

ЕКОЛОГІЯ

УДК 577.34(544.58:546.42)(582.522:581.41)

**ВПЛИВ ХРОНІЧНОГО РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ
НА ЖИЛКУВАННЯ ТА РОЗТАШУВАННЯ ПРОДИХІВ У ЛИСТКАХ
PHRAGMITES AUSTRALIS (CAV.) TRIN . EX STEUD**

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 листки очерету звичайного, зібрані у водних екосистемах Чорнобильської зони відчуження. У місцях спостережень сумарна доза опромінення листків очерету від інкорпорованих ⁹⁰Sr і ¹³⁷Cs становила від 0,02 до 0,7 мкГр/год. Досліджено жилкування листків і локалізацію продохів на макро- та мікрорівні. Показано, що дозове навантаження призводить до морфологічних змін жилкування та локалізації продохів у листках очерету. Метод порівняльного аналізу морфологічних ознак листків рослин може бути застосований для діагностики якості довкілля при проведенні екологічного моніторингу.

Ключові слова: анатомія та морфологія рослин, біоіндикація, очерет звичайний, радіоекологія.

Жилкування та розташування продохів у листках в умовах забруднення довкілля можуть зазнавати змін, унаслідок чого ці морфологічні ознаки є важливими характеристиками розвитку вищих рослин в умовах техногенного навантаження [1, 2, 5]. Разом з тим, сутність морфологічних змін у листках рослин під впливом хронічного радіаційного опромінення є недостатньо вивченою [5]. Важливим завданням біоіндикації для потреб діагностики довкілля при проведенні екологічного моніторингу є калібрування засобів індикації за параметрами морфологічних ознак (морфометричних параметрів), що дає змогу більш точно кількісно описати дію факторів довкілля на рослини.

Метою нашого дослідження є вивчити вплив хронічного опромінення ⁹⁰Sr та ¹³⁷Cs на морфологію жилкування, провідних пучків і розташування продохів у листках очерету і дати кількісну оцінку морфометричних параметрів цих ознак залежно від дози опромінення.

Матеріал і методика

Протягом 2008–2011 рр. у Чорнобильській зоні відчуження нами досліджено морфологічні ознаки очерету звичайного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud). Відбирали пагони разом із листками й окремо – листки очерету. Спостереження виконано в екосистемах таких водойм: оз. Азбучин, оз. Глибоке, оз. Далеке, водойма-охолодник Чорнобильської АЕС (ВО ЧАЕС), Янівський затон р. Прип'ять. Як місцевий фон радіонуклідного забруднення прийнято екосистему р. Прип'ять у створі м. Чорнобиль (ЧС р. Прип'ять). Для порівняння з регіональним фоном, у 2011 р. відібрано листки очерету в екосистемі оз. Пісочне (Шацькі озера).

У лабораторії ДСП “Чорнобильський спецкомбінат” згідно з чинними методиками [6] виконано аналіз питомої активності ^{90}Sr й ^{137}Cs у відібраних рослинах і листках очерету із застосуванням спектрометра енергії бета-випромінювання СЕБ 01-150 та гамма-спектрометра з аналізатором Nokia LP 4900 В і Ge-детектором. Межа основної статистичної похибки аналізу радіонуклідів не перевищує 20%. За результатами вимірювань відповідних радіонуклідів, згідно з наявними рекомендаціями [9], нами обчислено потужність дози внутрішнього опромінення рослин або листків очерету.

Для макроскопічного аналізу застосовано свіжозібрані листки очерету. Товщину листків очерету вимірювали із застосуванням цифрового штангенциркуля на півдовжині листків і піввідстані між центральною жилкою та його краями. Усереднений результат вимірювань приймали за товщину жилок другого порядку (d_M). Крім того, листки очерету сканували при наскрізному освітленні, зображення реєстрували у ГІС-додатку MapInfo Professional та вимірювали відстань між жилками другого порядку ($l_{\text{макро}}$).

Для мікроморфологічного аналізу застосовано насічки повітряно-сухих листків колекції 2010–2011 рр., взяті посередині листової пластинки обабіч центральної жилки. Знімки поверхні листків виконано на скануючому електронному мікроскопі РЕМ-100У при збільшенні $100\times$, $500\times$ та $1000\times$. Зйомку проводили на адаксіальному боці листків, для порівняння зроблено знімки листків з оз. Далеке на абаксіальному боці. На зареєстрованих у ГІС-додатку MapInfo Professional зображеннях вимірювали координати продохів; товщину жилок 3-го порядку (d_m , мкм); умовну товщину колатеральних провідних пучків, оцінену за шириною їх проекції у рельєфі поверхні листової пластинки (d_{III} , мкм), у подальшому – товщину провідних пучків, їх погонну довжину (l_n , мкм) та найкоротшу відстань між кінцями провідного пучка, обмеженого краями зображення (l_k , мкм).

Щільність продохів (P_p , продохів/мм²) і неоднорідність їх розподілу на поверхні листової пластинки обчислювали за запропонованими нами способами, що ґрунтуються на вимірюванні координат продохів на мікрознімках і створенні мережі полігонів Вороного у середовищі ГІС-додатку [10]. Коефіцієнти варіації площ полігонів Вороного (V_S) застосовано для оцінки нерівномірності розташування продохів на листових пластинках.

Коефіцієнт кривизни провідних пучків на мікрознімках (K_k) нами запропоновано обчислювати як відносну різницю їх вимірної довжини:

$$K_k = (l_n - l_k) / l_k, \quad (1)$$

де: l_n – погонна (лінійна) довжина пучків на мікрознімку; l_k – найкоротша відстань між крайніми точками зображення пучків.

Обчислення статистичних параметрів вибірок даних виконано із застосуванням відповідних функцій Microsoft Excel при довірчій імовірності 0,95. Для встановлення кореляційного зв'язку між вибірками обчислювали коефіцієнт детермінації – R^2 . Коефіцієнт варіації (V) обчислювали як відношення стандартного відхилення до вибіркового середнього.

Невизначеність результатів вимірювань морфометричних параметрів (u) обчислювали за формулою [8]:

$$u\% = \sqrt{\sum_c u_c^2} \cdot 100, \quad (2)$$

де u_c – складові невизначеності, до яких залучали: 1) невизначеність, пов'язану із засобом і процедурою вимірювання (виникає при вимірюваннях цифровим штангенциркулем та інструментом “лінійка” у ГІС-додатку); 2) випадкова статистична невизначеність вимірювання, що пов'язана з морфологічними відмінностями досліджуваних тканин і процедурою їх оптичного дослідження. Значення u_c обчислювали як коефіцієнт варіації

результатів кількох послідовних вимірювань одної проби. Значення u_c за п. 1 вимірювали при калібруванні засобу вимірювань і приписували всім вимірюванням, за п. 2 – обчислювали для вибірок даних із кожного місяця спостережень.

Результати і їхнє обговорення

Більшу дозу опромінення при її більшій дисперсії рослини отримують від ^{90}Sr (табл. 1). Доза внутрішнього опромінення очерету в колекціях окремих років в екосистемах із найбільшим радіаційним забрудненням, наприклад: на оз. Глибоке – удвічі переважала дозу оз. Далеке, а доза оз. Азбучин – втричі переважала дозу на ВО ЧАЕС. За сумарною дозою зовнішнього опромінення, обчисленою відповідно до питомої активності води у місцях спостережень [3, 6], досліджувані екосистеми розташувались у трохи іншому порядку з переважанням за ознакою активності оз. Глибокого щодо Далекого та оз. Азбучин і Янівського затону щодо ВО ЧАЕС (табл. 1). За ознакою накопиченої очеретом дози опромінення ми умовно розділили місця спостережень на чотири рівні: найбільша доза опромінення – екосистеми озер Глибоке та Далеке; середній рівень – ВО ЧАЕС, оз. Азбучин і Янівський затон; опромінення місцевого фону – ЧС р. Прип'ять; регіональний фон за відсутності значущого опромінення ^{90}Sr та ^{137}Cs – оз. Пісочне.

Таблиця 1

Дози радіаційного опромінювання очерету звичайного у місцях спостережень

Водойми	Сумарна доза зовнішнього опромінення, Гр/р.	n	Внутрішня доза рослин				Внутрішня доза листків	
			^{137}Cs мкГр/год	V, %	^{90}Sr мкГр/год	V, %	^{137}Cs мкГр/год	^{90}Sr мкГр/год
оз. Далеке	$1,7 \cdot 10^{-5}$	7	0,11	65	0,61	130	0,10	0,03
оз. Глибоке	$5,9 \cdot 10^{-5}$	10	0,19	88	0,26	200	0,05	0,19
ВО ЧАЕС	$6,3 \cdot 10^{-6}$	7	0,24	110	0,17	220	0,11	0,03
оз. Азбучин	$5,6 \cdot 10^{-5}$	10	0,045	64	0,14	260	0,04	0,01
Янівський затон	$1,7 \cdot 10^{-5}$	9	0,023	150	0,047	180	0,01	0,01
ЧС р. Прип'ять	$3,1 \cdot 10^{-7}$	9	0,011	240	0,010	140	0,001	0,0003

Примітка. Дані розташовано за зменшенням сумарної дози (^{90}Sr та ^{137}Cs) внутрішнього опромінення рослин; сумарна доза зовнішнього опромінення обчислена для вегетаційного періоду 2008–2009 рр.; доза внутрішнього опромінення рослин – станом на 2008–2011 рр., листя – 2011 р.; n – кількість відборів проб.

Крім радіонуклідного забруднення, на морфогенез листків очерету впливали чинники нерадіаційного техногенного навантаження. Серед досліджених екосистеми озер Глибоке та Далеке перебувають в умовах найменшого нерадіаційного впливу, проте мають найбільше радіонуклідне забруднення. Найвищі рівні нерадіаційного техногенного навантаження властиві екосистемам ВО ЧАЕС та меншою мірою – оз. Азбучин (воно перебуває під впливом промайданчика ЧАЕС), Янівському затону та ЧС р. Прип'ять. В останні дві водойми відбувається поверхневий змив з міст Прип'ять і Чорнобиль, що перебувають у стані демуації ландшафту (відновлення природного середовища на фоні руйнації інженерних споруд). Названі екосистеми також значно забруднені внаслідок масового застосування, з метою дезактивації поверхні під час перших поаварійних років, крім іншого, карбамідних смол, нафтошламів, сульфідно-спиртової барди, іонних і неіонних детергентів [7]. Продукти розпаду згаданих речовин, вочевидь, дотепер впливають на стан рослин.

При цьому вони можуть не тільки пошкоджувати, але й стимулювати їх розвиток унаслідок збагачення екосистем, зокрема іонами калію та фосфору. Так, концентрація останнього у воді ВО ЧАЕС перевищує цей показник у інших місцях спостережень в 1,3–5 разів [4].

Оцінка невизначеності (u) результатів морфометричних вимірювань (табл. 2) показала, що її складова пов'язана із засобами вимірювання має незначну частку і в середньому становить при вимірюванні параметрів d_M та l_M , d_m та d_{III} у 14%, 3%, 5% та 6%, відповідно. Щодо параметрів K_k та P_p – 34% та 27%, відповідно. Невизначеність розрахункових морфометричних параметрів оцінювали за їх аргументами: K_k – за l_n та l_k , V_s – за P_p . Середня статистична невизначеність параметра P_p становить 16%. Таким чином, переважна частка розміру невизначеності (65–95%) утворюється за рахунок флуктуації морфологічних ознак досліджуваних тканин. Отримані результати характеризують якість проведення морфометричних вимірювань.

Таблиця 2

Морфометричні параметри листків очерету звичайного у місцях спостережень

Водойми	n (макро)	d_M , мм	u , %	l_M , мм	u , %	n (мікро)	d_m , мкм	u , %	d_{III} , мкм	u , %	K_k	u , %	P_p , п/ мм ²	V_s , %
оз. Далеке	62	0,17	29	1,12	22	15	24	22	4,6	13	1,2	5	149	48
оз. Глибоке	105	0,15	22	1,18	16	–	–	–	–	–	–	–	–	–
ВО ЧАЕС	75	0,16	23	1,27	17	18	30	21	4,7	8	3,3	4	100	45
оз. Азбучин	127	0,16	27	1,26	20	12	28	21	4,6	22	3,3	4	83	47
Янівський затон	53	0,17	12	1,16	14	21	33	17	5,0	18	5,1	6	83	41
ЧС р. Прип'ять	100	0,18	14	1,09	13	23	37	14	5,4	13	6,0	4	68	37
оз. Пісочне	68	0,19	11	–	22	18	36	17	5,5	14	9,3	6	57	42

Примітка. n (макро) – кількість вимірених листків очерету; n (мікро) – кількість вимірювань, проведених за знімками листків із трьох пагонів очерету.

Значення та дисперсія макроморфометричних параметрів листків очерету змінюються пропорційно дозовому навантаженню (табл. 1, 2). Порівняння параметрів d_M та l_M із дозою опромінення листків показує збільшення відстані між жилками 2-го порядку при зменшенні їх товщини пропорційно до накопиченої листками дози радіаційного опромінення.

Як у жилку 2-го порядку, так і у жилку 3-го (d_m) відбуваються морфологічні зміни при збільшенні накопиченої листками очерету дози від інкорпорованих радіонуклідів, що проявляються у нелінійному зменшенні товщини жилок (табл. 1, 2; рис. 1).

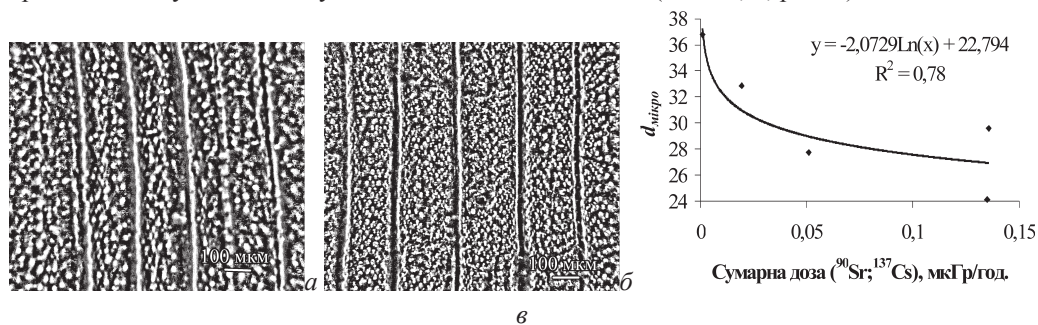


Рис. 1. Жилки 3-го порядку (збільшення 100 \times) у листках очерету (а – ЧС р. Прип'ять, б – оз. Далеке) та зв'язок товщини жилок (d_m) із дозою внутрішнього опромінення (в). Мережа світлич цяткок між жилками (рис. а, б) – грудки воску навколо продихів.

Найбільша дисперсія результатів (V – від 32% до 82%) властива коефіцієнтові кривизни провідних пучків (K_k) листків очерету. При цьому коефіцієнт варіації параметра K_k зростає, а його значення, разом із товщиною провідних пучків (d_{III}), як і товщина жилок 3-го порядку (d_m), зменшується при зростанні дозового навантаження (табл. 1, 2, рис. 2). Подібна спрямованість морфологічних змін властива і жилкам 2-го порядку, як зазначалося вище.

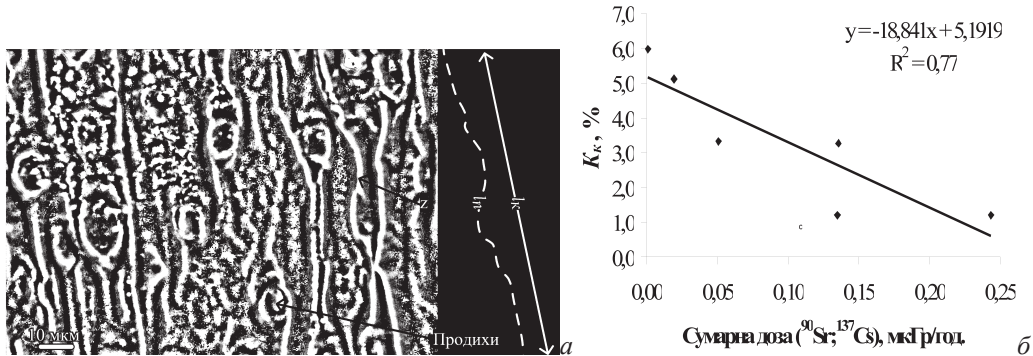


Рис. 2. Провідні пучки (збільшення 1000 \times) у листку очерету з оз. Пісочне (а) та зв'язок коефіцієнта кривизни пучків (K_k) із дозою внутрішнього опромінення (б). Показано приклад вимірювання морфометричних параметрів провідного пучка, позначеного "z" (а), де $l_n=158$ мкм, $l_k=147$ мкм, $K_k=7\%$.

Порівняння морфометричних параметрів продихів з обох боків листків очерету, відібраних на оз. Далеке, показало, що на одиницю площі абаксіальної поверхні припадає у 2,2 рази більше продихів, при тому, що дисперсія їх розташування (V_s) на 15% менша. При зростанні дози радіаційного опромінення щільність продихів на адаксіальній поверхні листків очерету (P_p) та дисперсія їх розташування (V_s) збільшується (табл. 1, 2, рис. 3).

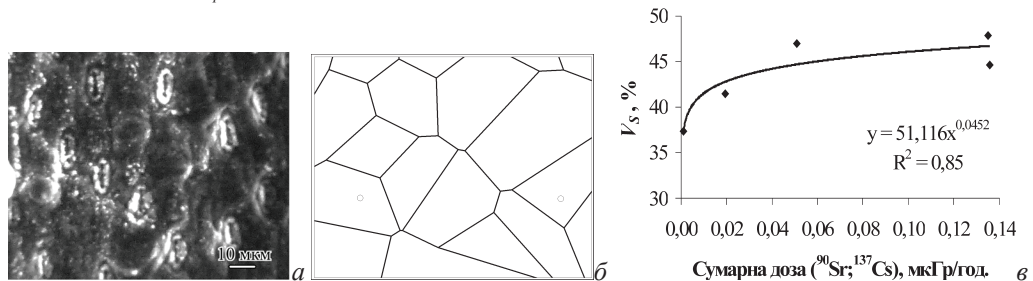


Рис. 3. Аналіз продихів у листках очерету: а – знімок листка з оз. Далеке (збільшення 1000 \times , воскові виділення змито); б – полігони Вороного, створені за координатами продихів; в – зв'язок неоднорідності розподілу продихів (V_s) із внутрішнім опроміненням листків.

Потужність дози опромінення за ^{90}Sr та ^{137}Cs із морфометричними параметрами листків очерету проявляє різної сили зв'язки – від слабкого до тісного, що апроксимуються як лінійними, так і нелінійними трендами. Зв'язки із значенням $R^2 < 0,25$ вважали ненадійними і до уваги не брали (табл. 3). Морфологічна реакція листків очерету, що описується товщиною жилки (d_M), має слабкий зворотний зв'язок із дозою радіаційного опромінення (табл. 3). На відміну від інших морфометричних параметрів, значення відстані між жилками другого порядку (l_M) корелює із питомою активністю радіонуклідів у воді (табл. 3). Такий зв'язок свідчить про вплив зовнішнього опромінення занурених частин рослини,

можливо, у поєднанні із внутрішнім опроміненням кореневища та кореневої системи. Результати показують складний зв'язок макроморфологічних змін листків очерету не тільки із хронічним внутрішнім і зовнішнім радіаційним опроміненням, але і з дією нерадіаційних факторів довкілля, що потребує додаткового дослідження.

Таблиця 3

Коефіцієнти детермінації зв'язку морфометричних параметрів із потужністю дози опромінення листків очерету

Доза	d_M	l_M	d_m^*	d_{III}^*	K_k	P_p	V_S
^{90}Sr (внутрішня)	-0,35	0	-0,76	-0,91	-0,86	0,62	0,66
^{137}Cs (внутрішня)	-0,37	0	-0,79	-0,91	-0,73	0,52	0,57
^{90}Sr (зовнішня)	0	0,38	0	0	0	0	0
^{137}Cs (зовнішня)	0	0,30	0	0	0	0	0

Примітка. «*» – зв'язок описується логарифмічною регресією, інші – лінійною.

Кореляційний аналіз, що описує зміни провідної тканини на фоні хронічного внутрішнього опромінення листків, на відміну від макроскопічних параметрів жилкування, показав тісний зв'язок між дозовим навантаженням і мікроморфологічною реакцією листків очерету (табл. 3). При цьому параметри провідної тканини (d_m , d_{III} , K_k) мають тісний зворотний зв'язок із дозовим навантаженням. Тобто під впливом поглиненої листками очерету дози від інкорпорованих радіонуклідів провідні пучки (d_{III}) стають тоншими, а їх кривизна (K_k) зменшується. Різницю між листками з фонових умов і максимального дозового навантаження за цими параметрами можна оцінити у 1,4 та 8 разів, відповідно. Зміни провідних пучків тягнуть за собою зміни жилок 3-го порядку (d_m), які відрізняються між максимумом і мінімумом дозового навантаження в 1,5 разу (табл. 2, 3; рис. 2).

Кількість продихів (P_p) і дисперсія їх розташування (V_S) на адаксіальному боці листків очерету у фонових умовах відрізняється від місць із максимальним дозовим навантаженням у 2,4 та 1,2 разу, відповідно (табл. 1, 3; рис. 3). Обидва показники мають середньої сили кореляційні зв'язки із дозами внутрішнього опромінення від ^{90}Sr та ^{137}Cs . Отримані результати показують, що вплив радіаційного забруднення на морфогенез продихового апарату узгоджується із даними інших дослідників про дію радіаційного та нерадіаційного техногенного забруднення на ті самі органи рослин [1, 5].

Порівняння коефіцієнтів варіації морфометричних параметрів, усереднених для кожного місця спостережень, із відповідними дозами опромінення листків очерету ^{90}Sr та ^{137}Cs показало, що тренди значень дози та дисперсії параметрів d_M , l_M , d_m та K_k збігаються зі значеннями R^2 (обчислено за сумарною дозою) – 0,54, 0,62, 0,70, 0,81, відповідно. Отриманий результат описує реакцію листків на дозове навантаження: 1) відсутності зв'язку дисперсії із дозою показує, що морфологічні зміни більшості листків відбуваються пропорційно накопиченій дозі (d_{III} , P_p , V_S); 2) наявність зв'язку показує, що відбуваються зміни різної сили, а частина листків зберігає параметри на рівні фонових.

Аналіз взаємного зв'язку морфометричних параметрів показав, що вони корелюють між собою на фоні різної сили залежності від дози опромінення листків очерету (табл. 4).

Із даних табл. видно, що найтісніші зв'язки морфометричні параметри утворюють, коли вони належать до одного типу тканини. Наприклад, товщина провідних пучків (d_{III}), жилок 3-го (d_m) та 2-го порядку (d_M) тісно пов'язані між собою. При цьому сила їх зв'язку із дозою внутрішнього опромінення листків змінюється у ряді: $d_{III} > d_m > d_M$ (табл. 3). Це

свідчить про найбільшу ефективність дії радіаційного опромінення та надійність її індикації на мікрорівні організації тканини.

Таблиця 4

Значення коефіцієнтів детермінації зв'язку морфометричних параметрів листків очерету

Параметр	d_M	l_M	d_m	d_{III}	K_k	P_p
l_M	-0,68 (лін.)	1				
d_m	0,47 (лін.)	0	1			
d_{III}	0,86 (лін.)	-0,51 (лін.)	0,83 (лін.)	1		
K_k	0,27 (лін.)	0	0,82 (лін.)	0,89 (лог.)	1	
P_p	-0,44 (ступ.)	0	-0,78 (лін.)	-0,62 (ступ.)	-0,76 (лін.)	1
V_S	-0,41 (лін.)	0,30 (ступ.)	-0,83 (ступ.)	-0,38 (лін.)	-0,58 (лог.)	0,51 (лін.)

Примітка. У дужках вказано тип регресії, якою апроксимується зв'язок – лінійна (лін.), логарифмічна (лог.), ступенева (ступ.).

Морфометричні параметри, які стосуються до різних тканин і відрізняються функціонально та за походженням, але перебувають на одному рівні організації листків (мікро- або макроскопічному), утворюють тісні зв'язки. Наприклад, між кривизною провідних пучків (K_k) і товщиною жилок 3-го порядку (d_m), з одного боку, та параметрами продохів (P_p та V_S), з іншого, є тісні зворотні кореляційні зв'язки. На макрорівні тісно пов'язані товщина (d_M) та відстань між жилками 2-го порядку (l_M), параметри, які навіть корелюють із різними джерелами опромінення – внутрішнім і зовнішнім (табл. 3, 4). Сила зв'язку між параметрами різних тканин на різному рівні організації листків зменшується до середньої, слабкої або її відсутності – наприклад, між параметрами d_M , l_M з одного боку, та параметрами продохів (P_p та V_S), з іншого.

Непропорційність реакції окремих ознак морфологічної будови листків очерету на накопичену дозу радіаційного опромінення та наявність нерадіаційних впливів у місцях спостережень зумовили потребу перевірки надійності результатів індикації у різних умовах довкілля, яку здійснено методом дисперсійного аналізу. При проведенні аналізу перевіряли за t -критерієм вірогідність (%) таких гіпотез: 1) вибірки з різних місць спостережень, утворені за одним параметром, при порівнянні з вибірками – за іншими параметрами, мають однакове математичне очікування; 2) вибірки за одним параметром, утворені з різних місць спостережень, належать до однієї базової вибірки.

Перевірка першої гіпотези показала, що вірогідність подібності вибірок перебуває у інтервалі від 0 до $n \cdot 10^{-20}\%$, тобто в основі формування морфологічних ознак, які описують морфометричні параметри листків, лежать різні радіобіологічні дії. Винятком є параметри, що описують товщину (d_{III}) та кривизну (K_k) провідних пучків, дисперсія яких відрізняється із вірогідністю 20%. Останнє свідчить про те, що в основі обох морфологічних реакцій провідної тканини лежить один радіобіологічний ефект, який проявляється у параметрах d_{III} та K_k .

Дисперсійний аналіз результатів за другою гіпотезою дає змогу оцінити порогові чутливості методу до різного рівня дозового та нерадіаційного техногенного навантаження на підставі приналежності або неприналежності вибірок із різних умов довкілля до однієї базової. За міру зони нечутливості методу приймали значення вірогідної відмінності вибірок – менше 50%. В інших випадках цей показник, вочевидь, має бути врахованим при обчисленні випадкової статистичної невизначеності результатів індикації. Переважна

більшість перевірених у цьому дослідженні вибірок показала, що вірогідність їх відмінності – більше 85%. Аналіз даних за другою гіпотезою щодо параметра P_p не проводили.

Згідно з оцінкою за другою гіпотезою, зона нечутливості методу для макроморфометричних параметрів d_M та l_M за верхнім порогом чутливості настає в умовах максимального дозового навантаження в екосистемах озер Глибоке та Далеке. Подібність вибірок із цих місць, за обома названими параметрами, становить 50%. Нижній поріг чутливості індикації – відсутній, оскільки дані з ЧС р. Прип'ять не утворюють із жодною з інших вибірок значення вірогідної відмінності менше 50%. Спільна дія нерадіаційного із радіаційним факторами довкілля (оз. Азбучин, ВО ЧАЕС, Янівський затон) погіршує чутливість методу – подібність цих вибірок коливається між 15 та 20%.

При аналізі мікроморфометричних даних за другою гіпотезою, вибірки за параметром d_m , розділилися на фонові (ЧС р. Прип'ять та оз. Пісочне із вірогідною подібністю 65%) та ті, що перебувають в умовах найбільшого поєднаного радіаційного та нерадіаційного техногенного навантаження (оз. Азбучин, ВО ЧАЕС, оз. Далеке, Янівський затон – від 50 до 60%). Перші утворюють нижню зону нечутливості методу, другі – верхню. Дія радіаційного та нерадіаційного чинників за умови, коли один із них не досягає максимуму, знижує вірогідну відмінність вибірок. Наприклад, для ВО ЧАЕС та оз. Далеке – до 80% або для ВО ЧАЕС та ЧС р. Прип'ять – до 70%.

Параметри d_{III} , K_k та V_s не мають верхнього порогу чутливості за ознакою дозового навантаження. Зона нечутливості параметрів d_{III} та K_k утворюється в умовах максимумів нерадіаційних факторів довкілля (ВО ЧАЕС, Янівський затон, ЧС р. Прип'ять). Для параметра V_s за таких умов відбувається послаблення чутливості (аналіз вибірок з ВО ЧАЕС і Янівського затону показує вірогідну подібність 30%).

Проведена оцінка впливу дози хронічного опромінення ^{90}Sr й ^{137}Cs на морфологічні ознаки листків очерету звичайного в умовах різного рівня техногенної трансформації водних екосистем показала, що реакція листків настає на макро- та мікроскопічному рівні. На мікроскопічному рівні збільшується відносна кількість продихів і зростає нерівномірність їх розташування, зменшується товщина та погонна довжина провідних пучків, зменшується товщина жилок 3-го порядку. На макроскопічному рівні зменшується товщина жилок 2-го порядку та зростає відстань між ними.

Оцінено зв'язок між морфологічними змінами, що настають на мікро- та макроскопічному рівні у листках очерету під впливом поглиненої дози опромінення. Аналіз отриманих даних показав, що вивчені морфометричні параметри листків очерету переважно не дублюють один одного та мають різну чутливість щодо поглиненої листками дози опромінення та дії нерадіаційних техногенних факторів довкілля. Спільне застосування досліджених морфометричних параметрів дає змогу комплексно оцінити стан рослин в умовах техногенного радіаційного та нерадіаційного забруднення.

Оскільки дія радіаційного опромінення на організми є неспецифічною, запропонований нами метод морфометричної індикації може застосовуватися для діагностики якості довкілля та проведення екологічного моніторингу в зонах техногенезу як при радіаційному, так і при нерадіаційному забрудненні. Різна чутливість морфометричних параметрів листків очерету до дії факторів довкілля створює необхідність калібрування методу до умов території проведення моніторингових спостережень.

Автори висловлюють щире подяку співробітнику ІПБ АЕС НАН України Г.І. Петеліну за виконані на електронному мікроскопі знімки листків очерету і співробітнику ДСП "Чорнобильський спецкомбінат" Б.М. Сплошному за надані поради щодо метрологічного забезпечення спостережень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Андреева М. В. Оценка состояния окружающей среды в насаждениях в зонах промышленных выбросов с помощью растений-индикаторов: автореф. дис. ... канд. с-х. наук: 06.03.03. СПб., 2007. 20 с.
2. Васін В. А., Лях В. О. Особливості жилкування листка-мутанта, отриманого під дією етилметансульфонату на насіння соняшника // Вісн. Одеськ. ун-ту. Біологія. 2005. Т. 10. Вип. 5. С. 67–72.
3. Ганжа Д. Д., Назаров О. Б., Ганжа Х. Д. та ін. Радіаційні фактори довкілля й морфологічна реакція листків *Phragmites australis* у водоймах ЗВ ЧАЕС // Двадцять п'ять років Чорнобильської катастрофи. Безпека майбутнього: Міжнар. конф. (20–22 квітня 2011 р., Київ, Україна): зб. доп., висновки і рекомендації. К., КІМ, Ч. 2. 2011. С. 285–289.
4. Ганжа Д. Д., Назаров О. Б. Изменение механических характеристик листьев тростника обыкновенного под влиянием хронического радиационного облучения // Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды: Материалы междунар. конф. (Сыктывкар, Республика Коми, Россия, 17–21 марта 2014 г.). Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2014. С. 210–214.
5. Зайка В. Формування листяного апарату радіаційно ураженими деревами сосни звичайної // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. біол. 2003. Вип. 34. С. 70–75.
6. Звіт про роботу ДСНВП “Екоцентр” за 2009 рік. Чорнобиль: МПНС України, ДСНВП «ЕКОЦЕНТР», 2009. 251 с.
7. Ретроспективна дозиметрія учасників ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС / С.В. Іллічов, О.А. Кочетков, В.П. Крючков та ін.; за ред. канд. фіз.-мат. наук А.В. Носовського. К.: Седа-стиль, 1996. 256 с.
8. РМГ 43-2001. ГСИ. Применение “Руководства по выражению неопределенностей измерений” / Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. Минск: ИПК «Издательство стандартов», 2003, 26 с.
9. 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.
10. MapInfo Professional 9.0. Руководство пользователя / MapInfo.Corporation Troy New York, 2007, 620 p. <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/MapInfo-9.0.pdf>.

Стаття: надійшла до редакції 01.03.14

доопрацьована 15.12.14

прийнята до друку 10.03.15

**THE CHRONIC IRRADIATION EFFECT OF THE VENATION AND STOMATA
PLACEMENT IN THE *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD LEAVES**

D. Ganzha¹, A. Nazarov²

*¹Ivano-Frankivsk Department of the Ukrainian Geographical Society
201, Galician St., Ivano-Frankivsk 76018, Ukraine
e-mail: gandyber@gmail.com*

*²State Specialized Enterprise "Chernobyl Spetskombinat"
6, School St., Chernobyl 07270, Ukraine
e-mail: nazarov42t@rambler.ru*

Investigated *Phragmites australis* leaves were sampled in aquatic ecosystems of the Chernobyl exclusion zone. In the observation fields, the total dose of reed leaves from incorporated ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs ranged from 0.02 to 0.7 μGr/h. At the macro- and micro-levels, venation and localization of leaf stomata in common reed were researched. It is shown that the radiation dose leads to morphological changes of the venation and localization of leaf stomata of reed. The method of comparative analysis of morphological characters of plant leaves at the macro- and micro- levels can be used for the diagnostic of the environment quality in ecological monitoring.

Keywords: biology indication, common reed, plant anatomy and morphology, radioecology.

**ВЛИЯНИЕ ХРОНИЧЕСКОГО РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА
ЖИЛКОВАНИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ УСТЬИЦ В ЛИСТЬЯХ *PHRAGMITES
AUSTRALIS* (CAV.) TRIN . EX STEUD**

Д. Ганжа¹, А. Назаров²

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

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

Исследованы листья тростника обыкновенного, собранные в водных экосистемах Чернобыльской зоны отчуждения. В местах наблюдений суммарная доза облучения листьев тростника от инкорпорированных ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs составила от 0,02 до 0,7 мкГр/ч. Исследованы жилкование листьев и локализация устьиц на макро- и микроуровне. Показано, что дозовая нагрузка приводит к морфологическим изменениям жилкования и локализации устьиц в листьях тростника. Метод сравнительного анализа морфологических признаков листьев растений может быть применен для диагностики качества окружающей среды при проведении экологического мониторинга.

Ключевые слова: анатомия и морфология растений, биоиндикация, тростник обыкновенный, радиоэкология.