. (2018). Basic density and crown parameters of forest forming species within Steppe zone in Ukraine. *Folia Ecologica*, 45(2), 82-91. <https://www.researchgate.net/>. Publication/330677342. <https://doi.org/10.2478/foecol-2018-0009>
- Tomiltseva, A.I., Yatsyk, A.V., & Mokin, V.B. (2007). *Ecological Principles of Water Resources Management*. Kyiv: Institute of Ecological Management and Sustainable Nature Use. [Томільцева, А.І., Яцик, А.В., Мокін, В.Б. (2007). *Екологічні основи управління водними ресурсами*. Київ: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування] (in Ukrainian)
- Vaidanych, V.I., & Vaidanych, T.V. (2008). Quantum approach to determining the increase of phytomass in forest stands. *Forestry, Pulp and Paper, and Wood Processing Industry: Interdepartmental Scientific and Technical Bulletin*, 34, 10-17. [Вайданич, В.І., Вайданич, Т.В. (2008). Квантовий підхід до визначення приросту фітомаси деревостанів. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 34, 10-17] (in Ukrainian)
- Vaidanych, V.I., Deineka, A.M., Myklush, S.I., Krynytskyi, H.T., Dovha, N.D., & Vaidanych, T.V. (2012). Application of the quantum approach to determine the photosynthesized CO₂ sink, sequestered carbon and produced oxygen in forest stands. *Forestry, Pulp and Paper, and Wood Processing Industry: Interdepartmental Scientific and Technical Bulletin*, 38, 6-15. [Вайданич, В.І., Дейнека, А.М., Миклуш, С.І., Криницький, Г.Т., Довга, Н.Д., Вайданич, Т.В. (2012). Застосування квантового підходу для визначення фотосинтетично зв'язаного вуглекислого газу, депонованого вуглецю та продукovanого деревостаном кисню. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*, 38, 6-15] (in Ukrainian)
- Vaidanych, V.I., Dovha, N.D., & Vaidanych, T.V. (2008). On estimating the accumulated phytomass of plants through solar radiation energy. *Bulletin of Ternopil State Technical University*, (3), 183-187. [Вайданич, В.І., Довга, Н.Д., Вайданич, Т.В. (2008). Про оцінку накопиченої фітомаси рослин за енергією

- сонячної радіації. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, 3, 183-187] (in Ukrainian)
- Vasylyshyn, R.D. (2013). Carbon sequestration and oxygen production functions of fir stands in the Ukrainian Carpathians. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 23(9), 347-351. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_9/index.htm [Василишин, Р.Д. (2013). Вуглецедепонувальна та киснепродукувальна функції повних ялицевих насаджень Українських Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(9), 347-351] (in Ukrainian)
- Vasylyshyn, R.D., & Domashovets, H.S. (2008). Phytomass and sequestered carbon in forests of Lviv Oblast in the context of forest-vegetation zoning. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 18(3), 50-58. Retrieved from <https://www.research.not/publication/330854122> [Василишин, Р.Д., Домашовець, Г.С. (2008). Фітомаса та депонований вуглець лісів Львівської області в контексті лісорослинного районування. *Науковий вісник НЛТУ України*, 18(3), 50-58] (in Ukrainian)
- Vasylyshyn, R.D., Lakyda, I.P., Melnyk, O.M., Lakyda, M.O., & Rymarenko, Yu.P. (2021). Organic carbon in forest plant biomass in Kyivshchyna. *Ukrainian Journal of Forests and Wood Science*, 12(3), 63-71. <https://doi.org/10.31548/forest2021.03.005> [Василишин, Р.Д., Лакида, І.П., Мельник, О.М., Лакида, М.О., Римаренко, Ю.П. (2021). Органічний вуглець у рослинній біомасі лісів Київщини. *Ukrainian journal of Forests and Wood science*, 12(3), 63-71] (in Ukrainian)
- Vasylyshyn, R.D., Lakyda, I.P., Vasylyshyn, I.O., & Dyachuk, V.P. (2021). Features of primary production formation in forests of the Carpathian NNP under different site conditions. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 22, 121-129. <https://doi.org/10.15421/412110> [Василишин, Р.Д., Лакида, І.П., Василишин, І.О., Дячук, В.П. (2021). Особливості формування первинної продукції лісів Карпатського НПП у різних лісорослинних умовах. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 22, 121-129] (in Ukrainian)
- Vasylyshyn, R.D., & Lakyda, I.P. (2021). *Biomass and primary production of Europeanbeech (Fagus sylvatica L.) stands in Ukrainian Carpathians*. New impulses for the development of natural sciences in Ukraine and EU countries: Collective monograph. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 1-28. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-141-1-1>
- Vasylyshyn, R.D., & Yurchuk, Yu.M. (2021). *Bio-productivity of forests in Zhytomyr region*. Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences: Collective monograph. Vol. 1. Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-086-5-4>
- Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Soshenskyi, O., Lakyda, M., Melnyk, O., & Slusarchuk, V. (2022). Environmentally balanced preconditions for use of logging residues in forests of Ukrainian Carpathians for energy production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1042 (012009), <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1042/1/012009>
- Vasylyshyn, R., Lakyda, I., Spirochkin, A., Lakyda, M., Vasylyshyn, O., & Terentiev, A. (2023). Biomass potential of forest residues in forests of Ukrainian Carpathians as a component of regional green economy. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1), 012096. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012096>
- Yude Pan, Richard A. Birdsey, Oliver L. Philips, & Robert B. Jackson (2013). The structure distribution and biomass of the worlds forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 44(1), 593-622. <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/45295>
- Zibtsev, S., Pasternak, V., Vasylyshyn, R., Myroniuk, V., Sydorenko, S., & Soshenskyi, O. (2024). Assessment of carbon emissions due to landscape fires in Ukraine during war in 2022. *Ukrainian journal of Forest and Wood Science*, 15(1), 126-139. <https://doi.org/10.31548/forest/1.2024.126>

Integrated direct determination of the biomass of photosynthesis products in forest stands based on quanta of solar radiation energy

V. Vaidanych¹, A. Deineka², S. Myklush³, I. Pirko⁴, T. Vaidanych⁵

An integrated direct quantum-optical method is proposed for determining the mass of photosynthesis products in forest stands – including phytomass,

¹ *Vasyl Vaidanych* – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Professor, Honored Worker of Education of Ukraine. Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: vasyl.vaidanych@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1378-0791>

² *Anatoly Deineka* – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Economics, Professor. Western Interregional Department of Forestry and Hunting, 8B Yavornytskyi st., Lviv, 79054, Ukraine. E-mail: andey67@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-5070-9759>

³ *Stepan Myklush* – Full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Agricultural Sciences, Professor at the Department of Forest Inventory and Forest Management. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynyk st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: msi_s@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9762-1190>

⁴ *Igor Pirko* – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Sciences. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynyk st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: pirko@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2378-2929>

⁵ *Tetyana Vaidanych* – Senior Lecturer, Department of Marketing and Logistics, Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynyk st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: vajdanych@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9930-5310>

sequestered carbon, photosynthetically bound atmospheric carbon dioxide, released oxygen, and the volume of water consumed in phytomass production — based on the quanta of solar radiation energy. Conventional methods for assessing photosynthesis products are generally extremely labor-intensive and energy-consuming, and are primarily used to determine phytomass accumulation and sequestered carbon. Studies focused on quantifying the amount of water consumed in the process of phytomass production through photosynthesis are virtually absent. As a result, no researcher has yet succeeded in comprehensively quantifying all photosynthesis products for a given forest stand, which makes it difficult to conduct a complete ecological analysis. Moreover, the existing methods fail to utilize the fundamental driver of the photosynthesis process — solar radiation energy.

The quantum-optical method is based on the principle that the energy of solar radiation — more precisely, the energy of photosynthetically active radiation (PAR) — is divided into discrete quanta of energy, i.e. photons, which are absorbed by chlorophyll, resulting in the formation of cellulose molecules. The mass of these molecules is proportional to the number of absorbed photons, that is, to the amount of PAR energy incident on the forest stand. However, not every photon induces a photosynthesis reaction. Therefore, a quantum efficiency coefficient, B , is introduced to account for this.

It is known that the conversion of one molecule of carbon dioxide into a molecule of carbohydrate (cellulose) and a molecule of oxygen requires the absorption of 8 to 12 photons, which form a photon packet. We will use the average value of this quantity, $n = 10$. Thus, to determine the mass of a given photosynthesis product, it is necessary to calculate the number of photon packets — from the total amount of absorbed PAR energy — that contribute to the photosynthesis process, and relate this to the number of molecules produced through photosynthesis. After some straightforward mathematical operations, we obtain an expression for the masses of the respective photosynthesis products in forest stands:

$$m_i = \mu_i \cdot A \cdot W$$

where m_i — mass of the corresponding photosynthesis product (phytomass, carbon dioxide, oxygen, water), μ_i — molecular weight of the respective product, W — energy of photosynthetically active radiation (PAR),

A — a constant expressed through the quantum characteristics of photons:

$$A = \frac{B \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot n \cdot N_A},$$

where $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ — speed of light; $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Dj} \cdot \text{s}$ — Planck's constant; $n = 10$ — number of photons per photon packet; $B = 0,05\%$ — quantum efficiency of photosynthesis; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ — Avogadro's constant; $\lambda = 660 \text{ nm}$ — wavelength of red light; $(h \cdot c)/\lambda$ — energy of a photon. It is known that chlorophyll also absorbs light in the blue region of the spectrum, with a wavelength of 440 nm ; however, its contribution is relatively minor.

Since oxygen is released along with the formation of cellulose, the carbon from the carbon dioxide — the input substrate of photosynthesis — remains as residual carbon (sequestered carbon). Its mass can be expressed through the molar masses of cellulose and carbon dioxide, as well as phytomass, and ultimately, it can also be related to the energy of solar radiation.

Thus, the mass of any photosynthesis product depends only on its molar mass and the amount of PAR energy that has reached a selected area of the forest stand during the growing season or other period of time.

The established relationship between the increase in the mass of photosynthesis products and the energy of photosynthetically active radiation (PAR) has been derived for fully closed forest stands. In fact, for each forest plot, correlation coefficients must be applied to account for canopy closure degree, stand age, tree species composition, site quality class (bonitet), soil types, and other characteristics.

The linear relationship between the mass of photosynthesis products and the incoming energy of photosynthetically active radiation (PAR) enables automation of the process and simultaneous measurement of the masses of all photosynthesis products. Combining the quantum-optical method for determining the mass of photosynthesis products with a computer program and established correlation coefficients for a selected forest stand will allow timely detection of forest diseases, climate changes, human impacts, etc. This, in turn, will allow for prompt adjustments to sustainable forest management strategies.

Key words: photosynthesis; photons; photons energy; solar radiation energy; phytomass; deposited carbon; quantum-optical method.