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/10.15421/412021>
Article received 2020.02.13
Article accepted 2020.12.28

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Platon Tretyak
platon.tretyak@qmail.com
Oleksandra Myshugy str., 7/15, Lviv,
79034, Ukraine

УДК 630*9: 581.1:581.5

Матеріально-енергетичний вплив лісової рослинності на довкілля

П. Р. Третяк¹, Ю. І. Черневий²

Здійснена спроба теоретичного опрацювання проблеми оцінювання матеріально-енергетичного впливу на приземну атмосферу приросту фітомаси лісів України, порівняно з іншими типами рослинності, стосовно деponування вуглецю, продукуванню кисню, транспірації і збагачення атмосфери вологою, а також споживання енергії з навколишнього середовища.

Теоретична концепція побудована на основі відомих біохімічних і фізичних закономірностей. Це матеріально-енергетичні пропорції фотосинтезу та супроводжуючої його транспірації, а також охолоджуючого повітря ефекту.

Отримані аналітичні матеріали підтверджують істотний вплив процесів фотосинтезу і супутньої йому транспірації на газовий склад та енергетичний потенціал приземного шару повітря.

Ліси України загалом щорічно здатні деponувати 3 т·га⁻¹ вуглецю, продукувати 8 т·га⁻¹ кисню та збагачувати повітря вологою в обсязі 3600 т·га⁻¹. Ці процеси вимагають відповідного споживання енергії, що призводить до охолодження 30-метрового приземного шару повітря у середньому впродовж року на 2,4°C. Такі екологічні функції виконують також лучна рослинність та агрокультури. Однак, цей процес відбувається лише під час відносно короткого періоду фотосинтезу. За показниками інтенсивності фотосинтезу і транспірації, екологічні функції лісів утрічі перевищують відповідні властивості лучної рослинності.

У випадку вирощування високопродуктивних лісів, річний приріст стовбурового запасу яких сягав би 10 м³·га⁻¹, збагачення приземного шару атмосфери киснем було б удвічі більшим, ніж за теперішнього середнього приросту 5 м³·га⁻¹, а водяною парою – у три-чотири рази більше. Відповідно, у три-чотири рази більшим було б і споживання теплової енергії з навколишнього природного середовища.

Ключові слова: фотосинтез; транспірація; фітомаса; приріст; ліси; агрокультури; деponований вуглець; кисень; енергетика; клімат.

¹ Третяк Платон Романович – академік Лісівничої академії наук України, віце-президент ЛАН України, доктор біологічних наук, професор. Комунальний вищий навчальний заклад «Прикарпатський фаховий коледж лісового господарства та туризму», вул. Замкова, 14, м. Болехів, Івано-Франківська обл., Україна. Тел.: +38-067-662-68-41. E-mail: platon.tretyak@qmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8278-060X>

² Черневий Юрій Іванович – академік Лісівничої академії наук України, доктор біологічних наук. Комунальний вищий навчальний заклад «Прикарпатський фаховий коледж лісового господарства та туризму», вул. Замкова, 14, м. Болехів, Івано-Франківська обл., Україна. Тел.: +38-03437-34668. E-mail: plhc@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1180-1677>

Вступ. Сучасні зміни клімату є надзвичайно важливою екологічною проблемою людської цивілізації. Адже, окрім впливу природних чинників, вона зумовлена і потужним антропогенним впливом на біосферу, зокрема дефорестацією – знищенням лісового покриву планети, що призвело до глобальної кризової еколого-економічної ситуації (Gorte & Sheikh, 2010; *The Money Trees*, 2019). Особливо відчутною стала зміна клімату у напрямі потепління та посушливості у тропічних країнах (Moutinho & Schwartzman, 2005). Проте і в межах помірного кліматичного поясу тривале лісокористування теж зумовило істотні зміни клімату з небажаними екологічними наслідками (Gilliam, 2016). Цей аспект є також важливою європейською проблемою. Недарма у 2019 р. Європейська комісія звернулася до урядів та парламентів країн й регіональних органів влади з пропозицією «Посилення дій ЄС щодо захисту та відновлення світових лісів».

Поряд з цим, роль лісів у формуванні кліматичних змін у регіонах і на континентах ще недостатньо вивчена, незважаючи на те, що ці питання висвітлені у багатьох фундаментальних працях класиків лісівництва. Потребують дослідження питання, що стосуються впливу лісів на газовий склад приземних шарів атмосфери, їх температурний режим тощо. Тому, метою нашої розвідки була чи не перша спроба теоретичного опрацювання цієї наукової проблеми, зокрема, стосовно матеріально-енергетичної оцінки впливу на приземний шар атмосфери приросту фітомаси лісів України порівняно з іншими типами рослинності. Аспекти стосуються депонування діоксиду вуглецю, продукування кисню, транспірації і збагачення атмосфери вологою, а також споживання світлової і теплової енергії з навколишнього середовища. Ці процеси матеріально-енергетичного обміну між рослинністю та приземними шарами атмосфери мають вагомe соціально-екологічне значення і залежать від продуктивності фітомаси на земній поверхні (*Secretariat of the Convention...*, 2010). Оскільки лісова рослинність відзначається особливо високими потенційними показниками приросту фітомаси, то його екологічний аспект заслуговує докладного дослідження (*Forest Europe*, 2015), оскільки може мати важливе прикладне значення щодо запобігання локальних змін клімату (Moutinho & Schwartzman, 2005).

Теоретична концепція. Від Сонця до Землі поступає неперервний потік світлової енергії, обсяг якої оцінюють $342 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (*Energy and Climate Change*, 2015). Частина її, відбиваючись від поверхні, не може повернутися у космос, оскільки затримується молекулами різних газів, що призводить до підвищення температури поверхні Землі і нижніх шарів атмосфери, тобто до виникнення парникового ефекту. У середніх широтах Європи ($30\text{--}60^\circ$) на поверхню суші орієнтовно поступає $100\text{--}250 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ сонячної енергії з максимумом у липні, коли сягає величини $300\text{--}350 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Середньорічна поглинута енергія короткохвильового випромінюван-

ня становить $60\text{--}150 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ з максимумом у липні – $200\text{--}300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Середньорічна відбита енергія короткохвильового випромінювання сягає приблизно $25 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ з максимумом у липні – $40\text{--}100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ (Hatzianastassiou et al., 2005). Значна частина її може акумулюватися у нижніх шарах атмосфери завдяки парниковому ефекту. Процес відбувається внаслідок екранування відбитої радіації у приземних шарах атмосфери. Спричиняють це явище так звані парникові гази, серед яких найважливішою є водяна пара, меншою мірою – значимі CO_2 , N_2O та CH_4 . Водяна пара в атмосфері поглинає від 49 до $75 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ відбитої радіації, тобто до 60% від загального обсягу її поглинання. Зокрема, саме водяна пара поглинає від 38–43% короткохвильової радіації, тобто разом з озоном захищає поверхню планети від її шкідливої дії, що також визначає нагрівання атмосфери. Саме завдяки парниковому ефекту, температура поверхні планети є на 33° вищою, ніж була б за умови його відсутності (Schmidt, Ruedy, Miller, & Lacis, 2010; *Climate Change*, 2013).

Однак, традиційно, зміни клімату внаслідок парникового ефекту прийнято пояснювати збільшенням концентрації CO_2 в атмосфері, пропорційно до якої збільшується середня температура на планеті (Kahn, 2016). Загалом за останніх 100 років вона зросла на $1,2^\circ\text{C}$. За п'ять останніх років концентрація вуглекислого газу в атмосфері зросла від 390 до 400 ppm , а середня температура повітря збільшилася на $0,25^\circ\text{C}$. (*GISS Surface*, 2016). Проте, доволі переконливою є й інша версія щодо ролі у формуванні парникового ефекту водяної пари у повітрі. До такого висновку дійшли вчені НАСА – Асоціації агенцій чисте повітря у США. Зокрема встановлено, що, окрім фізичного випаровування, особливо вагомe значення на зміни клімату має інтенсивність транспірації (*Primer on Climate Change Science*, 2011; Schlesinger & Jasechko, 2014). Встановлено також, що якщо вміст води у повітрі збільшується на 10%, то це призводить до збільшення його температури, внаслідок парникового ефекту, на $1,34^\circ\text{C}$. У разі зменшення вмісту води в атмосфері на 10%, виникнення інтенсивність парникового ефекту буде зменшуватися на $1,6^\circ\text{C}$ (Rákóczi & Iványi, 1999–2000). У світовому масштабі загальний обсяг випаровування становить значну частку – 39% від загальної кількості опадів. За рахунок транспірації у повітря поступає приблизно 60% від загального обсягу випаровування води, а в тропічних лісах ця частка складає 71% (Schlesinger & Jasechko, 2014).

Отже, зміни газового складу і температурного режиму приземних шарів пов'язані значною мірою і з фізіологічною діяльністю рослинного покриву, зокрема лісового. Це стосується не лише депонування біомасою з повітря карбону та збагачення повітря киснем, але й транспіраційної функції рослинності. Водночас, окрім матеріального характеру, рослинність активно спричиняє зміни енергетичного балансу у приземних шарах атмосфери, адже під час фотосинтезу, тран-

спортуванні вологи судинами від кореневої системи до листя, а також транспірації вологи листковими пластинками потрібні значні енергетичні затрати. Енергетичні ресурси для цих процесів вилучаються з навколишнього повітряного середовища за рахунок поглинання світлової і теплової енергії (*Energy and Climate Change*, 2015). Це, своєю чергою, призводить до відповідного зниження температури повітря та збільшення його відносної вологості. Проте такі наукові енергетичні аспекти експериментально ще недостатньо вивчені, а тому не висвітлені у науковій літературі. Однак, теоретично їх можна узагальнити у наступних положеннях.

Матеріально-енергетичні пропорції реакції фотосинтезу. Узагальнено їх представляє загально відоме рівняння з такими матеріально-енергетичними пропорціями:

Отже, 264 г діоксиду вуглецю (6CO_2) містять у своєму складі 72 г вуглецю (6C). Унаслідок реакції фотосинтезу споживається 0,795 кВт·год світлової енергії і утворюється 180 г гектози ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) та виділяється 192 г кисню (6O_2). Таким чином, на 1 т депонованого вуглецю споживається 1,5 т води і приблизно 11 МВт·год світлової енергії. При цьому отримуємо 2,5 т гектози і 2,67 т кисню. Вміст вуглецю в сухій речовині деревини прийнято вважати в обсязі 50% (Pretzsch, 2009). Таким чином, 1 т вуглецю міститься у 2 тонах сухої деревини. Густина сухої речовини деревини залежить від деревного виду та умов її нагромадження. У середньому вона становить: для дуба – 655, бука – 650, граба – 600 $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Тобто, умовно можна вважати, що в одному кубічному метрі деревини міститься приблизно 300 кг депонованого вуглецю. Таким чином, 1 т депонованого вуглецю відповідно міститься у 3,3 м^3 деревини.

Матеріально-енергетичні пропорції транспірації. Середньорічний обсяг випаровування у Центральній та Східній Європі є близьким до кількості опадів, яка становить 500-700 $\text{мм} \cdot \text{рік}^{-1}$. Однак у горах, де випадає 1000-1400 $\text{мм} \cdot \text{рік}^{-1}$, вона є меншою на 1 $\text{мм} \cdot \text{день}^{-1}$, тобто складає орієнтовно 700-1000 $\text{мм} \cdot \text{рік}^{-1}$ (*Energy and Climate Change*, 2015). За такої кількості опадів типовий діапазон річного випаровування для різних типів рослинного покриву суходолу становить для хвойних лісів 550-800 мм, а для трав'яних фітоценозів лук він може сягати 400-600 мм, зокрема для агрокультур – 370-430 (Nisbet, 2005). Умовно для лісостепової зони України та зони мішаних лісів, де щорічно випадає 500-600 мм опадів, можна прийняти величину сумарного річного випаровування лісовою рослинністю на рівні 500 мм.

У зоні широколистяних лісів України щорічно випадає 600-800 мм опадів. Тут лісова рослинність

випаровує щорічно 500-700 мм опадів. Відповідно у Карпатах, де щорічно випадає від 800 до 1500 мм, величина сумарного річного випаровування орієнтовно становить 700-1200 мм на рік, в т.ч. за рахунок власне транспірації – 600-1000 мм.

Однак у випадку лісової рослинності цей показник може бути значно вищим. Адже, інтенсивність транспірації (коефіцієнт транспірації) залежить від багатьох чинників, серед яких особливо значущим є розмір поверхні випаровування, тобто площі асиміляційного апарату (листя, стебла тощо), а також його структурно-морфологічних особливостей. На жаль, фактичних даних та й публікацій з цих питань бракує. Дослідження польських вчених (Kowalik & Scalenghe, 2009) показали, що такі деревні породи як модрина, липа і бук мають найвищі показники коефіцієнта транспірації. Вони потребують більше 1000 грам води для транспірації, щоб забезпечити збільшення на 1 грам сухої речовини продуктів фотосинтезу. Менші значення були виявлені для пшениці – 500 $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$, люцерни – 850 $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$, проса – 270 $\text{г} \cdot \text{г}^{-1}$.

Відповідно до наведених пропорцій, загальна маса транспірованої вологи (m_{tr}) становить:

$$m_{\text{tr}} = Z_d \cdot k_t; \quad (2)$$

де: Z_d – річний приріст сухої фітомаси, т; k_t – коефіцієнт транспірації, $\text{т} \cdot \text{т}^{-1}$.

Наприклад, для депоновання 1 т вуглецю, тобто 2 т сухої речовини фітомаси бука необхідно транспірувати $2 \text{ т} \times 1000 \text{ т} \cdot \text{т}^{-1} = 2000 \text{ т}$ водяної пари.

Для випаровування води потрібні великі затрати теплової енергії, адже питома теплота пароутворення (r) приблизно становить 2,3 МДж·кг $^{-1}$ або 637 кВт·год·т $^{-1}$ чи 0,637 Вт·год·г $^{-1}$. Отже, знаючи масу транспірованої вологи, можна вираховувати енергетичні затрати (E_{tr}), які потрібні для її випаровування:

$$E_{\text{tr}} = m_{\text{tr}} \cdot r; \quad (3)$$

де: m_{tr} – маса випарюваної води; r – питома теплота пароутворення.

Відповідно, для випаровування 1000 т води необхідно спожити з навколишнього середовища $1000 \text{ т} \times 637 \text{ кВт} \cdot \text{год} \cdot \text{т}^{-1} = 637 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ енергії.

Судинний підйом водного розчину. Щоб забезпечити підйом води та мінеральних речовин від коренів до листків крон дерев теж необхідно витратити певну енергію (E_h):

$$E_h = m_h \cdot h; \quad (4)$$

де: m_h – маса піднятого водного розчину; h – висота дерева.

Оскільки з водного розчину мінеральних речовин випаровується лише вода, то $m_h > m_{\text{tr}}$. Однак, їхня концентрація навіть у період весняного сокоруху зазвичай невисока: у кленового соку – до 6, а у березового – до 2%. Тому для обчислень умовно приймаємо, що $m_h = m_{\text{tr}}$.

Наприклад, щоб енергетично забезпечити випаровування впродовж року 1000 т води, потрібно її підняти від коренів до намету деревостану, умов-

но на висоту 30 м. Для цього необхідно затратити енергію на виконання роботи в обсязі $1 \cdot 10^6 \text{ кГ} \times 30 \text{ м} = 30 \cdot 10^6 \text{ кГ} \cdot \text{м}$ або 294,2 МДж чи 81,72 кВт·год. Ця величина у 7693 рази менша, ніж вказані вище затрати енергії на випаровування цієї ж кількості води. Тобто цю величину можна не враховувати під час загально-енергетичних обчислень процесів фотосинтезу і транспірації.

Охолоджуючий ефект. Потреби в енергії процесів фотосинтезу і транспірації забезпечуються поглинанням її з навколишнього середовища, що призводить до його охолодження.

Наприклад, щоб охолодити на 1°C 1 м^3 повітря потрібно вилучити з нього 0,37 Вт·год енергії. Це за умови, що густина повітря за нормальних умов становить $1,293 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, а питома теплоємність – $1 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ або $0,278 \text{ Вт} \cdot \text{год} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Отже, щоб постійно підтримувати такий температурний градієнт охолодження, потік вилучення теплової енергії має становити 0,36 Вт з 1 м^3 повітря. Стосовно приземного шару повітря 30 м завтовшки на площі 1 га, об'єм якого становить 300 тис. м^3 , цей показник потужності вилучення енергії повинен становити 10,8 кВт. У перерахунку на тривалість року, яка становить 8760 год., для підтримання такого охолоджуючого ефекту необхідно загалом вилучити з 1 м^3 приземного шару повітря $3,15 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ енергії, з 30 м^3 – $94,46 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, а з 300 тис. м^3 – $944,6 \text{ МВт} \cdot \text{год}$. Якщо ж з об'єму повітря 300 тис. м^3 на випаровування 1000 т води споживається упродовж року $637 \text{ МВт} \cdot \text{год}$ енергії, то це забезпечує його постійне охолодження на $0,67^\circ\text{C}$. Тобто, це є температурний градієнт охолодження повітря відносно навколишнього середовища.

Представлені вище теоретичні матеріали та фізичні закономірності, а також відповідні обчислення дають підставу вважати за доцільне застосовувати їх для розрахунків аналогічних матеріально-енергетичних екологічних ефектів, що зумовлені річним приростом фітомаси лісової та лучної рослинності, а також агрокультур.

Матеріали та методика. Розрахунок балансу фотосинтезу виконано шляхом застосування формули (1). За основу взято офіційні матеріали стосовно продуктивності лісової та лучної рослинності, а також агрокультур в агрокліматичних умовах України (Швиденко, Строчинський, Савич, Кашпор, 1987; Довідник з агрокліматичних ресурсів України, 1993; Публічний звіт ДАЛРУ за 2019 рік). Це стосується і відповідних підсумкових показників власних експериментальних досліджень (Третяк, Черневий, 2011; Tretiak, & Czernewyj, 2013; Савчин, 2013; Черневий, 2014, Tretiak & Chervenyu, 2018). Середній річний приріст стовбурової деревини лісів України прийнято у розмірі $5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, а потенційно можливі – $10 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. Для перерахунку на загальну фітомасу, що, окрім деревини стовбурів, містить обсяг деревини та кори гілок, коренів, застосовано конверсійний коефіцієнт 2 (Василишин, Бокоч, Василишин, Терентьев, 2012). Таким чином, величини середнього річного прирос-

ту фітомаси лісів України (Z) прийнято у розмірі $10 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, а потенційно можливого – $20 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$. У перерахунку на масу сухої речовини ($600 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$), це значення становить, відповідно, 6 і 12 $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Середня продуктивність сінокісних лук орієнтовно становить $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (Кияк, Малиновський, 2001). Продуктивність агрокультур в Україні приймаємо за усередненими даними ФАО (1998-2014 рр.). Зокрема, для пшениці вона складає $2,9 \pm 0,6$, картоплі – $12,7 \pm 3,4$, цукрового буряку – $24,9 \pm 10,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (Crops, 2020). Однак, загальна продуктивність, з урахуванням зеленої маси пшениці, є втричі вищою, ніж маси зерна, тобто орієнтовно складає $10 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (Коваленко, Юркевич, 2009). У картоплі та буряку загальна продуктивність є дуже мінливою і залежить від продуктивності коренеплодів. Для розрахунків приймаємо її на 20% вищою, тобто для картоплі – 15, для цукрового буряку – $30 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$.

Наведені величини застосовано для розрахунків матеріально-енергетичного балансу фотосинтезу за річним приростом фітомаси (Z).

Вміст сухої речовини у рослинній масі приймаємо, орієнтуючись на опубліковані матеріали (Смирнов, Муравін, 1984) за такими відносними величинами (K_d): сіно – 70, зерно пшениці – 88, бульби картоплі – 22, коренеплоди цукрового буряку – 25%. Відносний вміст вуглецю у сухій масі (K_c) для сіна, зерна пшениці та коренеплодів картоплі приймаємо за крохмалем у розмірі 45%, а для цукрового буряку – за сахарозою, тобто 42%. Ці показники застосовуємо для розрахунку депонованого у річному прирості рослинної маси кількості вуглецю.

Розрахунок обсягу випаровування, в т.ч. транспірації, виконано на основі формули (2) з урахуванням річного приросту сухої фітомаси та коефіцієнта транспірації. Для лісів загалом коефіцієнт транспірації умовно застосовано у розмірі 600, для перспективних лісів – 1000, для агрокультур – $500 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Обчислення енергетичних затрат на транспірацію виконано із застосуванням формули (3).

Енергетичні затрати на процес фотосинтезу і транспірації розраховано відповідно до кількості депонованого вуглецю та приросту сухої фітомаси з розрахунку на один гектар упродовж року, тобто в $\text{МВт} \cdot \text{год} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$. Потужність споживання енергії встановлено з розрахунку на один квадратний метр, відповідно у $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$. Це необхідно, щоб порівняти потужність споживання енергії з відповідними одиницями потужності відбитої та поглинутої радіації, що були наведені за літературними даними.

Таким чином, $1 \text{ МВт} \cdot \text{год} \cdot \text{га}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1} = 10^6 \times 10^{-4} = 100 \text{ Вт} \cdot \text{год} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{рік}^{-1}$.

Середньорічну потужність потоку енергії (N_{yr}) визначено шляхом ділення отриманої величини спожитої енергії на тривалість року у годинах, тобто 8760 год., з отриманням результату у $\text{Вт} \cdot \text{м}^2$. Відповідно і потужність потоку енергії за час вегетаційного періоду (N_p) визначено аналогічно – шляхом ділення на його тривалість. Наприклад, для лісу та сінокісних лук тривалість фотосинтезного

періоду становить 2500, для культури пшениці – 1200, для картоплі та цукрового буряка – 1500 год. Таку протяжність зазначеного періоду встановлено залежно від його тривалості у місяцях для кожного типу рослинності з урахуванням середньої тривалості світлового дня кожного місяця, впродовж квітня-жовтня.

Охолоджуючий ефект розраховано для шару приземного повітря 30 м завтовшки на площі 1 м², тобто для об'єму 30 м³. Така товщина шару повітря відповідає висоті високопродуктивного насадження деревостану першого бонітету у віці 100 років. Для порівняння, таку ж товщину шару повітря взято і для лісів загалом, а також для сінокісних лук та агрокультур. Відповідно до викладеного теоретичного матеріалу, для охолодження на 1°C 30 м³ повітря, маса якого становить 38,8 кг, необхідно витратити 11,09 Вт·год енергії. Відповідні розрахунки охоло-

джуючого ефекту, залежно від річного приросту сухої фітомаси (Z_d), депонованого вуглецю (Z_c) та потужності спожитої енергії, наведено у табл. 3.

Результати досліджень. Розрахунок річного матеріально-енергетичного балансу фотосинтезу основних типів рослинності та агрокультур в Україні наведено у табл. 1. Вони підтверджують, що лісова рослинність України загалом відзначається високим рівнем спожитої кількості карбону, води та енергії, а також значним обсягом продукрованої маси гектози і кисню. У випадку перспективних високопродуктивних лісів ці показники можуть бути вдвічі вищими. У двічі-тричі меншою є активність фотосинтезного процесу рослинності сінокісних лук та насаджень картоплі. Лише в агрокультурах пшениці та цукрових буряків показники фотосинтезного балансу виявилися близькими до лісової рослинності загалом.

Таблиця 1

Розрахунок річного матеріально-енергетичного балансу фотосинтезу

Типи рослинності та агрокультури	Приріст фітомаси					Спожито						Продукція	
	Z	k_d	Z_d	k_c	Z_c	CO ₂	H ₂ O	E_{ph}	N_{yr}	T_f	N_f	G _t	O ₂
Ліси, загалом	–	–	6,0	50	3,0	11,0	4,5	33,0	0,38	2500	1,32	7,5	8,0
Ліси, перспективні	–	–	12,0	50	6,0	22,0	9,0	66,0	0,75	2500	2,64	15,0	16,0
Сінокісні луки	3	70	2,1	45	0,9	3,5	1,4	10,4	0,12	2500	0,42	2,4	2,5
Пшениця	10	88	8,8	45	4,0	14,5	5,9	43,6	0,50	1200	3,63	9,9	10,6
Картопля	15	22	3,3	45	1,5	5,4	2,2	16,3	0,19	1500	1,09	3,7	4,0
Буряк цукровий	30	25	7,5	42	3,2	11,6	4,7	34,7	0,40	1500	2,31	7,9	8,4

Примітка. Z – загальна фітомаса, т·га⁻¹·рік⁻¹; k_d – частка сухої речовини, %, Z_d – річний приріст фітомаси, т·га⁻¹·рік⁻¹; k_c – частка вуглецю у фітомасі, %; Z_c – річний приріст депонованого у фітомасі вуглецю, т·га⁻¹·рік⁻¹; CO₂ – кількість діоксиду вуглецю, т·га⁻¹·рік⁻¹; H₂O – кількість води, т·га⁻¹·рік⁻¹; E_{ph} – кількість енергії, МВт·год·га⁻¹·рік⁻¹; N_g – середня потужність споживання енергії упродовж року, Вт·м²; T_f – тривалість періоду фотосинтезу, год; N_f – середня потужність споживання енергії упродовж фотосинтезного періоду, Вт·м²; G_t – кількість маси гектози, т·га⁻¹·рік⁻¹; O₂ – кількість кисню, т·га⁻¹·рік⁻¹

Особливо значними виявилися затрати енергії, які потрібні для забезпечення транспірації (табл. 2). Їх величини виявилися найменшими у випадку сінокісних лук та агрокультури картоплі. Удвічі-тричі вищими вони виявились для лісів загалом, агрокультур пшениці та цукрового буряка. Проте, для перспективних високопродуктивних лісів вони можуть перевищувати більш ніж у три рази ті, які маємо у випадку теперішніх лісів загалом.

У табл. 3 наведено результати розрахунку температурного градієнта охолоджуючого ефекту 30-метрового приземного шару повітря залежно від приросту сухої фітомаси, обсягу депонованого вуглецю та потужності потоку спожитої енергії. Якщо ліси загалом упродовж року здатні депонувати 3 т·га⁻¹ вуглецю, то цей процес вимагає відповідного споживання енергії та забезпечує охолодження 30-метрового приземного шару повітря упродовж року, в середньому на 2,4°C. У перерахунку

на тривалість фотосинтезного періоду (2500 год. упродовж року) це значення становить 8,6°C. Безперечно, що охолодження поширюється і на нічний час, коли відсутнє пряме споживання сонячної енергії. Окрім цього, охолодження до певної міри компенсується обміном теплової енергії з поверхнею ґрунту наземною фітомасою та повітряними масами з поза 30-метрового шару повітря тощо.

Представлені розрахунки свідчать про те, що за наявності перспективних високопродуктивних лісів охолоджуючий ефект може бути у три рази більшим. Відповідно, він у більш ніж три рази менший у випадку сінокісних лук. Значним, але короткотривалим, лише впродовж фітосинтезного періоду, може бути такий охолоджуючий ефект унаслідок вирощування агрокультури, особливо цукрового буряка.

Отримані аналітичні матеріали підтверджують істотний вплив процесів фотосинтезу і супутньої

йому транспірації на газовий склад та енергетичний потенціал приземного шару повітря. Ці процеси матеріально-енергетичного обміну між рослинністю та навколишнім повітрям є чітко аргументованими з біофізичних позицій і можуть бути достатньо коректно представлені кількісно. У цьому відношенні представлена теоретична концепція та виконані розрахунки є переконливішими, ніж існу-

ючі твердження про кореляцію змін клімату з приростом незначного вмісту діоксиду вуглецю у повітрі (Hertzberg & Schreuder, 2016; Nduka, 2016). Водночас величина депонованого вуглецю у рослинній масі чітко залежить від її приросту, а, отже, закономірно співвідноситься з продуктивністю та споживанням енергії процесів фотосинтезу і транспірації.

Таблиця 2

Розрахунок річного обсягу транспірації вологи й енергетичних затрат на неї

Типи рослинності та агрокультури	Z_d	k_t	m_{tr}	E_{tr}	N_{yr}	T_f	N_f
Ліси, загалом	6	600	3600	2293	26	2500	92
Ліси, перспективні	12	1000	12000	7644	87	2500	306
Сінокосні луки	2,1	500	1050	669	8	2500	27
Пшениця	2,6	500	1300	828	9	1200	69
Картопля	2,8	500	1400	892	10	1500	59
Бурак цукровий	6,2	500	3100	1975	23	1500	132

Примітка. Z_d – річний приріст сухої фітомаси, т·га⁻¹·рік⁻¹; k_t – коефіцієнт транспірації, г·г⁻¹, m_{tr} – загальна маса транспірованої вологи, т·га⁻¹; E_{tr} – затрати енергії, МВт·год·га⁻¹·рік⁻¹; N_{yr} – середня потужність спожитої енергії упродовж року, Вт·м²; T_f – тривалість періоду фотосинтезу, год.; N_f – середня потужність спожитої енергії упродовж фотосинтезного періоду, Вт·м²

Таблиця 3

Розрахунок температурного градієнта охолодження 30-метрового приземного шару повітря

Типи рослинності та агрокультури	Z _d	Z _c	Потужність споживання енергії						Температурний градієнт	
			фотосинтезом		транспірацією		разом			
			N _{yr}	N _f	N _{yr}	N _f	N _{yr}	N _f	Δt _{yr}	Δt _f
Ліси, загалом	6	3	0,4	1,3	26	92	26,4	93,3	-2,4	-8,6
Ліси, перспективні	12	6	0,8	2,6	87	306	87,7	308,6	-8,1	-28,6
Сінокісні луки	2,1	0,9	0,1	0,4	8	27	8,1	27,4	-0,7	-2,5
Пшениця	2,6	4	0,5	3,6	9	69	9,5	72,6	-0,9	-6,7
Картопля	2,8	1,5	0,2	1,1	10	59	10,2	60,1	-0,9	-5,7
Бурак цукровий	6,2	3,2	0,4	2,3	23	132	23,4	134,3	-2,2	-12,4

Примітка. Z_d – річний приріст сухої фітомаси, т·га⁻¹·рік⁻¹; Z_c – річний приріст депонованого у фітомасі вуглецю, т·га⁻¹·рік⁻¹; N_{yr} – середня потужність спожитої енергії упродовж року, Вт·м²; N_f – середня потужність спожитої енергії упродовж фотосинтезного періоду, Вт·м²; Δt_{yr} – середній градієнт охолодження повітря упродовж року, °C; Δt_f – середній градієнт охолодження повітря упродовж фотосинтезного періоду, °C

Обмін речовиною та енергією між рослинним покривом та нижнім шаром повітря відіграє важливу екологічну функцію, що, зокрема, полягає у збагаченні приземної атмосфери киснем та водяною парою. Не менш важливим є і споживання рослинністю під час вегетаційного періоду теплової енергії з навколишнього середовища, що призводить до його охолодження. Цей аспект дуже важливий не лише у регіональному вимірі, але й у локальному, оскільки виявляє вплив на оптимізацію життєвого

середовища міст і територій індустриальних комплексів, а також курортних зон.

Середньорічне споживання теплової енергії потужністю від 8 до 26 Вт на 1 м² з 30-метрового шару повітря переконливо свідчить про важливість цього процесу у запобіганні потепління клімату внаслідок парникового ефекту. Адже, у середніх широтах Європи середньорічна поглинута енергія короткохвильового випромінювання становить 60-150 Вт·м⁻² з максимумом у липні – 200-300 Вт·м⁻² (Hatzianastas-

siou et al., 2005). Відповідно з цього погляду, важливими є витрати енергії на фотосинтез й транспірацію і під час фотосинтезного періоду у розмірі 27-135 Вт·м⁻². Це дуже важлива охолоджуюча приземні шари повітря функція, яка для 30-метрового шару повітря впродовж року може забезпечити зниження його температуру на 0,7-2,4°C. Не менш важлива ця екологічна функція і під час фотосинтезного періоду, адже впродовж світлового дня таке охолодження повітря може становити від 2,5 до 12,5°C. Особливо цінна з цього погляду роль лісів, оскільки фотосинтезний період у них майже вдвічі триваліший, ніж в агрокультур. Окрім цього, лісове середовище добре захищає охолоджене повітря від переміщення назовні. У цьому відношенні рослинність сінокісних лук має втричі менші функціональні можливості.

Значну, але короткотривалу охолоджуючу повітря функцію виконують і високопродуктивні агрокультури. Проте, це стосується здебільшого лише фотосинтезного періоду. Окрім того, охолоджені повітряні маси над агрокультурами не захищені від переміщення. Варто однак зазначити, що рівень продукційного процесу агрокультур є штучно стимульований внесенням органічних та мінеральних добрив, чого зазвичай немає у лісових чи лучних сінокісних угіддях.

Заслугує на увагу в екологічному аспекті також продукційна функція фотосинтезу, власне показник обсягу гектози, яка містить депонований вуглець, а також кисню й транспірованої пари, якими збагачуються приземні шари атмосфери. Особливо цінними у цьому аспекті можуть бути високопродуктивні ліси та агрокультури пшениці і цукрового буряка. Адже впродовж року ліси України здатні збагатити приземні шари атмосфери на 8 т·га⁻¹ кисню, а також на 3600 т·га⁻¹ водяної пари. Подібну, але короткотривалу функцію виконують і агрокультури.

Отже, загалом охолодження повітря та збагачення його вологою внаслідок фотосинтезу і транспірації запобігає потеплінню та посушливості клімату. В цьому полягає дуже важлива функція рослинного покриву суші й, зокрема, лісових екосистем. Саме тому знеліснення (дефористація) призводить до небажаних змін клімату.

Отримані результати показують, що кількість депонованого у рослинній масі вуглецю пропорційно корелює з кількістю продуктів фотосинтезу та спожитих енергетичних ресурсів на процеси фотосинтезу і транспірації. Тобто, можна зробити висновок, що сам депонований вуглець не є чинником змін температурного режиму повітря та вмісту у ньому водяної пари. Проте його вміст може бути вагомим індикатором ролі продукційного процесу фотосинтезу та супутньої транспірації у формуванні температурного режиму повітря і його вологості.

Кліматоформуюча роль лісів може бути вагомішою за умови підвищення їх продуктивності до рівня річного приросту стовбурної деревини 10 м³·га⁻¹. У такому випадку їхня охолоджуюча по-

вітря функція могло би бути втричі більшою. Відповідно і збагачення повітря киснем та водяною парою було б пропорційно втричі інтенсивнішим. Такого ефекту не вдасться отримати шляхом вирощування агрокультур, оскільки їхня продуктивність є короткотривалою.

Підвищення продуктивності лісів є цілком реальним в умовах гумідного помірного клімату Європи. Адже середні показники річного приросту запасів деревостанів у таких країнах як Німеччина, Ірландія, Данія сягають 11 м³·га⁻¹, а у Польщі, Австрії, Великобританії, Чехії, Словаччині, Словенії, Швейцарії, Бельгії та Голландії – 7-9 м³·га⁻¹. Середні запаси деревостанів у цих країнах сягають 300-350 м³·га⁻¹ (*Forestry in the EU and the World*, 2011; *Forest Europe*, 2015).

Висновки. Обмін речовиною та енергією між рослинним покривом і нижнім шаром повітря відіграє важливу екологічну функцію, що, зокрема, полягає у збагаченні приземної атмосфери киснем і водяною парою, а також в її значному охолодженні, що відбувається внаслідок потужного споживання енергії процесами фотосинтезу та супутньої транспірації. Інтенсивність цих процесів пропорційно корелює з кількістю депонованого у фітомасі вуглецю. Такі екологічні функції лісів України за показниками інтенсивності фотосинтезу і транспірації втричі перевищують відповідні властивості лучної рослинності.

У випадку вирощування високопродуктивних лісів, річний приріст стовбурового запасу яких сягав би 10 м³·га⁻¹, збагачення приземного шару повітря киснем було б удвічі більшим, ніж за теперішнього приросту 5 м³·га⁻¹, а водяною парою – у три-чотири рази більшим. Відповідно у три-чотири рази більшим було б і споживання теплової енергії з навколишнього середовища.

Подібні екологічні функції виконує також рослинність лук та агрокультур. Однак, це відбувається лише під час відносно короткого фотосинтезного періоду. Водночас їхня продуктивність може бути високою за умови застосування відповідної агротехніки. Однак, вона все ж є співмірною з сучасною продуктивністю лісів України, і водночас – меншою, ніж у випадку високопродуктивних лісів.

У перспективі, з метою запобігання небажаним змінам клімату, радикальним шляхом мало би бути не лише збільшення площі лісів України, але й їхньої продуктивності до рівня кращих показників країн Європейського Союзу. Середній запас стовбурової деревини мав би сягати 300-350 м³·га⁻¹, а річний приріст – близько 10 м³·га⁻¹.

Список літератури

- Василишин, Р. Д., Бокоч, В. В., Василишин, О. М., Терент'єв А. Ю. (2012). Структура фітомаси лісових біоценозів Карпатського національного природного парку. *Науковий вісник НЛТУ України*, 22 (4), 77-85 [Vasylyshyn, R. D., Bokoch, V. V., Vasylyshyn, O. M. & Terent'yev A. Yu. (2012). The structure of

- the biomass forestry of Carpathian National Nature Park. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 22.4, 77-85 (in Ukrainian)]. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2012/22_4/index.htm
- Довідник з агрокліматичних ресурсів України (1993). Агрокліматичні умови росту та розвитку основних сільськогосподарських культур. Серія 2, ч. 2. Київ: МСП [*Handbook of agro-climatic resources of Ukraine*. (1993). Agro-climatic conditions for growth and development of major crops. Series 2. Kyiv: MSP (in Ukrainian)].
- Кияк, В., Малиновський, А. (2001). Сіножаті та пасовища Львівської області. *Праці Наукового товариства ім. Шевченка: Екологічні проблеми природокористування та біорозмаїття Львівщини*, 7, 58-68. [Kujak, V., & Malynowsky, A. (2001). Hayfields and pastures of Lviv region. *Proceedings of the Scientific Society Shevchenko: Ecological problems of nature management and biodiversity of Lviv region*, 7, 58-68 (in Ukrainian)]. Retrieved from <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73449>
- Коваленко, Н.П., Юркевич, Є.О. (2009). Урожайність і продуктивність пшениці озимої та ячменю озимого у різноротаційних сівозмінах південного Степу України. *Бюлетень Інституту зернового господарства ВААН*, 37, 54-59. [Kovalenko, N. P., & Jurkevych, Je. O. (2009). Yield and productivity of winter wheat and winter barley in different rotational crop rotations of the southern steppe of Ukraine. *Bulletin of the Institute of Grain Management of the Ukrainian Academy of Agrarian Sciences*, 37, 54-59 (in Ukrainian)]. Retrieved from <https://www.institut-zerna.com/library/pdf37/13.pdf>
- Публічний звіт ДАЛРПУ за 2019 р. (2019). Київ [*State Agency of Forest Resources of Ukraine Public Report for 2019*. (2019). Kyiv (in Ukrainian)]. Retrieved from: https://mepr.gov.ua/files/images/news_2020/26022020/%d0%9f%d0%a3%d0%91%d0%9b%d0%86%d0%a7%d0%9d%d0%98%d0%99%20%d0%97%d0%92%d0%86%d0%a2%20%d0%94%d0%90%d0%9b%d0%a0%d0%a3%20%d0%97%d0%90%202019%20%d0%a0-%d0%86%d0%9a.pdf
- Савчин, А.І. (2013). Особливості структури старовікового букового деревостану у верхів'ї басейну р. Сукіль (Східні Бескиди). *Науковий вісник НЛТУ України*, 23.9, 389-397 [Savchyn, A.I. (2013). Features of the old-growth beech forest stand structure in the river Sukil upper basin (Eastern Beskids). *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 23.9, 389-397 (in Ukrainian)]. Retrieved from: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_9/389_Saw.pdf
- Смирнов, П.М., Муравин, Е.А. (1984). *Агрохимия*. Москва: Колос [Smirnov, P. M., & Muravin, Je. A. (1984). *Agrochemistry*. Moscow: Kolos (in Russian)]. Retrieved from: <https://www.twirpx.com/file/1350660/>
- Третьак, П.Р., Черневий, Ю.І. (2011). Приріст деревостанів старшого віку: екологічний аспект. *Доповіді НАН України*, 6, 203-208 [Tretyak, P. R., & Chernevyy, Ju. I. (2011). Older stands increase, ecological aspect. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6, 203-208 (in Ukrainian)]. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dnanu_2011_6_35
- Черневий, Ю. (2014). Биометрические особенности старовозрастных древостоев Сколевских Бескид (Украина). *Zarządzanie ochroną przyrody w lasach. Rocznik Wyższej Szkoły Zarządzania Środowiskiem w Tucholi, VIII*, 24-32 [Chernevyy, J. (2014). Biometric features of old-growth stands of Skole Beskids (Ukraine). *Management of Environmental Protection in Forests. Yearbook of the University of Environmental Management in Tuchola. VIII*, 24-32 (in Russian)]. Retrieved from: <https://doi.org/10.5604/20811438.1158026>
- Швиденко, А.З., Строчинский, А.А., Савич, Ю.Н., Кашпор, С.Н. (1987). *Нормативно-справочные материалы для таксации лесов Украины и Молдавии*. Киев: Урожай [Shvidenko, A. Z., Strochinskiy, A. A., Savich, Yu. N., Kashpor, S. N. (1987). *Normative-reference materials for forest inventory of Ukraine and Moldova*. Kiev: Harvest (in Russian)]. Retrieved from: <https://www.twirpx.com/file/813567/>
- Climate Change (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf
- Crops (2020). FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Energy and Climate Change (2015). World Energy Outlook Special Report. Paris: International Energy Agency. Retrieved from <https://www.buildup.eu/en/node/44636>
- Forest Europe (2015). State of Europe's Forests 2015. Retrieved from <http://foresteurope.org/state-europes-forests-2015-report/>
- Forestry in the EU and the World (2011). A Statistical Portrait. Statistical Office of the European Communities. Publications Office of the European Union. Retrieved from <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/5733109/KS-31-11-137-EN.PDF>
- Gilliam, F. (2016). Forest ecosystems of temperate climatic regions: from ancient use to climate change. *The New phytologist*, 212, 871-887. <https://doi.org/10.1111/nph.14255>
- GISS Surface (2016). Temperature Analysis. National Aeronautics and Space Administration and Goddard Institute for space Studies. Retrieved from <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/>
- Hatzianastassiou, N., Matsoukas, C., Fotiadi, A., Pavlakis, K. G., Drakakis, E., Hatzidimitriou, D., &

- Vardavas, I. (2005). Global distribution of Earth's surface shortwave radiation budget. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 2847-2867. Retrieved from <http://www.atmos-chem-phys.net/5/2847/2005/acp-5-2847-2005.pdf>
- Hertzberg, M., & Schreuder, H. (2016). Role of atmospheric carbon dioxide in climate change. *Energy & Environment*, 27 (6-7), 785-797. <https://doi.org/10.1177/0958305X16674637>
- Kahn, B. (2016). *The World Passes 400 PPM Threshold. Permanently*. Retrieved from: <http://www.climatecentral.org/news/world-passes-400-ppm-threshold-permanently-20738>
- Kowalik, P.J., & Scalenghe, R. (2009). Potrzeby wodne roślin energetycznych jako problem oddziaływania na rzecz trwałego i zrównoważonego rozwoju. *III Ogólnopolski Kongres Inżynierii Środowiska, tom 3, 13-17 września 2009*, 61-69. [Kowalik, P.J., & Scalenghe, R. (2009). Water needs of energy crops – one of the environmental problems of Poland. In *National Congress of Environmental Engineering, vol. 3*, 61-69 (in Polish)]. Retrieved from https://www.academia.edu/11133475/POTRZEBY_WODNE_ROLNIKOWSKICH_ENERGETYCZNYCH_JAKO_PROBLEM_ODDZIAŁYWANIA_NA_ZRÓWNOWAŻONY_RÓZWOJ_W_POLSCE_WATER_NEEDS_OF_ENERGY_CROPS_ONE_OF_THE_ENVIRONMENTAL_PROBLEMS_OF_POLAND
- Moutinho, P., & Schwartzman, S. (2005). *Tropical Deforestation and Climate Change*. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia and Environmental Defense. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/253238011>
- Nduka, A. (2016). Climate Change: Is Carbon Dioxide the Culprit?. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6, 483-488. <https://doi.org/10.4236/acs.2016.64038>
- Nisbet, T. (2005). *Water Use by Trees*. Information Note of Forest Research. Forestry Commission. 4. Retrieved from: [http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCIN065.pdf/\\$FILE/FCIN065.pdf](http://www.forestry.gov.uk/pdf/FCIN065.pdf/$FILE/FCIN065.pdf)
- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield. From Measurement to Model*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. Retrieved from <https://www.waldwachstum.wzw.tum.de/fileadmin/publications/ForestDynamicsGrowthAndYieldWeb.pdf>
- Primer on Climate Change Science* (2011). National Association of Clean Air Agencies. Retrieved from http://www.4cleanair.org/Documents/NACAA_ClimateSciencePrimerpost.pdf
- Rákóczi, F., & Iványi, Z. (1999-2000). Water vapor and greenhouse effect. *Geofizika*, 16-17, 65-72. Retrieved from http://geofizika-journal.gfz.hr/Vol_1617/geofizika_1617_19992000_65-72_rakoczi.pdf
- Schlesinger, W.H., & Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 115-117. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011>
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity* (2010). Global Biodiversity Outlook. Executive Summary. Montréal. Retrieved from www.cbd.int/doc/publications/gbo/gbo3-final-en.pdf
- Schmidt, G.A., Ruedy, R.A., Miller, R.L. & Lacis A.A. (2010). Attribution of the present-day total greenhouse effect, *Journal of Geophys. Res.* 115, D20106, <https://doi.org/10.1029/2010JD014287>
- The Money Trees* (2019). The role of corporate action in the fight against deforestation. CDP. Retrieved from https://6fefcbb86e61af1b2fc4-c70d8ead6ced550b4d987d7c03fcdd1d.ssl.cf3.rackcdn.com/cms/reports/documents/000/004/653/original/CDP_Global_Forests_Report_2019.pdf?1563202981
- Tretiak, P., & Černeyj, J. (2013). Przyrost drzewostanów starszego wieku: aspekt ekologiczny. *Roczniki Bieszczadzki*, 21, 184-200 [Tretiak, P., & Černeyj, J. (2013). Increase of old age trees in forest of the Carpathian part of the Dniester river basin. *Roczniki Bieszczadzki*, 21, 184-200 (in Polish)]. Retrieved from: <https://www.bdpn.pl/dokumenty/nauka/2013/rb21/art14.pdf>
- Tretyak, P., & Černeyy, Y. (2018). The grow of trees of the Carpathian Forests (in the basin of the Dniester River). Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic National University. Retrieved from http://vlp.com.ua/files/special/181128_mini.pdf
- Gorte, R. W., & Sheikh, P.A. (2010). *Deforestation and Climate Change*. Congressional Research Service. Retrieved from <https://fas.org/sgp/crs/misc/R41144.pdf>

Matter and energy influence of forest vegetation on the environment

P. Tretyak¹, Ju. Černeyy²

Modern climate change is an important environmental problem of mankind. It is largely due to the powerful anthropogenic impact on the biosphere, in particular, deforestation. However, forests role in forming climate change in regions and the continents is still poorly understood. This primarily concerns the influence of forests on the gas composition of the surface layers of the atmosphere, their temperature, etc.

¹ Platon Tretyak – full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Vice-President of the FAS of Ukraine, Doctor of Biological Sciences, Professor. Communal higher education institution «Prykarpattia Professional College of Forestry and Tourism», Zamkova str., 14, Bolekhiv, Ivano-Frankivsk region, Ukraine. Tel.: +38-067-6626841, E-mail: platon.tretyak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8278-060X>

² Jurij Černeyy – full Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Biological Sciences. Communal higher education institution «Prykarpattia Professional College of Forestry and Tourism», Zamkova str., 14, Bolekhiv, Ivano-Frankivsk region, Ukraine. Tel.: +38-03437-34668, E-mail: plhc@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1180-1677>

The purpose of the study was an attempt to study theoretically the problem of assessing the matter and energy impact of the phytomass growth of Ukrainian forests on the surface atmosphere in comparison with other vegetation types. This applies to the carbon deposition, oxygen production, transpiration and the atmosphere enrichment with moisture, as well as the light and heat energy consumption from the environment.

The theoretical concept is based on the known biochemical and physical laws. This is the substance and energy photosynthesis proportions and its accompanying transpiration, as well as the air cooling effect.

The following axioms were taken as the basis of the study:

- climate formation is largely connected with the energy and matter circulation in the biosphere;
- at the local level near the earth's surface powerful matter and energy circulation is in progress between phytomass and the atmosphere;
- the material and energy flow intensity is proportional to the increase of phytomass;
- the phytomass increase occurs as the photosynthesis result and is accompanied by a powerful transpiration;
- photosynthesis and transpiration require a large amount of energy consumption from the environment, which leads to its cooling.

The calculation of the photosynthesis was performed balance on the basis of official materials as for productivity of forest, meadow vegetation and agriculture in Ukraine. Relevant final indicators of own experimental studies were also applied. The annual dry substance productivity of the total phytomass was taken as a basis.

The substance and energy proportions of the generalized model of photosynthesis reaction are applied. Consumption: carbon dioxide – 3,668 tons, water – 1.5 tons and energy – approximately 11042 kWh. Production: oxygen – 2.67 tons and hexose – 2.5 tons, in which 1 ton of carbon is deposited.

The volume of transpired moisture was calculated according to the phytomass dry substance productivity and the transpiration coefficient. Energy costs for transpiration were calculated according to the evaporation amount taking into account the specific vaporization heat.

The cooling effect is calculated for the air surface layer 30 m height. This corresponds to average stand height at the age of 100. The calculation was performed on the basis of air energy consumption per 1 m², that is from 30 m³ taking into account its specific heat capacity.

The obtained analytical materials clearly testify the photosynthesis processes significant influence and the accompanying transpiration on the gas composition and energy potential of air surface layer.

Generally, Ukraine's forests are able to deposit 3 t·ha⁻¹ of carbon during the year. This leads to the production of 8 t·ha⁻¹ oxygen and air enrichment

with moisture in the amount of 3600 t·ha⁻¹. These processes require appropriate energy consumption, which leads to cooling 30-meter air surface layer by an average of 2.4 °C during the year. Meadow vegetation and agricultural crops also perform such ecological functions. However, this occurs only during a relatively short photosynthetic period.

In terms of photosynthesis and transpiration intensity, forest ecological functions are three times higher than the corresponding properties of meadow vegetation. In the case of highly productive forests growing, the annual growth of which would reach 10 m³·ha⁻¹, the enrichment of the surface atmosphere with oxygen would be twice as much as with the current increase of 5 m³·ha⁻¹, and water vapor – three to four times more. Accordingly, the thermal energy consumption from the environment would be three to four times higher.

Key words: photosynthesis; transpiration; phytomass; growth; forests; agriculture; carbon deposition; oxygen; energy; climate.

Материально-энергетическое воздействие лесной растительности на окружающую среду

П. Р. Третьак¹, Ю. И. Черневый²

Целью исследования была попытка теоретической проработки проблемы оценки материально-энергетического воздействия на приземную атмосферу прироста фитомассы лесов Украины, по сравнению с другими типами растительности, касательно депонирования углерода, продуцирования кислорода, транспирации и обогащения атмосферы влагой, а также потребления световой и тепловой энергии из окружающей среды.

Теоретическая концепция построена на основе известных биохимических и физических закономерностей. Это материально-энергетические пропорции фотосинтеза и сопровождающей его транспирации, а также охлаждающего воздушного эффекта.

¹ Третьак Платон Романович – академик Лесной академии наук Украины, вице-президент ЛАН Украины, доктор биологических наук, профессор. Коммунальное высшее учебное заведение «Прикарпатский профессиональный колледж лесного хозяйства и туризма», ул. Замковая, 14, г. Болехов, Ивано-Франковская обл., Украина. Тел.: +38-067-6626841, E-mail: platon.tretyak@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8278-060X>

² Черневый Юрий Иванович – академик Лесной академии наук Украины, доктор биологических наук. Коммунальное высшее учебное заведение «Прикарпатский профессиональный колледж лесного хозяйства и туризма», ул. Замковая, 14, г. Болехов, Ивано-Франковская обл., Украина. Тел.: +38-03437-34668, E-mail: plhc@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1180-1677>

Вычисления баланса фотосинтеза выполнены на основе официальных материалов, касающихся продуктивности в Украине лесной и луговой растительности, а также агрокультур. Также были использованы имеющиеся итоговые показатели собственных экспериментальных исследований. За основу взято годовую продуктивность сухого вещества общей фитомассы.

Применены материально-энергетические пропорции обобщенной модели реакции фотосинтеза. Объем транспирации влаги вычислено в соответствии с продуктивностью сухого вещества фитомассы с учетом транспирационного коэффициента. Энергетические затраты на транспирацию определены в соответствии с объемом испарения влаги, учитывая удельную теплоту парообразования.

Охлаждающий эффект рассчитан для приземного слоя воздуха высотой 30 м, что соответствует средней высоте древостоя в возрасте 100 лет. Вычисления выполнены на основе мощности потребленной энергии на 1 м^2 , то есть объема 30 м^3 воздуха, учитывая его удельную теплоемкость.

Леса Украины в целом в течение года способны депонировать $3 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ углерода, что сопровождается

продуцированием $8 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ кислорода и обогащения воздуха влагой в объеме $3600 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Эти процессы требуют соответствующего потребления энергии, что приводит к охлаждению в течение года 30-метрового приземного слоя воздуха в среднем на $2,4^\circ\text{C}$.

Такие экологические функции выполняет также растительность лугов и агрокультур. Однако, это происходит только в течение относительно короткого периода фотосинтеза.

По показателям интенсивности фотосинтеза и транспирации, экологические функции леса в три раза превышают соответствующие свойства луговой растительности. В случае выращивания высокопродуктивных лесов, годовой прирост стволового запаса которых достигал бы $10 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, обогащение приземного слоя атмосферы кислородом было бы в два раза больше, чем при нынешнем приросте $5 \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1}$, а водяным паром – в три-четыре раза больше. Соответственно в три-четыре раза большим было бы и потребление тепловой энергии из окружающей среды.

Ключевые слова: фотосинтез; транспирация; фитомасса; прирост; леса; агрокультуры; депонированный углерод; кислород; энергетика; климат.