

2. ЕКОЛОГІЯ ДОВКІЛЛЯ

УДК 630*627.3:535.35 Проф. Л.І. Коній, д-р с.-г. наук; аспір. О.І. Озарків;
доц. І.П. Тереля, канд. с.-г. наук – НЛТУ України, м. Львів

АНАЛІЗ ФОТОМЕТРИЧНИХ ТА СПЕКТРОСКОПІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЖИВИХ ЛИСТКІВ РОСЛИН

Розкрито фізичний зміст параметрів оптичного випромінювання та наведено графічні залежності коефіцієнтів відбивання, пропускання і поглинання випромінювання в ультрафіолетовій та ближній інфрачервоній областях спектра. Проаналізовано результати досліджень багатьох вчених щодо взаємозв'язку сонячного випромінювання (генератора) і листків (об'єкта опромінення) різних видів дерев.

Ключові слова: оптичне випромінювання, коефіцієнти відбивання, пропускання, поглинання, області спектра, листки дерев, показники поглинання, розсіювання, хлорофіл.

Відомо [1-6], що широке використання фізичних методів в біології і велика значимість методів світлорозсіювальних середовищ для дослідження комплексної проблеми фотосинтезу спричинило появу перед оптикою задач фотометричного та спектрометричного напрямків. До цих задач слід віднести такі: 1) дослідження спектральних змін коефіцієнтів відбивання ρ_λ , пропускання τ_λ листків, які відносяться в рівній мірі як до фотометричних задач, так і до спектроскопії живих листків рослин; 2) вивчення індикатрис розсіювання випромінювання листками рослин при інтегральному і монохромному опроміненні (крім того, без цих даних є неможливим вивчення закономірностей перенесення сонячного випромінювання, закономірностей його проникнення і поглинання рослинними ценозами або їх окремими шарами як складними оптичними системами); 3) вивчення механізмів розсіювання пучків випромінювання при їх взаємодії і речовиною живого листка рослини (зміна стану поляризації пучків випромінювання, яке взаємодіє із живим листком, є джерелом корисної інформації про його внутрішню будову); 4) розробку методів визначення показника істинного поглинання m_λ і спектральної залежності цього важливого параметра листка, як цілого; 5) визначення спектральних характеристик окремих клітин фотосинтезуючого листка (поглинальної і відбиваючої здатності). Ці дані можуть бути корисними при дослідженні механізмів, пов'язаних із кінетикою фотосинтезу і міграцією енергії в процесі його протікання. Даних про спектрометричні показники поглинання m_λ і розсіювання σ_λ листка не досить багато. Як відомо [1, 3, 4], при взаємодії сонячного випромінювання із речовиною листка рослин змінюються його спектральні, кутові, поляризаційні, спектроскопічні, просторові характеристики. На величину та характер змін впливає анатомічно-морфологічна будова речовини листка та його поверхні, тобто товщина листка, мікроструктура поверхні, величина і форма клітини та їх розташування, концентрація і розподілення забарвлюючих речовин (пластидних і непластидних пігментів), відсотковим співвідношенням води тощо.

В зв'язку з тим, що дослідження оптичних властивостей рослин представляє інтерес не тільки для екологів, фізиків, але і для біофізиків, то ці фотометричні характеристики відіграють важливу роль для оцінки даних властивос-

тей. Під оптичними властивостями листків розуміють їх поглинальну, пропускну і відбивальну здатності їх при падінні на поверхню листка сонячного випромінювання, тобто спектральні коефіцієнти поглинання α_λ , відбивання ρ_λ і пропускання τ_λ , які виражають (у відносних одиницях) співвідношення поглинутого Q_A , пропущеного Q_D і відбитого Q_R потоків до падаючого потоку $Q_{пад}$

$$\alpha_\lambda = \frac{Q_A}{Q_{пад}}; \tau_\lambda = \frac{Q_D}{Q_{гл}}; \rho_\lambda = \frac{Q_R}{Q_{пад}} \quad (1)$$

Закон збереження енергії запишеться

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1. \quad (2)$$

Ретельна апробація теорії і методу випромінювання на інтегральному фотометрі [1, 3, 4, 6 та ін.] дозволила успішно використати даний метод для визначення спектральних коефіцієнтів ($\alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda$) живих листків рослин і струганого шпону деревини різних порід.

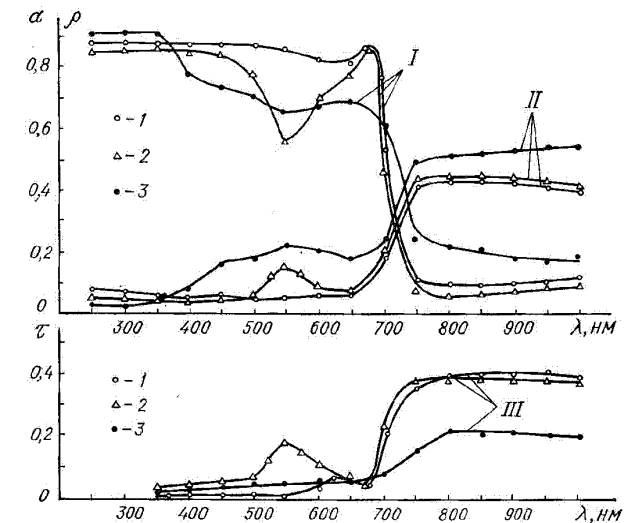


Рис. 1. Оптичні коефіцієнти деяких видів рослин: I – поглинання (α), II – відбивання (ρ), пропускання (τ). 1) *Begonia Rex*; 2) *Begonia Rex*; 3) *Stachys L.*

На рис. 1 наведено зміну $\alpha_\lambda, \rho_\lambda, \tau_\lambda$ в ультрафіолетовій і ближній інфрачервоній областях спектра [1]. В зв'язку з тим, що зміна концентрації хлорофілу незначно впливає на спектр коефіцієнта поглинання листка, що розвивається, то спектральні криві коефіцієнта поглинання α_λ таких листків мають в області спектра $\lambda < 520$ нм подібні форми. Найбільші відмінності спостерігаються в області $\lambda = 500 \dots 590$ нм, де поглинання хлорофілів є мінімальним, а на характер спектра $\alpha_\lambda = f(\lambda)$ істотно впливає концентрація каратиноїдів, протохлорофілів і фікобілінів. В рослинах *Stachys L* (чистець), *Begonia Rex* (бегонія зелена), в яких мала концентрація хлорофілів, спостерігається згладжування мінімуму і довгохвильового максимуму. В діапазоні хвиль $\lambda < 400$ нм, де основну роль відіграє поглинання клітковини, спектральні криві хлорофілів не змінюються.

Присутність в листках флавонів, антоціанів та інших пігментів помітно збільшує поглинання в діапазоні $\lambda = 500 \dots 600$ нм, де розташовані максимуми поглинання цих пігментів. В ультрафіолетовій області (235...400 нм), де сильно поглинає клітковина листків, поглинання практично стабільне і для більшості листків складає 95.97 %. Відбивання є також стабільним і рівне 2.5 %, а пропускання в межах точності вимірювання практично відсутнє в інтервалі довжин хвиль 235...360 нм і починає проявляти себе поблизу $\lambda = 400$ нм. Близня інфрачервона область (760.2500 нм) є фізіологічно малоактивним, бо хлорофіл його не поглинає і фотосинтез не відбувається.

Дослідження асиміляційного апарату плюща та шпилькових порід наведено на рис. 2 [1]. Як видно з наведеного рисунка, сформовані листки вічнозелених рослин (хвойних і листяних), що зимують у відкритому ґрунті, мають для одного і того ж виду однакове поглинання протягом всього року. Аналогічно ведуть себе протягом вегетаційного періоду нормально опадаючі листки рослин в діапазоні хвиль $\lambda = 380 \dots 1150$ нм.

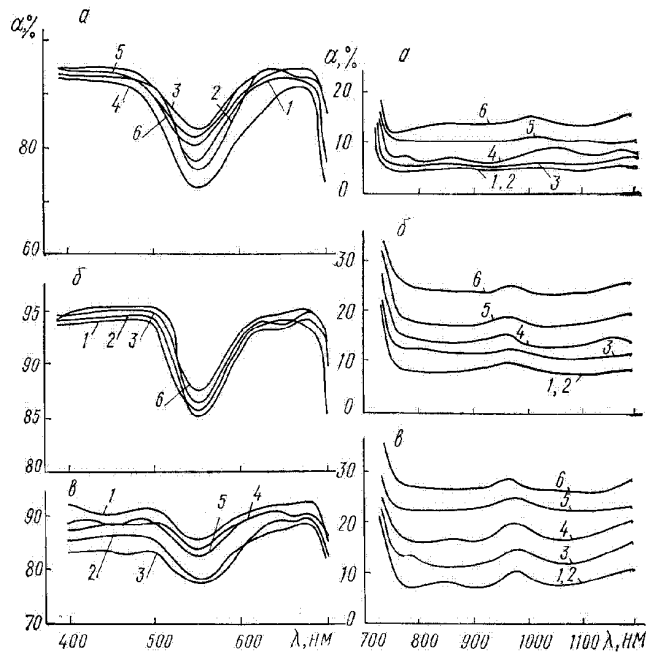


Рис. 2. Поглинання випромінювання листками першого року життя у видимій та ближній ІЧ-областях спектра: а) *Hedera helix*; б) *Taxus baccata*; в) *Picea pungens*; 1-10/V; 2-25...27/VII; 3-15.IV/IX; 4-30/IX; 5-13.IV/X; 6-10 XI

Зовсім по-іншому ведуть себе листки вічнозелених рослин в діапазоні $\lambda = 740 \dots 1150$ нм. Зокрема, листки *Hedera helix* (плющ звичайний) протягом літа мають поглинання 5-6 %, восени при пониженні температури поглинання зростало і досягало максимальних значень у зимові місяці. Весною, із підвищенням температури, поглинання знову зменшувалося, наближаючись до літнього рівня. Ще більш чіткіше проявлялось збільшення поглинання в ближній інфрачер-

воній області спектра у хвойних порід (ялини, тиса) хвоєю першого року життя (в молодій хвої поглинання становило 6...10 %, зимою зростало до 25...35 %). Разом з тим, якщо в листяних рослин весною поглинання зменшувалося, то у хвойних породах воно зберігалось майже на тому ж рівні, що і зимою. Збільшення поглинання в цій області спектра пов'язане із зміною коефіцієнтів відбивання і пропускання.

Зовсім по-іншому ведуть себе вічнозелені рослини в умовах півдня і рослини, що скидають листя, в помірних і північних широтах. Зокрема, поглинання *Euonymus verrucosa* (бруслина бородавчата) в діапазоні спектра $\lambda = 740 \dots 1150$ нм є дуже лабільним (при падінні температури поглинання зростає, а при її підвищенні падає). Останнє вказує на те, що має місце пристосування живого організму до зовнішніх умов, що дає змогу підтримувати тепловий режим (табл. 1).

Табл. 1. Поглинання ближнього інфрачервоного випромінювання листям *Euonymus verrucosa* (бруслина бородавчата), % [1]

Довжина хвилі, нанометр	7.05	1.06	25.06	23.07	18.08	15.09	15.10	21.11	8.12
Листки першого року									
760	9,5	10,5	13,0	13,0	14,0	19,5	16,0	20,0	21,0
800	8,2	9,5	9,0	11,0	12,5	17,5	14,0	18,0	20,0
850	9,0	9,2	9,0	10,0	12,0	16,5	13,0	18,0	19,0
900	9,0	9,5	9,0	9,5	12,0	16,5	13,0	18,0	19,0
950	10,5	10,5	9,0	9,0	13,0	17,0	14,0	18,0	20,0
1000	10,5	11,0	10,0	12,0	12,5	17,5	15,0	18,5	20,0
1050	10,5	11,0	10,0	11,0	12,0	16,0	14,5	17,5	19,0
Листки другого року									
760	23,0	19,0	20,0	18,4	15,5	–	18,5	19,0	23,0
800	22,0	17,0	18,0	15,5	13,5	–	17,0	18,0	22,0
850	21,5	16,5	17,0	15,0	13,5	–	16,0	17,0	21,0
900	21,0	16,5	17,0	14,0	13,5	–	15,5	17,0	21,0
950	21,0	17,0	17,0	14,0	14,0	–	17,0	18,0	21,0
1000	21,0	17,0	17,0	12,0	12,0	–	17,0	18,0	21,0

Т.А. Годнев [2] встановив, що водозабезпечення приводить до зростання коефіцієнта поглинання випромінювання листочками (табл. 2). Це пояснюється тим, що видалення води із листків приводить до зростання оптичної довжини шляху в середині листка за рахунок зростання його розсіювальної здатності через виникнення повітряних порожнин. Адже, розсіювання на межі "повітря-речовина клітини" ($n \approx 1,40$) більше, ніж на межі "речовина клітини – вода" ($n \approx 1,33$).

Дослідження нелінійних ефектів листків, які були не відділені від рослин і попередньо витримані протягом 1,5...2,0 години в темноті, показали, що при переході із темноти до світла спектральні коефіцієнти пропускання τ_λ зростають порівняно з їх значенням в темноті (рис. 3). Після перебування на світлі протягом 40...45 хв збільшення пропускання практично припиняється, тобто спостерігається максимум τ_λ . У свою чергу, відносно зростання коефіцієнта відбивання ρ_λ є менш значним і максимум досягається вже через 25...30 хв (рис. 4). Це значить, що спектр поглинання α_λ листків *Begonia Rex* (бегонія зелена) на світлі відрізняється від такого в темноті. Коефіцієнти ρ_λ і τ_λ повертаються до вихідних значень, тобто "темновим" значенням через 70...80 хвилин після повер-

нення листків у темноту (рис. 3, б). Найбільші зміни коефіцієнтів ρ_λ і τ_λ припадають на ті області спектра, в якому $\tau_\lambda \leq 1...3\%$ і $\rho_\lambda \leq 8...10\%$. В свою чергу, значення $\Delta\tau_\lambda/\tau_\lambda$ і $\Delta\rho_\lambda/\rho_\lambda$ змінюються по-різному і практично рівні нулю, якщо рослина не фотосинтезує. Відношення τ_{max}/τ_0 (рис. 5) набуває максимального значення в тих областях спектра, тобто $\lambda = 430...480$ і 680 нм, де суміш пігментів в живому листку максимально поглинає випромінювання. Це значить, що між коефіцієнтом поглинання листка і зміною стону пігментів при переході від темноти до опромінення є зв'язок. В табл. 3 наведено "тіньові" значення коефіцієнтів пропускання.

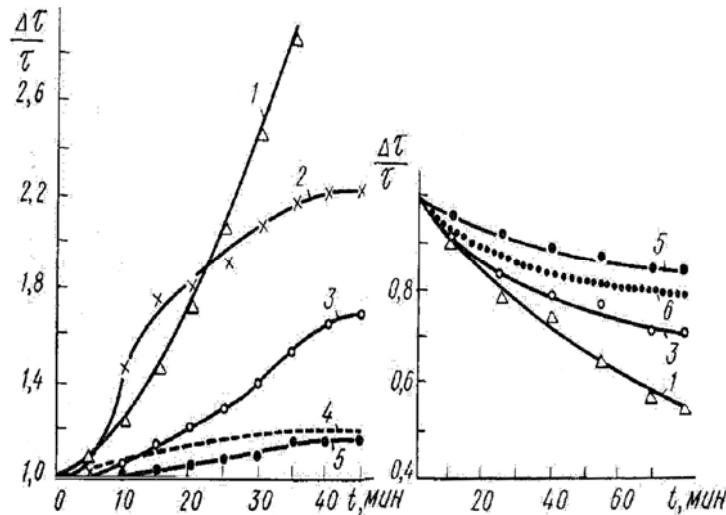


Рис. 3. Відносні зміни коефіцієнтів пропускання листків *Begonia Rex* при переході із темноти до світла (а) і від світла в темноту (б): 1) $\lambda = 484$ нм; 2) $\lambda = 680$ нм; 3) $\lambda = 506$ нм; 4) $\lambda = 700$ нм; 5) $\lambda = 550$ нм; 6) $\lambda = 610$ нм

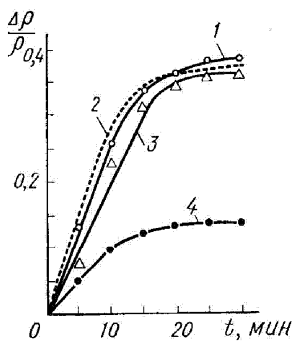


Рис. 4. Відносні зміни коефіцієнтів відбивання в листків *Begonia Rex* при переході із темноти до світла: 1) $\lambda = 506$ нм; 2) $\lambda = 610$ нм; 3) $\lambda = 484$ нм; 4) $\lambda = 550$ нм.

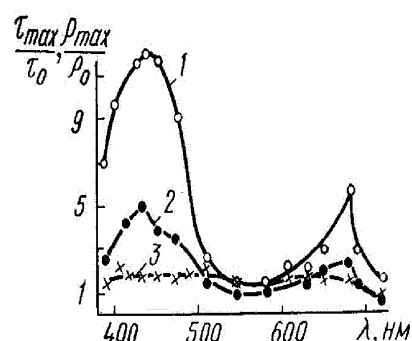


Рис. 5. Спектральні залежності τ_{max}/τ_0 і ρ_{max}/ρ_0 для листків *Begonia Rex* (1), *Calla aethiopica* (2) і *Begonia Rex* (3).

Табл. 2. Вміст хлорофілів і води в листочках деяких вічнозелених рослин [1]

Рослина	Вік листків	Хлорофіл а		Хлорофіл б		Вода, %
		(мг/см ²)×10 ⁻³	мг на 1 грам сухої ваги	(мг/см ²)×10 ⁻³	мг на 1 грам сухої ваги	
<i>Hedera helix</i> (плющ звичайний)	1-й рік	29*/34	5,87/4,32	12,8/13,4	2,58/1,66	60,3/57,4
	2-й рік	53/45,8	5,50/4,21	19,3/18,5	2,00/1,70	62,3/59,5
<i>Picea pungens</i> (ялина колюча)	1-й рік	–	2,05/2,25	–	0,64/0,76	67,7/66,8
<i>Euonymus verrucosa</i> (бруслина бородавчата)	2-1 рік	25,3/21,3	2,37/1,44	7,2/7,2	0,68/0,48	65,6/57,0

* Примітка: В чисельнику дано вимірювання, що проведені 10 листопада, в знаменнику – 9 грудня.

Табл. 3. Відносні зміни коефіцієнтів пропускання τ_λ у зрізаних листках *Begonia Rex* (безонія зелена) при переході із темноти на світло [1]

Час перебування листка (хв) на світлі	$\lambda=680$	$\lambda=700$	Час перебування листка (в темноті, коли листок перенесений зі світла), хв	$\lambda=680$	$\lambda=700$
	нм	нм		нм	нм
0	100	100	51+5	294	136
5	100	100	51+15	248	130
10	111	102	51+20	214	122
15	150	105	51+27	160	108
22	182	113	51+34	123	97
29	234	123	51+45	102	96
36	266	130	51+60	100	96
44	292	136	51+70	100	96
51	294	136			

Після опромінення листка його пропускання помітно зростає, що пов'язано із явищем фотосинтезу. Як видно з рис. 6, вплив явища фотосинтезу на величину коефіцієнта відбивання ρ_λ помітно зростає. В той час вплив явища фотосинтезу на величину коефіцієнта відбивання листка набагато менший, що пояснюється ослабленням селективності випромінювання. Останнє можна пояснити різним впливом фотосинтезу на зовнішню і внутрішню компоненти відбитого потоку.

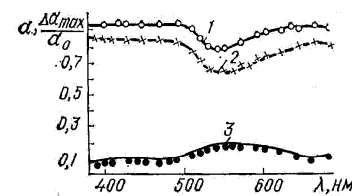


Рис. 6. Спектр поглинання листків *Begonia Rex*: 1) в темноті; 2) після опромінення; 3) залежність $\Delta\alpha_{max}/\alpha_0$

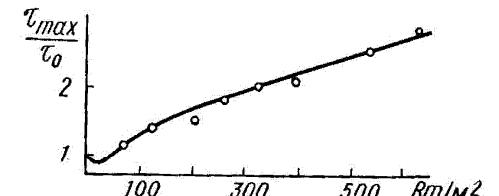


Рис. 7. Залежність максимальних змін коефіцієнтів пропускання листка *Calla aethiopica* від величини опромінення при $\lambda = 480$ нм.

Максимальні зміни коефіцієнтів відбивання $\Delta\rho_\lambda$ та пропускання $\Delta\tau_\lambda$ визначаються:

$$\Delta\rho_{\lambda, max} = \rho_{\lambda, max} - \rho_0; \Delta\tau_{max, \lambda} = \tau_{\lambda, max} - \tau_0. \quad (3)$$

Тоді відносна зміна коефіцієнта поглинання $\Delta\alpha_{\lambda, max}$ визначиться

$$\frac{\Delta\alpha_{\lambda,\max}}{\alpha_0} = \frac{\Delta\rho_{\lambda,\max} + \Delta\tau_{\lambda,\max}}{\alpha_0} \quad (4)$$

На рис. 6 показано залежність співвідношення $\Delta\alpha_{\lambda,\max}/\alpha_0$ для листків *Begonia Rex* (бегонія зелена), з якої видно, що найбільш значне співвідношення припадає на область $\lambda = 520 \dots 580$ нм і 700 нм, де відносні зміни коефіцієнтів ρ_{λ} і τ_{λ} є мінімальними. Залежність максимальних змін коефіцієнта пропускання $\Delta\tau_{\max, \lambda}$ від величини опроміненості направленим пучком має нелінійний характер і при опроміненні потоком променів густиною 360...400 Вт/м² прямує до максимуму (рис. 7).

Аналіз наведених вище залежностей показує, що в листі багатьох рослин мають місце нелінійні оптичні ефекти, тобто оптичні коефіцієнти α_{λ} , ρ_{λ} , τ_{λ} живого листка залежать від інтенсивності та спектрального складу падаючого на нього випромінювання. Гуминецьким С.Г. [4] було запропоновано методи визначення показників поглинання m_{λ} і розсіювання σ_{λ} випромінювання світлорозсіювальним матеріалом при направленому та дифузійному опроміненні. Це дозволило встановити, що показник поглинання випромінювання листком рівний, наприклад, для $\lambda = 730$ нм $m_{\lambda} = 4,7$ см⁻¹, $\sigma_{\lambda} = 28,6$ см⁻¹, а для $\lambda = 850$ нм – $m_{\lambda} = 2,4$ см⁻¹, $\sigma_{\lambda} = 49$ см⁻¹.

Література

1. Рвачев В.П. Методы оптики светорассеивающих сред в физике и биологии / В.П. Рвачев. – Минск : Изд-во БГУ, 1978. – 240 с.
2. Рвачев В.П. Введение в биофизическую фотометрию / В.П. Рвачев. – Львов : Изд-во ЛГУ им. И. Франко, 1966. – 310 с.
3. Сахновский М.Ю. Исследование оптических свойств светорассеивающих сред с малым удельным поглощением : автореф. дисс. на соискание учен. степени канд. физ.-мат. наук / М.Ю. Сахновский. – Л. : Изд-во ГОИ, 1965. – 18 с.
4. Гуминецкий С.Г. Исследование рассеяния и поглощения оптического излучения листьями растений : дисс. ... канд. физ.-мат. наук / С.Г. Гуминецкий. – 1966. – 156 с.
5. Застосування сонячної енергії у житловому господарстві та деревообробці : наук. вид. / І.М. Озарків та ін. – Львів : НВФ "Українські технології", 2012. – 338 с.
6. Озарків І.М. Спектрофотометрическое и поляризационные характеристики древесины : дисс. ... канд. техн. наук / І.М. Озарків. – Львов : Изд-во ЛЛТИ, 1989. – 256 с.

Копий Л.І., Озарків О.І., Тереля І.П. Анализ фотометрических и спектрометрических исследований живых листьев растений

Раскрыт физический смысл параметров оптического излучения и приведены графические зависимости коэффициентов отражения, пропускания и поглощения в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра. Проанализированы результаты исследований многих ученых о взаимосвязи солнечного излучения (генератора) и листьев (объекта облучения) деревьев разных пород.

Ключевые слова: оптическое излучение, коэффициенты отражения, пропускания, поглощения, области спектра, листьев деревьев, показатели поглощения, рассеивания, хлорофилл.

Kopiy L.I., Ozarkiv O.I., Terelya I.P. Analysis of photometric and spectrometric studies of living plant leaves

This paper examines the physical meaning of parameters of optical radiation and image are depending reflection coefficient, transmission and absorption of radiation in the ultraviolet and near-infrared spectrum. Results of research of many scientists about the relationship of solar radiation (generator) and leaves (irradiation facility) trees of different species.

Keywords: optical radiation, reflection coefficients, transmission, absorption spectrum, leaves trees, parameters of absorption, scattering, chlorophyll.

УДК 330.342:303.725.2

Доц. Я.В. Кульчицький¹, канд. екон. наук;

проф. Б.В. Кульчицький², д-р екон. наук; студ. О.О. Апостолук¹

ЕКОЛОГІЧНА СПРЯМОВАНІСТЬ СУЧАСНИХ ЕКОНОМІЧНИХ СИСТЕМ У КОНТЕКСТІ ЇХ ПОРІВНЯЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Досліджено теоретико-методологічні проблеми з екологізації сучасних економічних систем із позицій постіндустріальної парадигми та економічної компаративістики в умовах посилення глобалізації. Розглянуто зміст екологічної парадигми економічної теорії та обґрунтовано необхідність виокремлення соціально-екологічних відносин у системі економічних відносин суспільства. Проаналізовано концепцію стійкого розвитку та особливості еколого-економічних інструментів у розвинених країнах.

Ключові слова: економічні системи, постіндустріальна парадигма, екологічна парадигма економічної теорії, постіндустріальне (інформаційне) суспільство, глобалізація, економічна компаративістика, стійкий розвиток.

Вступ. Дослідження теоретико-методологічних засад порівняння сучасних економічних систем об'єктивно передбачає виявлення пріоритетних домінант їх трансформації, якими у ХХІ ст. є, на наш погляд, екологізація та глобалізація. Саме ці процеси здійснюють нині вирішальний вплив на функціонування і трансформацію існуючих чи становлення нових економічних систем. Будучи тісно взаємопов'язаними між собою, вони зумовлюють ключові параметри економічних систем, їх елементну структуру, визначають найважливіші функції. І хоча актуальність проблеми з екологізації економіки не підлягає сумніву, проте більшість існуючих наукових досліджень мають або виключно економічний, прагматичний ухил, або природоохоронну спрямованість у чистому вигляді. Звідси випливає необхідність комплексного підходу до цієї складної й важливої теоретичної і практичної проблеми на основі діалогу економічної та інших наук.

Метою роботи є розроблення теоретико-методологічних засад дослідження екологічної спрямованості сучасних економічних систем у контексті економічної компаративістики, що має важливе значення для методології економічної теорії, а також практики державного регулювання взаємодії економічної та екологічної систем і забезпечення сталого розвитку економічних систем в умовах посилення глобалізації. Методами нашого дослідження є насамперед діалектичний, аналіз і синтез, системний, синергетичний, порівняльного аналізу та ін.

Ступінь розроблення проблеми та огляд літератури. На наш погляд, екологічна спрямованість сучасних економічних систем є характерною ознакою формування інформаційного постіндустріального суспільства. Відповідно порівняльний аналіз сучасних економічних систем крізь призму посилення їх екологізації, з урахуванням епохального переходу від людини економічної (homo economicus) до людини творчої (homo creator) [15, с. 258-286; 16, с. 109-119], неодмінно повинно спиратися на постіндустріальну парадигму. Саме постіндустріальна парадигма є, на наше переконання, тим ключем, який дає змогу розкрити зміст сучасних економічних систем, здійснити їх порівняльний аналіз та виявити стратегічний вектор системної трансформації в умовах посилення екологізації та глобалізації.

¹ НЛТУ України, м. Львів;

² Львівський НУ ім. Івана Франка