

**ФОТОГРАФІЧНА ІНДИКАЦІЯ ХЛОРОФІЛУ В ЛИСТКАХ
PHRAGMITES AUSTRALIS (CAV.) TRIN. EX STEUD В УМОВАХ
ХРОНІЧНОГО РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ**

Д. Ганжа¹, О. Назаров²

¹Івано-Франківське відділення Українського географічного товариства
вул. Галицька, 201, Івано-Франківськ 76018, Україна
e-mail: gandyber@gmail.com

²Державне спеціалізоване підприємство “Чорнобильський спецкомбінат”
вул. Шкільна, 6, Чорнобиль 07270, Україна
e-mail: nazarov42t@rambler.ru

Досліджено вміст хлорофілу та радіонуклідів у листках очерету звичайного. Проби листків зібрані у Чорнобильській зоні відчуження. Крім чинних методів оцінки вмісту хлорофілу в рослинах, запропоновано метод його фотографічної індикації. Метод ґрунтується на скануванні й аналізі цифрових зображень, відбитих листками червоного, зеленого та синього кольорів. Дослідженнями встановлено, що порушення обміну хлорофілу в листках очерету є ефектом дози опромінення від інкорпорованих ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs. При цьому ⁹⁰Sr – інгібує, а ¹³⁷Cs, у межах досліджених доз, – передчасно стимулює синтез хлорофілу на початку вегетації, чим порушує розвиток рослин.

Ключові слова: біологічна індикація, моніторинг довкілля, очерет звичайний, радіоекологія, фізіологія рослин, хлорофіл.

Одним із основних фізіолого-біохімічних показників реакції зелених рослин на якість довкілля є оцінка їхньої фотосинтетичної активності, зокрема, за вмістом хлорофілу. Хронічне радіаційне опромінення впливає на вміст пігментів у листках рослин у широких межах – від стимуляції до пригнічення [1, 3]. Масове застосування вимірювань хлорофілу при радіоекологічній зйомці гальмують складність лабораторного аналізу й потреба спеціалізованої лабораторії, а при польовій флуориметрії – мала розповсюдженість і значна вартість обладнання. Разом із тим, при проведенні екологічної зйомки в умовах техногенезу, здебільшого, вистачає опосередкованої оцінки фотосинтетичної активності рослин. Для вирішення цього завдання застосовують дистанційні методи оцінки хлорофілу за спектром відбитого рослинністю випромінювання [5] або візуальну експертну оцінку дехромації крон дерев [6]. На жаль, методи, що ґрунтуються на космічних спостереженнях, є малодоступними широкому загалу дослідників. Спосіб оцінки дехромації, у свою чергу, ґрунтується на суб’єктивному сприйнятті спостерігача, може застосовуватися протягом короткого часу наприкінці вегетаційного сезону і непридатний для діагностики трав’янистої рослинності.

Метою даного дослідження є розробка фотографічного методу індикації хлорофілу й оцінка сезонної динаміки його вмісту в листках очерету в умовах хронічного радіаційного опромінення.

Матеріал і методика

Спостереження проведені з травня по серпень 2011–2013 рр. (завжди у другій половині місяця). На пікетах (місцях спостережень) відібрано листки очерету звичайного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud). Проби відбирали у водних екосистемах Чор-

нобильської зони відчуження: оз. Азбучин, водойма-охолодник Чорнобильської АЕС (ВО ЧАЕС), оз. Глибоке, оз. Далеке, Янівський затон р. Прип'ять, р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль (ЧС р. Прип'ять). Проби з останнього приймали за контрольні. На кожному пікеті відібрано не менше 50–60 непошкоджених листки з 15–20 пагонів очерету на середині зросту. Для спеціальних досліджень – з верхньої та нижньої частини рослин. Проби доставляли та зберігали в лабораторії у темряві при температурі 2–5°C.

Хлорофіл (сумарний – а, б) виділяли екстракцією етиловим спиртом, вимірювання проводили на спектрофотометрі СФ-46 (ЛОМО), як аналітичний стандарт застосовано розчин Гьотрі [7]. Вміст хлорофілу в листках обчислювали у мг/г повітряно-сухої речовини.

Кольорові зображення листків очерету отримано на оптичному сканері з абаксального боку, безпосередньо та через червоний скляний світлофільтр із максимумом поглинання в ділянці 560 нм. При кожній закладці листків очерету разом із ними сканували еталон зеленого кольору, виготовлений із порошку оксиду хрому (Cr_2O_3), насипаного у пласку, завтовшки 3 мм ємність і щільно притисненого до оптичного вікна, виготовленого із лавсанової плівки. Зображення, збережені без компресії у форматі RGB, проаналізовано із застосуванням програмного продукту ImageJ, версії 1.45s щодо інтенсивності кольорів – червоного, зеленого, синього та відтінків сірого за шкалою від 0 до 255 (256 рівнів). Зображення, скановані через світлофільтр, аналізували тільки у відтінках сірого.

Індикаційну оцінку вмісту хлорофілу в листках очерету нами запропоновано проводити за фотографічним індикаційним показником (ФІП) відносної інтенсивності відповідного кольору (P_c):

$$P_c = c_{np} \cdot c_{cm}^{-1}, \quad (1)$$

де: c_{cm} – виміряна інтенсивність відповідного кольору на знімку стандарту; c_{np} – на знімку листка очерету. При аналізі знімків, зроблених без світлофільтра, c_{np} позначається для відповідних кольорів, як: r – червоний, g – зелений, b – синій, h – відтінки сірого. Для знімків – через світлофільтр: f – відтінки сірого. Значення P_c завжди представлене як середнє вибіркоче обчислень результатів вимірювань листків очерету однієї проби.

Питому активність ^{90}Sr (радіохімічний аналіз) та ^{137}Cs (гамма-спектрометрія з аналізатором Nokia LP 4900 В та германієвим детектором) вимірювали у листках очерету, висушених до повітряно-сухого стану. За результатами вимірювань обчислено потужність дози внутрішнього опромінення листків очерету інкорпорованими ^{137}Cs та ^{90}Sr [8].

Відносну різницю значень досліджуваних параметрів ($K_{прв}$) обчислено за формулою:

$$K_{прв} = (x_1 - x_2) / x_1, \quad (2)$$

де: x_1 – контрольне значення; x_2 – значення, що порівнюється.

Вибіркове середнє (\bar{x}), стандартне відхилення (σ) та коефіцієнт детермінації (R^2) обчислювали за відповідними функціями Microsoft Excel. Коефіцієнт варіації (V) обчислювали як відношення стандартного відхилення до вибіркового середнього.

Лабораторний аналіз хлорофілу зроблено зі сумарною статистичною невизначеністю, що не перевищувала $\pm 15\%$, при вимірюванні радіонуклідів – $\pm 20\%$. Усі статистичні показники обчислено для рівня довіри 0,95.

Обчислення наявності парних кореляцій між двома вибірками даних (R_{mc}) і достовірності відмінності їх дисперсій (D_{mc}) проводили з використанням так званого методу перестановок (permutation test), заснованого на методі Монте-Карло [9]: шляхом перебору комбінацій значень результатів вимірювань з подальшим статистичним аналізом одержаних результатів, які надаються у вигляді гістограм. При цьому R_{mc} та D_{mc} обчислюють як відношення числа значень гістограми зліва від нуля до загального числа значень, на яких побудовано гістограму, тому розмір результату перебуває між -1 та 1. При цьому “нульове”

значення – /0,5/. Для обчислень результатів вимірювань розроблено відповідний програмний продукт за допомогою мови програмування IDL (Interaction Data Language).

Результати і їхнє обговорення

Для обґрунтування запропонованого нами методу важливо, що розмір значень інтенсивності кольорів на сканованих зображеннях листків очерету – зіставний з еталонним зразком Cr_2O_3 (рис. 1, а). Коефіцієнт варіації інтенсивності кольорів у наведеному прикладі, при 15-кратному скануванні еталонного зразка становив для червоного, зеленого, синього та відтінків сірого – 0,17, 0,02, 0,01 та 0,01%, відповідно. В цілому, при проведенні наших досліджень, перевищував 0,3%. Коефіцієнт варіації при вимірюванні інтенсивності кольорів листків коливався від 1 до 8%. У застосованому нами способі індикації хлорофілу в листках рослин на якість вимірювань впливають дві складові, невизначеності – при скануванні та важенні проб. Порівняння коефіцієнтів варіації при вимірюванні (0,3%) із тими, що утворюються внаслідок особинної варіабельності кольорів листків (8%), показує, що невизначеність при вимірюванні – настільки мала, що нею можна знехтувати, і на отриманий результат не впливає.

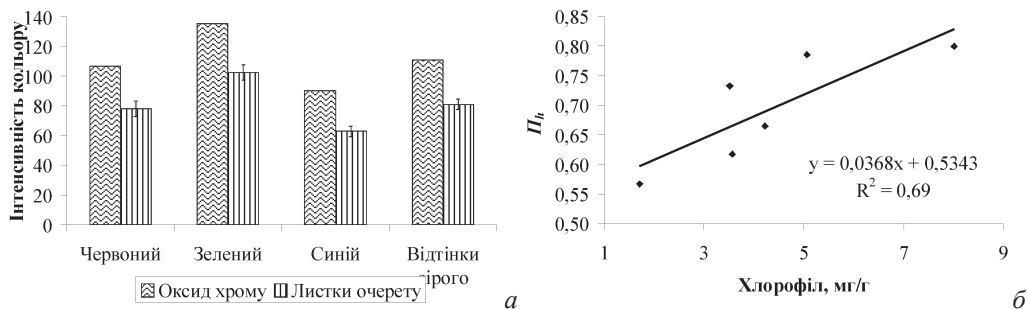


Рис. 1. Параметри фотографічної індикації та їх зв'язок із вмістом хлорофілу в листках очерету, травень 2012 р.: а – інтенсивність кольорів у еталонному зразку та листках з ЧС р. Прип'ять; б – зв'язок вмісту хлорофілу та показника інтенсивності сірого кольору (I_h).

Середній вміст хлорофілу в листках очерету за результатами спектрофотометричного вимірювання – 4,3 мг/г, при $V=48\%$. Кореляційний аналіз показав середньої сили лінійні зв'язки між вмістом хлорофілу в листках і значенням ФІП (рис. 1, табл. 1).

Таблиця 1

Результати аналізу зв'язку між вмістом хлорофілу в листках очерету і значеннями ФІП

Параметр	I_r	I_g	I_b	I_h
R^2	0,62	0,58	0,68	0,69

Значення ФІП червоного та синього кольорів (I_r , I_b) тісніше пов'язані з вмістом хлорофілу, порівняно із зеленим (I_g). На кольорову гаму зображень листків очерету, крім відбитого хлорофілом світла у зеленій ділянці, впливає його флуоресценція в червоній і синій ділянках спектра [4, 5]. На невизначеність зеленого кольору при індикації хлорофілу можуть частково впливати каротиноїди, тому що у спектральному форматі трьох кольорів змішування жовтого зі синім може розпізнаватись як зелений колір. Найтісніше пов'язаний із вмістом хлорофілу результат – у відтінках сірого (I_h), оскільки при аналізі в цьому форматі усереднюються похибки впливу інших, крім хлорофілу, пігментів на інтенсивність кольорів. Таким чином, запропонований нами метод із відповідністю між 60 і 70% дає змогу проводити індикацію вмісту хлорофілу в листках очерету (табл. 1).

Для оцінки вікових змін кольорової гами листків наприкінці травня 2012–13 рр. на чотирьох пікетах відібрано 6 проб повністю розвинених молодих листків із верхівок і старих – із нижніх ділянок пагонів очерету. За результатами вимірювань обчислено (форм. 2) відносну різницю ФІП молодих листків (контрольне значення) щодо старих (рис. 2).

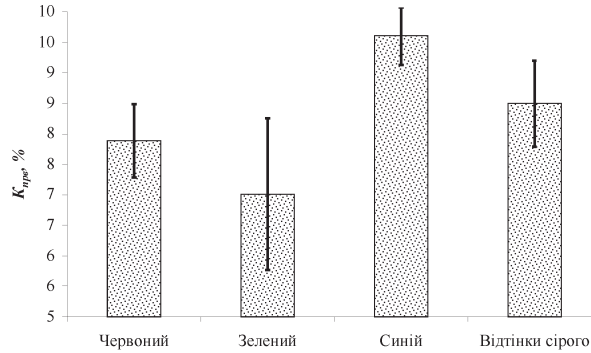


Рис. 2. Перевищення інтенсивності кольору молодих листків очерету щодо старого. У-погрішності надано у значенні коефіцієнта варіації.

Перевищення інтенсивності кольорів (K_{np}) молодих листків відповідають значенням кореляційного зв'язку ФІП із вмістом хлорофілу (табл. 1) і розташовуються у ряді: синій>червоний>зелений, де найтісніший зв'язок відповідає найменшій дисперсії. Крім того, значення K_{np} молодих листків може сягати 10%, що удвічі перевищує середнє значення особинної варіабельності кольорів, згаданої вище. Такі обставини змушують при проведенні фотографічної індикації дотримуватися принципу відбору листків, подібних за віком. Це дає змогу мінімізувати невизначеність, залежну від співвідношення пігментів у листках різного віку. Проте звести індикацію до аналізу одного кольору – неможливо, оскільки у різні місяці вегетаційного періоду на гаму кольорів зображення листкової пластинки впливає, як відомо [5], не тільки хлорофіл, а й інші пігменти (табл. 2).

Таблиця 2

Кореляційна матриця зв'язку (R) між значеннями показників інтенсивності кольорів сканованих листків очерету (за даними 2012–2013 рр.).

Параметр	Травень				Червень				Липень				Серпень			
	P_r	P_g	P_b	P_h	P_r	P_g	P_b	P_h	P_r	P_g	P_b	P_h	P_r	P_g	P_b	P_h
P_g	0,84				1				0,90				0,74			
P_b	0,94	0,70			0,97	0,94			0,58	0,32			0	0		
P_h	0,99	0,84	0,97		1	1	0,97		0,98	0,91	0,66		0,84	0,52	0,59	
P_r	0,95	0,93	0,97	0,95	–	–	–		0,91	0,95	0,41	0,92	0,79	0,82	0	0,45

Сканування листків очерету крізь червоний світлофільтр призводить до: 1) ослаблення потоку світла від сканера та робить його монохромним, що зменшує збудження флуоресценції хлорофілу та пов'язане з ним червоне й синє випромінювання і запобігає заміні названими кольорами частки відбитого зеленого; 2) вибіркового поглинання світлофільтром зеленої частини спектра, що викликає збільшення інтенсивності його забарвлення, при тому, що до інших кольорів він є прозорим. Таким чином, мірою вмісту хлорофілу в листках очерету в даному випадку слугує інтенсивність світла, обчислена у форматі відтінків сірого, оскільки проводиться аналіз монохромного зображення. Вплив інших пігментів на результати вимірювань є мінімальним.

Кореляційний аналіз значень ФП показав сезонні зміни зв'язку між показниками кольорів (табл. 2). У травні значення P_f тісно пов'язане з усіма іншими параметрами, із переважанням синього та червоного. Найтісніший зв'язок між параметрами ФП, крім P_b , – у червні, що збігається із максимальною інтенсивністю росту очерету [2]. Зменшення сили зв'язку P_b з іншими параметрами ФП – у червні (до середньої сили) та у липні (до слабкого), у серпні зв'язок вже не проявляється. Сезонні зміни зв'язку синього кольору можна пояснити впливом, перш за все, флавоноїдів, що відбивають світло у синій і фіолетовій ділянках спектра. Максимум їх у листі припадає на період цвітіння або плодоносіння [1]. У нашому випадку максимальну концентрацію флавоноїдів треба очікувати у другій половині серпня, що відповідає початку цвітіння очерету [2], і підтверджується втратою кореляції значення P_b з іншими параметрами ФП. Тіснота зв'язку параметрів P_f та P_r слабшає до кінця вегетаційного періоду, внаслідок сезонного впливу червоних пігментів антоціанів, максимум продукції яких у листі припадає на липень [1, 5]. Зв'язок параметра P_f із показником зеленого кольору (P_g) – тісний протягом усього вегетаційного періоду, але переважає у липні та серпні, коли червоний і синій кольори у спектрі листків переважно пов'язані з дією інших, крім хлорофілу, пігментів.

Аналіз сезонного ходу параметрів фотографічної індикації листків очерету на контрольному пікеті показав, що вміст хлорофілу в листках мінімальний у травні, максимально зростає у червні та зменшується на 25–30% у другій половині липня (рис. 3, а), що збігається з динамікою розвитку очерету протягом вегетаційного періоду [2]. Спостерігається також другий – незначний пік концентрації хлорофілу в серпні (до 5% щодо липневого вмісту).

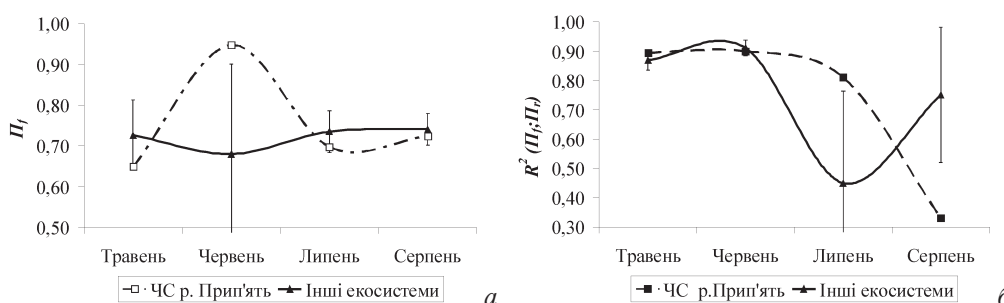


Рис. 3. Сезонні зміни параметрів фотографічної індикації на контрольному й інших місцях спостережень, що перебувають в умовах аномальних доз радіаційного опромінення: а – зміни параметра, P_f ; б – сезонні зміни зв'язку P_f та P_r . Y-похибки надано у значенні %, %.

Максимального значення, як вже було відмічено, кореляційний зв'язок між показниками зеленого й червоного кольорів досягає у червні та лишається тісним до кінця липня, потім різко зменшується у серпні. Важливо відмітити, що тісна кореляція між коефіцієнтами відбивання зеленої (550 нм) та червоної (700 нм) частин спектра є властивою зеленим рослинам незалежно від їх виду та концентрації хлорофілу. Відхилення від вказаної залежності розцінюється як критерій появи інших пігментів [5]. Порівняння сезонного ходу параметрів фотографічної індикації хлорофілу на рис. 3, б показує суттєві відмінності між листками рослин в умовах контролю та підвищеної дози хронічного опромінення.

Таким чином, кольорова гама відбитого листками очерету світла перебуває у залежності від сезонного накопичення пігментів і в межах описуваного методу дає змогу провести кількісну індикацію вмісту хлорофілу в листі. На початку вегетаційного періоду

синій колір у спектрі знімків листків утворюється за рахунок флуоресценції хлорофілу, а по мірі зменшення відносного вмісту зеленого пігменту по ходу вегетаційного періоду – за рахунок флавоноїдів. У травні та серпні в оцінку відбивання зеленого кольору хлорофілом вносять похибку каротиноїди; у липні в оцінку червоного – антоціани. Проте відхилення значень параметрів P_r та P_g від P_f з травня по липень не перевищує 10%, а у серпні – сягає 20% (табл. 2). Це свідчить про точнішу індикацію вмісту хлорофілу при застосуванні параметра P_f , проте аналіз кольорової гама надає додаткову інформацію про фізіологічний стан рослин, якість довілля та накопичення інших пігментів у листках.

Сумарна доза внутрішнього опромінення від інкорпорованих ^{137}Cs та ^{90}Sr у листках очерету, зібраних на ЧС р. Прип'ять, є у 7 разів меншою, порівняно з найменшим серед проб з інших пікетів значенням, знайденим у Янівському затоні (табл. 3). Через це екосистему ЧС р. Прип'ять у даному дослідженні прийнято за фонову за ознакою внутрішнього опромінення, а проби, відібрані там, – за контрольні. Відповідно, проби листків очерету з інших місць спостереження прийнято за такі, що накопичили аномально високу дозу внутрішнього опромінення.

Таблиця 3

Значення ФП та рівні внутрішнього опромінення листків очерету в місцях спостережень

Місце	n (1)	P_r	V, %	P_g	V, %	n (2)	^{137}Cs , мкГр/год	V, %	^{90}Sr , мкГр/год	V, %	$K_{\text{Sr/Cs}}$
Оз. Глибоке	143	0,79	11	0,76	9	9	0,45	99	0,59	130	0,5
Оз. Далеке	94	0,79	20	0,84	9	7	0,28	130	0,093	110	0,4
ВО ЧАЕС	144	0,70	15	0,74	10	7	0,13	96	0,053	90	0,2
Оз. Азбучин	114	0,72	10	0,75	6	9	0,065	100	0,078	110	0,6
Янівський затон	130	0,72	17	0,73	6	8	0,028	110	0,14	170	0,4
ЧС р. Прип'ять	136	0,76	24	0,73	6	11	0,006	160	0,007	96	1,4

Примітка. n (1) – кількість виміряних листків очерету; n (2) – кількість виміряних змішаних проб листків очерету; $K_{\text{Sr/Cs}}$ – коефіцієнт пропорційності питомої активності накопичених листками очерету радіонуклідів ($^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$).

Сезонні рівні ФП контрольних і аномально опромінених листків очерету суттєво відрізняються як за розміром, так і за коефіцієнтом варіації протягом вегетаційного сезону в різних умовах дозового навантаження (рис. 3, а, 4). В умовах аномального опромінення, максимальний вміст хлорофілу в листках очерету припадає на травень, а у червні відбувається різкий спад його вмісту, на відміну від контрольних проб. Зниження вмісту хлорофілу, що описується характерною кривою на фоні зростання дози внутрішнього опромінення в період максимально активного росту очерету, показане на прикладі оз. Глибоке (рис. 4, б), властиве більшості пікетів із аномальним дозовим навантаженням, починаючи від Янівського затону. Варіабельність вмісту хлорофілу, оцінена за коефіцієнтом варіації параметра P_f , що зростає в умовах аномального опромінення в період найбільш активного росту очерету в червні (рис. 3, а), показує напруження фізіологічної та біохімічної систем рослин, яке компенсує втрати хлорофілу при зростанні сезонної дози опромінення.

У наших дослідженнях, подібно до відомих даних [3], в умовах аномального дозового навантаження рослин спостерігається як стимуляція, так і пригнічення продукції хлорофілу (рис. 3, 4). Це проявляється у непропорційності сезонного розподілу вмісту хлорофілу в контрольних і аномально опромінених листках очерету. У опромінених рослин спостерігається збільшення вмісту зеленого пігменту у травні та серпні й різке зменшення – у червні, при цьому, їх середньосезонний вміст хлорофілу за значенням параметра P_f , переважає контрольні на 7%. Сезонний хід кореляції параметрів P_r та P_g , як було показано вище, свідчить про співвідношення червоних пігментів і хлорофілу в листках рослин. У контрольних рослин ці параметри корелюють від травня до липня при втраті кореляції у

серпні, що пов'язане зі сезонним збільшенням антоціанів [1]. У аномально опромінених рослин кореляційний зв'язок між червоним і зеленим кольорами внаслідок передчасного "старіння" втрачається на місяць раніше – у липні (рис. 3, б).

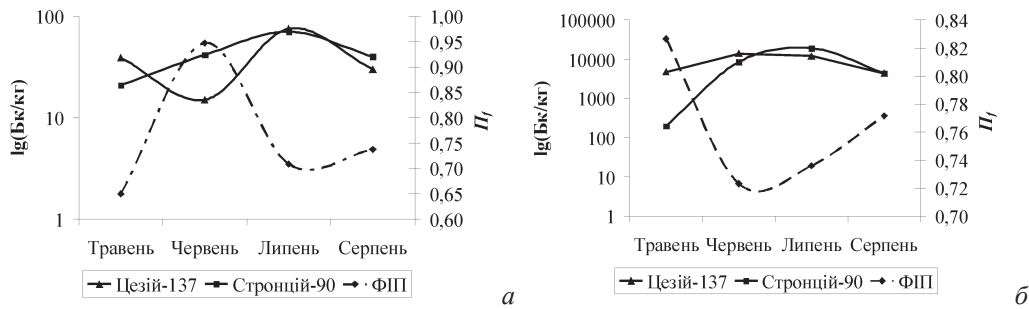


Рис. 4. Розподіл по місяцях значень ФІП с питомої активності радіонуклідів у листках очерету в екосистемах: а – ЧС р. Прип'ять; б – оз. Глибоке.

Складність оцінки зв'язків дози від окремих радіонуклідів із вмістом хлорофілу в листках очерету полягає у тому, що питома активність ^{90}Sr та ^{137}Cs у різні місяці, як правило, взаємно корелює, а значення параметрів ФІП змінюється щодо дозового навантаження від пропорційного до зворотного. Задачу ускладнено також малими вибірками даних (для оцінки сезонного ходу змін – 4 значення, для порівняння пікетів – 6). За таких умов для статистичного аналізу результатів нами застосовано метод Монте-Карло (див. Матеріал і методика). Кореляційний аналіз за названим методом показав у травні тісний зв'язок між дозою опромінювання листків ^{137}Cs та значенням ФІП, що свідчить про стимулюючий вплив на продукцію хлорофілу ^{137}Cs (рис. 5, а). У червні спостерігається інгибування хлорофілу ^{90}Sr , що показує тісна зворотна кореляція значень ФІП і дози від ^{90}Sr . У липні та серпні знову корелює доза ^{137}Cs із вмістом хлорофілу в листках очерету.

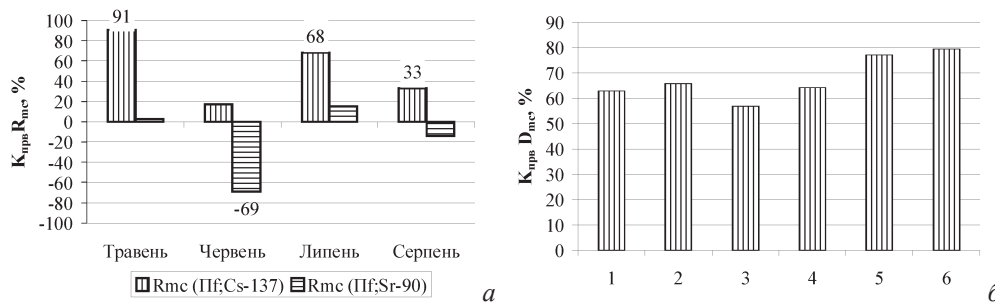


Рис. 5. Результати аналізу за методом Монте-Карло парних вибірок дози опромінення та значення ФІП листків очерету: а – кореляційний аналіз дози та P_r ; б – дисперсійний аналіз дози ^{137}Cs та P_r . Цифрами на осі X позначено: 1 – оз. Глибоке, 2 – оз. Далеке, 3 – ВО ЧАЕС, 4 – оз. Азбучин, 5 – Янівський затон, 6 – ЧС р. Прип'ять.

Перевірку стимулюючого впливу дози ^{137}Cs на утворення хлорофілу листками проведено із застосуванням дисперсійного аналізу за методом Монте-Карло з перевіркою "нульової" гіпотези про те, що вибірки з одного місця, утворені за різними параметрами (доза від ^{137}Cs та значення ФІП) мають однакове математичне очікування. Результати аналізу показали, що найбільша відмінність між дисперсіями порівнюваних вибірок властива листкам очерету з контрольного пікету. По мірі зростання дози від інкорпорованого в листках ^{137}Cs , відмінність між дисперсіями зменшується. Найменша відмінність між дисперсіями –

на ВО ЧАЕС, де листків очерету накопичується у 3,3 разу більше ^{137}Cs , ніж ^{90}Sr (табл. 3). Проведений аналіз показує, що на вміст хлорофілу в листках очерету в умовах хронічного внутрішнього опромінення впливає співвідношення дози від ^{90}Sr та ^{137}Cs , при цьому ^{90}Sr інгібує, а ^{137}Cs стимулює збільшення вмісту хлорофілу в листках очерету в діапазоні доз, останнього від 0,007 мкГр/год до 0,21 мкГр/год, при середньому – 0,11 мкГр/год. Ранню стимуляцію підвищеного утворення хлорофілу у травні, яка поряд із дією ^{90}Sr призводить до дефіциту пігменту в червні під час інтенсивного росту очерету й до скорішого “старіння” рослин, можна розглядати як пошкодуючу дію ^{137}Cs .

Запропонований метод фотографічної індикації хлорофілу ґрунтується на аналізі гама червоного, зеленого та синього кольорів, відбитих листками зелених рослин і зафіксованих на їхніх знімках. Вимірювання, проведені за цим способом, дають змогу оцінити частки хлорофілу щодо інших пігментів у кольоровій гамі знімків.

Другий спосіб індикації хлорофілу ґрунтується на аналізі відбитого листками рослин світла, що селективно поглинається у зеленій ділянці спектра червоним світлофільтром. Цей метод уможливує опосередковану оцінку вмісту хлорофілу, оскільки є малочутливим до участі в кольоровій гамі листків інших, крім хлорофілу, пігментів.

При проведенні екологічної зйомки метод фотографічної індикації хлорофілу в листках рослин можна калібрувати метод за відомими зразками вмісту хлорофілу та обчислювати значення ФІП у абсолютних одиницях концентрації хлорофілу. При проведенні зйомки без калібрування результати отримують у одиницях ФІП.

Фотографічна індикація хлорофілу, на наш погляд, має такі самі переваги, як і метод оцінки дехромації листків, що застосовується при моніторингу лісів, як простота у виконанні та мала витратність, проте є більш об'єктивним, подібно до дистанційних методів, оскільки його результати ґрунтуються на інструментальному вимірюванні та є кількісними.

За результатами проведених спостережень встановлено, що середньосезонний вміст хлорофілу та зміни його концентрації за місяцями відрізняються у листках, зібраних в умовах фонового дозового навантаження від тих, що піддаються хронічному опроміненню аномальними дозами від інкорпорованих радіонуклідів.

На відміну від контрольних проб, максимальний вміст хлорофілу в аномально опроміненних пробах спостерігається у травні та стимулюється дозою, отриманою від ^{137}Cs . У червні, під час інтенсивного росту очерету, вміст хлорофілу в листках аномально опроміненних проб інгібується дією ^{90}Sr . У наступних липні та серпні вміст хлорофілу в листках опроміненних рослин зростає. Рання стимуляція дією ^{137}Cs утворення хлорофілу у травні та інгібуючою дією ^{90}Sr у червні призводять до швидшого “старіння” аномально опроміненних рослин, що проявляється у заміні хлорофілу червоними пігментами у липні – на місяць раніше, порівняно із контрольними.

Автори висловлюють щире подяку завідувачеві відділу прісноводної радіоекології ІГБ НАН України д.б.н., с.н.с. Д.І. Гудкову за надану підтримку у проведенні цих спостережень, а також співробітникам ІПБ АЕС НАН України д.т.н., с.н.с. А.Д. Скорбуну за надані консультації з приводу обчислень за методом Монте-Карло та розробку відповідного програмного продукту для проведення статистичних обчислень результатів спостережень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Джафаров Э. С., Годжаева Г. А., Бабаев Г. Г., Оруджева Д. Ж. Изменение содержания флавоноидов, каротиноидов и антоцианов *Alhagi pseudalhagi* (Bieb.) в условиях

- хронического облучения природными радионуклидами // Вісн. Укр. т-ва генетиків і селекціонерів. 2012. Т. 10. № 2. С. 214–223.
2. Дубына Д. В., Стойко С. М., Сытник К. М. и др. Макрофиты – индикаторы изменений природной среды / Ин-т ботаники им. Н.Г. Холодного АН Украины. К.: Наукова думка, 1993. 436 с.
 3. Заїка В. К. Лісівничо-фізіологічні особливості життєдіяльності соснових насаджень в зоні відчуження Чорнобильської АЕС: автореф. дис. ... д-ра с-г наук: 06.03.03. Львів, 2007. 46 с.
 4. Корнеев Д. Ю. Информационные возможности метода индукции хлорофилла. К.: Альтерпрес, 2002. 191 с.
 5. Мерзляк М. Н. Пигменты, оптика листа и состояние растений // Соросовский образов. журнал. 1998. № 4. С. 19–24.
 6. Методичні рекомендації з моніторингу лісів I рівня / Держ. ком. ліс. госп. України, УкрНДЦЛГА. Харків, 2009. 48 с.
 7. Починок Х. Н. Методы биохимического анализа растений. К.: Наукова думка, 1976. 334 с.
 8. Handbook for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment / Ed. by J. Brown, P. Strand, Al. Hosseini. Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. – Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003.
 9. Simon Julian L. Resampling: the new statistics // Arlington, Va: Resampling Inc. First Printing of second Edition. 1997. P. 436. www.resample.com/content/text/index.shtml.

Стаття: надійшла до редакції 28.10.14

доопрацьована 06.04.15

прийнята до друку 16.04.15

PHOTOGRAPHIC INDICATION OF CHLOROPHYLL IN THE LEAVES OF *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD IN CHRONIC RADIATION EXPOSURE CONDITIONS

D. Ganzha¹, A. Nazarov²

¹*Ivano-Frankivsk Department of the Ukrainian Geographical Society*

201, Galician St., Ivano-Frankivsk 76018, Ukraine

e-mail: dmagan@rambler.ru

²*State Specialized Enterprise "Chornobyl Spetskombinat"*

6, Scool St., Chornobyl 07270, Ukraine

e-mail: nazarov42t@rambler.ru

The research of chlorophyll and radionuclides content in common reed leaves were performed. Leaf samples were collected at the Chernobyl exclusion zone. In addition to the existing methods of chlorophyll content measurement in plants, a method of its photographic indication was developed.

The method is based on scanning and analyzing in digital images of red, green and blue colors reflected from the leaves. Research has established that the chlorophyll metabolism violation in the common reed leaves is of the incorporated ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs radiation dose effect. At the same time, ⁹⁰Sr – inhibits, but ¹³⁷Cs, within the studied dose, stimulates the

production of chlorophyll in the beginning of the growing season than violate the development of plants.

Keywords: biology indication, environmental monitoring, common reed, chlorophyll, plant physiology, radioecology.

**ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА В ЛИСТЬЯХ
PHRAGMITES AUSTRALIS (CAV.) TRIN. EX STEUD В УСЛОВИЯХ
ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

Д. Ганжа¹, А. Назаров²

¹*Ивано-Франковское отделение Украинского географического общества
ул. Галицкая, 201, Ивано-Франковск 76018, Украина
e-mail: gandyber@gmail.com*

²*Государственное специализированное предприятие
“Чернобыльский спецкомбинат”
ул. Школьная, 6, Чернобыль 07270, Украина
e-mail: nazarov42t@rambler.ru*

Исследовано содержание хлорофилла и радионуклидов в листьях тростника обыкновенного. Пробы листьев собраны в Чернобыльской зоне отчуждения. Кроме действующих методов оценки содержания хлорофилла в растениях, предложен метод его фотографической индикации. Метод основан на сканировании и анализе цифровых изображений, отраженных листьями красного, зеленого и синего цветов. Исследованиями установлено, что нарушения обмена хлорофилла в листьях тростника являются эффектом дозы облучения от инкорпорированных ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. При этом ⁹⁰Sr – ингибирует, а ¹³⁷Cs, в пределах исследованных доз, – стимулирует выработку хлорофилла в начале вегетации, чем нарушает развитие растений.

Ключевые слова: биологическая индикация, мониторинг окружающей среды, тростник обыкновенный, радиоэкология, физиология растений, хлорофилл.