

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА



КОМАРОВА ІРИНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 581.522.4(477.63)(043.3)

**ЕКОЛОГО-БІОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ *TARAXACUM OFFICINALE* WIGG
ЗА ДІЇ ЗАБРУДНЕННЯ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В УМОВАХ
ПРОМИСЛОВОГО КРИВОРІЖЖЯ**

03.00.16 – екологія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата біологічних наук

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Відділі оптимізації техногенних ландшафтів Криворізького ботанічного саду НАН України

Науковий керівник: кандидат біологічних наук,
старший науковий співробітник
Гришко Віталій Миколайович,
Криворізький ботанічний сад НАН України,
відділ оптимізації техногенних ландшафтів,
старший науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор біологічних наук, професор, чл.-кор. НАН України
Заїменко Наталія Василівна
Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН
України, директор

доктор біологічних наук, професор
Зайцева Ірина Олексіївна
кафедра фізіології та інтродукції рослин Дніпровського
національного університету ім. Олеся Гончара, професор

Захист відбудеться «16» жовтня 2019 року о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.051.04 у Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара за адресою: 49010, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 72, корпус 17, біолого-екологічний факультет, ауд. 711.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Казакова, 8.

Автореферат розісланий «13» вересня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат біологічних наук, доцент



А. О. Дубина

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Вивчення закономірностей функціонування конкретних екосистем, або особливостей пристосування популяцій видів чи їх угруповань до умов навколишнього середовища, зокрема, урболандшафтів з різним рівнем забруднення, розглядається як головне завдання спеціальної екології. В умовах посилення глобальних змін клімату, однією з причин яких є урбанізація та викиди у атмосферне повітря забруднювачів промислового та сільськогосподарського походження, актуальною проблемою є вивчення особливостей аутоекології живих організмів та пізнання механізмів підтримання їх стійкості (Wuana and Okieimen 2011; Гришко, 2012; Aminiyan, 2016). В умовах Криворіжжя, з переважанням забруднення підприємствами гірничо-металургійного комплексу, потребують подальшого дослідження процеси акумуляції важких металів такими компонентами екосистем, як ґрунт і рослинність та участі ґрунтових бар'єрів у їх міграції (Цветкова, 2003; Hall and Williams, 2003; Wodala, 2012, Жуков, 2017). Поряд з цим необхідною складовою моніторингових досліджень урболандшафтів є визначення спроможності певних елементів до транслокації в системі «ґрунт-рослина» (Marchiol, 2004; Tangahu, 2011; Minkina, 2017).

Саме тому використання розповсюджених видів урбанофлори дозволяє оцінювати рівень забруднення промислових агломерацій (Zupan et al., 2003; Лихолат, 2007; Braun et al., 2007; Mohamed et al., 2016). Акумулюючись в рослинах, сполуки важких металів призводять до зменшення їхнього асиміляційного потенціалу. На таку дію рослини відповідають пристосувальними реакціями, які забезпечують їх функціональну цілісність (Бессонова, 2006; Дідух, 2011; Stratu et al., 2016).

Актуальними є дослідження пристосування певних видів рослин до дії полутантів, що має як теоретичне значення – для подальшого розвитку екологічної фізіології рослин, так і практичне – для біоіндикації стану довкілля. Проте визначення особливостей накопичення важких металів та їх транслокації, можливостей використання фізіолого-біохімічних показників адаптації до умов існування й синантропних видів, зокрема *Taraxacum officinale* Wigg., в аутфітоіндикації та паліноіндикації в умовах Криворіжжя до сьогодні не розглядалось.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Дисертаційна робота виконана у Криворізькому ботанічному саду НАН України в 2013-2016 рр. у межах планових досліджень за держбюджетними темами "Роль антиоксидантних ферментних систем у формуванні адаптаційного синдрому рослин за сумісної дії ксенобіотиків та біологічні процеси трансформації сполук азоту в техногенних едафотопях" (№ державно реєстрації 0111U005106, 2011-2015pp.) і "Фізіолого-біохімічні і цитогенетичні особливості адаптації рослин до стресової дії важких металів та процеси біологічної мобілізації сполук карбону і нітрогену в техноземах" (державно реєстрації № 0116U003465, 2011-2015pp.) відділу фізіології рослин та біології ґрунтів.

Мета і завдання дослідження. Встановити аутоекологічні особливості *Taraxacum officinale* Wigg в умовах різного рівня забруднення та можливості їх використання у біоіндикації довкілля.

Для досягнення поставленої мети вирішували такі **завдання**:

- провести аналіз флористичної структури угруповань за участі *T. officinale* Криворізького урбопромислового комплексу;
- визначити екоморфічну структуру рослинних угруповань дослідних ділянок;
- оцінити рівні забруднення важкими металами едафотопів м. Кривий Ріг;
- встановити особливості транслокації важких металів в системі «грунт–рослина» на прикладі *T. officinale* в техногенних едафотопах;
- визначити тест-параметри стійкості *T. officinale* до дії важких металів за показниками інтенсивності процесів пероксидного окислення ліпідів та реакцією фотосинтетичних пігментів;
- проаналізувати особливості формування генеративної сфери *T. officinale* в умовах забруднення;
- визначити інформативні індекси для біоіндикації забруднення середовища важкими металами.

Об'єкт дослідження: аутоекологія *T. officinale* в умовах техногенного забруднення.

Предмет дослідження: еколого-фізіологічні особливості пристосування *T. officinale* до існування в умовах забруднення середовища важкими металами.

Методи дослідження. У роботі використані загальноприйняті геоботанічні методи дослідження рослинності. Для опису екологічних умов ділянок використовували метод екоморфічного аналізу рослинності О. Л. Бельгарда, для вивчення ґрунтів застосовували хіміко-аналітичні методи. Обробку та аналіз даних здійснювали статистичними методами.

Наукова новизна отриманих результатів.

Уперше:

- з'ясовано, що Zn є лідером по накопиченню як коренями, так і листовими пластинками на ділянках різного рівня забруднення;
- визначено, що накопичення коренями та листками Pb і Cd, відбувається диференційно в залежності від рівня забруднення ділянок;
- доведено, що високий рівень поліелементного забруднення довкілля спричинює активізацію процесів пероксидного окислення ліпідів;
- з'ясовано, що концентрація хлорофілу *a* зі збільшенням рівня забруднення зменшується нелінійно, а концентрація хлорофілу *b* різко зростає за умов незначного забруднення, але при більш високих рівнях аеротехногенного забруднення цей показник зменшується в порівнянні із контролем;
- встановлено, що високий рівень промислових викидів призводить до поступового збільшення на 50 % кількості стерильних пилових зерен;
- показано, що залежно від рівня забруднення зростає кількість морфологічно зміненого пилку, а за високого рівня поллютантів утворюється аномальна лінзоподібна форма пилових зерен;

- визначено, що рівень забруднення зумовлює зниження схожості сім'янок *T. officinale*, зменшення їх розмірів (або довжини і ширини насінини, або одного з цих показників), але суттєво не впливає на вагу насіння.

Удосконалено: методи біоіндикації довкілля.

Набули подальшого розвитку: отримані результати розширюють уявлення про механізми стійкості *T. officinale* в залежності від різного рівня стресового фактору.

Практичне значення отриманих результатів. Обґрунтовані в роботі кількісні характеристики адаптаційних можливостей *T. officinale* Wigg та оцінки толерантності до різного рівня забруднення навколишнього середовища важкими металами рекомендовані для використання як критерії біоіндикації стану довкілля. Для екологічного моніторингу та застосування у системі біоіндикації у якості інформативних критеріїв запропоновано використовувати палінологічні показники та особливості проростання насіння *T. officinale* Wigg.

Методичні підходи для дослідження еколого-фізіологічних особливостей функціонування та розвитку репродуктивної сфери *T. officinale* впроваджені в науково-дослідній та навчальній роботі у закладах вищої освіти: Криворізькому державному педагогічному університеті, Львівському національному університеті ім. І.Я. Франка, Дніпровському державному аграрно-економічному університеті. Матеріали дисертації використані Департаментом екології та природних ресурсів Дніпропетровської облдержадміністрації при розробці рекомендацій щодо оцінки забруднення ґрунтів у рамках Дніпровської обласної комплексної програми екологічної безпеки та запобігання змінам клімату на 2016–2025 рр.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є особистою науковою роботою здобувача, яка виконувалась впродовж 2013-2018 років. За тематикою роботи виконано інформаційний пошук та аналіз наукової літератури, самостійно опрацьовано методики дослідження, проведено відбір проб (матеріалу дослідження), їх підготовка до лабораторного дослідження та аналіз. Автором здійснено узагальнення отриманих даних, їх математичну обробку, формування висновків та практичних рекомендацій, підготовку публікацій за результатами досліджень. Розробку програми дослідження й основної гіпотези, аналіз та обговорення результатів виконано спільно з науковим керівником. Права співавторів у спільних публікаціях не порушено.

Апробація результатів дисертації. Матеріали досліджень доповідались на міжнародних і всеукраїнських конференціях: «Современное естествознание и охрана окружающей среды» (Курган, 2013), «Рослини та урбанізація» (Дніпропетровськ, 2013), «Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (Львів, 2014), «Біологічні дослідження – 2015» (Житомир, 2015), «Молодь і поступ біології» (Львів, 2015), «Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень» (Чернівці, 2015), «Біологія та екологія ґрунтів» (Львів, 2015), «Інтродукція рослин, збереження та збагачення біорізноманіття в ботанічних садах та дендропарках» (Київ, 2015), «Наукові основи збереження біотичної різноманітності» (Львів, 2015), «Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства» (Тернопіль, 2016), «Модернізація національної системи управління державним

розвитком: виклики і перспективи» (Тернопіль, 2016), «Шевченківська весна 2016: біологічні науки» (Київ, 2016), «Молодь: наука та інновації – 2017» (Дніпро, 2017), «Applied Biotechnology in Mining» (Dnipro, 2018), «Smart Bio» (Kaunas, Lithuania, 2018), «Екологічні дослідження лісових біогеоценозів степової зони України» (Дніпро, 2018).

Публікації. Основний зміст роботи відображено у 23 наукових публікаціях, із них 1 монографія, 4 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 2 – у наукових фахових виданнях України, 16 публікацій у матеріалах наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота викладена на 168 сторінках і складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, що включає 358 найменувань, з поміж них 85 латиницею. Робота містить 24 таблиці, 15 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ СТІЙКІСТЬ РОСЛИН В УМОВАХ ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНОГО СЕРЕДОВИЩА

У першому розділі систематизовано та узагальнено літературні дані про надходження сполук важких металів з промисловими викидами в атмосферне повітря та рівень їх акумуляції рослинами (Малахов, 2003). Проаналізовано сучасні уявлення про механізми поглинання та еколого-фізіологічні особливості пристосування рослин до дії забруднювачів (Жуйкова, 2014, Кордюм, 2003). Детально представлено інформацію про вплив важких металів на репродуктивні можливості трав'янистих та деревних рослин (Бессонова, 2013, Ібрагімова, 2007). Розглянуто сучасні підходи до оцінки стану навколишнього середовища з використанням педобіонтів і рослин та приділено особливу увагу методам біоіндикації стану навколишнього середовища (Дідух, 2012, Неверова, 2009, Глухов, 2008). На основі проведеного аналізу літературних джерел визначена необхідність дослідження флористичної структури угруповань за участю *T.officinale* на урбанізованих територіях та аутоекологічних особливостей виду з метою визначення специфіки його адаптації до умов різного рівня забруднення.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОБ'ЄКТУ ТА МЕТОДІВ

У розділі характеризуються ґрунтово-кліматичні умови Кривого Рогу та надається оцінка стану забруднення атмосферного повітря міста, як одного з основних екологічних чинників, який суттєво впливає на формування компонентів екосистем. Аналіз даних управління екології міської ради і міського управління статистики за 2010-2012рр. свідчить, що забруднення атмосферного повітря міста від стаціонарних джерел має значні обсяги, а викиди металів та їх сполук збільшилися в 1,5 рази і склали у 2012 р. 15,4 тис.т. Тому територія міста була розподілена на райони з високим рівнем забруднення (Металургійний район; загальний обсяг викидів (без врахування діоксину вуглецю) становив понад 102,4 тис.т на рік) де закладено дослідні ділянки 1-4 (рис. 1). У Довгинцевському і Покровському районах з обсягами викидів у межах 2,4 і 3,8 тис.т (помірний рівень забруднення) закладені ділянки 5 і 6 (рис. 1). У Саксаганському районі, з

найменшим обсягом викидів до 640 т (незначний рівень), закладено дослідні ділянки 7 і 8 (рис. 1). Умовний контроль (ділянка 9) розташована на відстані

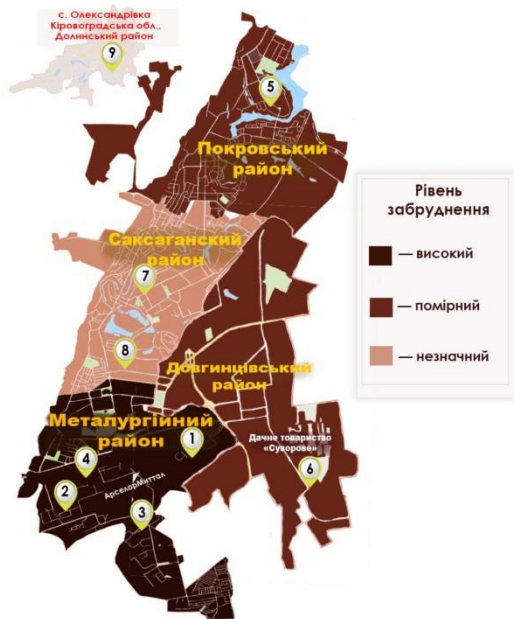


Рис. 1. Розташування дослідних ділянок

понад 50 км від промислових підприємств міста (на околиці с. Олександрівка Долинського району Кіровоградської обл.). Вивчення рослинного покриву проводили за загальноприйнятими методиками (Протопопова, 1992; Бельгард, 1950). Частку видів у рослинних угрупованнях оцінювали за шкалою Браун-Бланке (1985). Назви судинних рослин наводяться за зведенням Мосякіна та Федорончука (1999) з деякими уточненнями за Черепановим (1995).

Відбір ґрунтових проб, визначення актуальної і обмінної кислотності ґрунтових витяжок проводили потенціометрично, вміст гумусу здійснювали спектрофотометрично за методом Тюріна в модифікації Сімакова згідно (ДСТУ 4287:2004; ДСТУ 7537:2014, ДСТУ 4289:2004). Визначення валових форм важких металів та їх рухомих форм у ґрунті (амонійно-ацетатна витяжка рН 4,8) оцінювали за

загальноприйнятими методами (Методичні рекомендації ..., 1989; ДСТУ 4405:2005) на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С115 (Україна). Коефіцієнт транслокації елементів розраховували за Barman et al. (2000) і Gupta et al. (2008).

Кількість металів у рослинному матеріалі визначали після сухого озолення з використанням азотної кислоти (розведення 1:1) на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С115 (Україна). Вміст продуктів, що реагують з тіобарбітуровою кислотою (ТБК-активних продуктів), визначали за В. С. Камишніковим (2000), хлорофілів та каротиноїдів в екстракті диметилсульфоксиду — за методикою A.R. Wellburn (1994). Фертильність пилку *T. officinale* визначали у період масового цвітіння (перша половина травня) за гістохімічною реакцією з розчином Люголя (Паушева, 1988) на мікроскопі Мікромед-2. Ступінь дефектності пилку аналізували за С. С. Хохловим із співавт. (1978) і М. А. Нечкіною, В. С. Журковою (1997). Індекс стерильності (ІС) і коефіцієнт чутливості (КЧ) пилку до рівня забруднення території визначали за Е.Е. Ібрагімовою; палінотоксичний ефект (ПЕ) — за І.Н. Лозановською (1998).

Ультраструктуру поверхні пилкових зерен вивчали в центрі електронної мікроскопії та мікроаналізу Інституту ботаніки ім.М.Г.Холодного НАН України на СЕМ JEOL (JSM – 6060LA, Японія) за рекомендаціями Н. С. Снігірьовської і І. К. Ferguson (1970). Лабораторну схожість насіння *T. officinale* визначали згідно з Міжнародними правилами визначення якості насіння (1969). Морфометричні показники сім'янок вимірювали під мікроскопом МБС–10 за допомогою окуляр-мікрометра. Результати досліджень опрацьовували математично з використанням методів параметричної статистики на 95% рівні значущості.

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РОСЛИННОГО ПОКРИВУ ТА ЕДАФОТОПІЧНИХ УМОВ ТЕХНОГЕННИХ ЕКОТОПІВ КРИВОРІЗЬКОГО УРБОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

У складі рослинних угруповань дев'яти ділянок виявлено 91 вид, що належить до 77 родів та 26 родин. В угрупованнях рослин переважають види родини Asteraceae – *Achillea millefolium* L., *Ambrosia artemisiifolia* L., *Artemisia absinthium* L., *Hieracium virosus* L., *Senecio vernalis* L., *Taraxacum officinale* Wigg., *Tripleurospermum perforatum* (L.) W.D.J. Koch, частка яких у загальному проективному покритті становить від 20 до 90%. Встановлено, що на всіх ділянках родини Asteraceae, Fabaceae, Brassicaceae, Poaceae, Rosaceae, Apiaceae, Plantaginaceae, Salicaceae

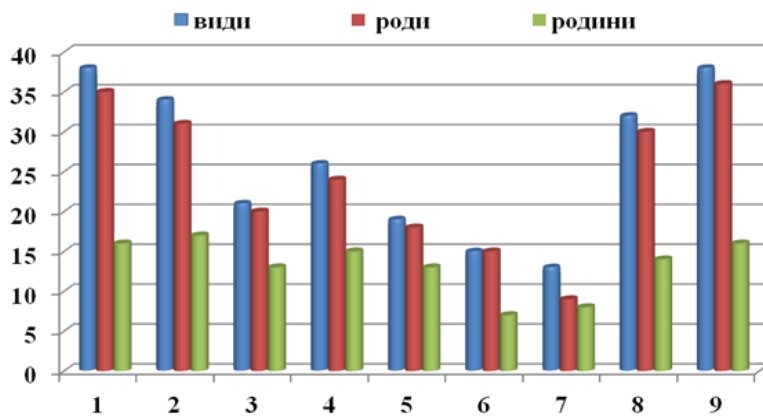


Рис. 2. Кількість видів, родів та родин рослинних угруповань: 1, ...9 – дослідні ділянки

представлені найбільшою кількістю видів. Крім трав'янистих видів, виявлено також деревні та кущові життєві форми – *Armeniaca vulgaris* Lam., *Rosa canina* L. (Rosaceae) та *Ulmus minor* Mill. (Ulmaceae), *Acer negundo* L. (Aceraceae), які розташовані по краю ценозу і суттєво не впливають на рівень інсоляції на ділянках. Найбільшим видовим різноманіттям характеризуються наступні дослідні ділянки (рис. 2): 1 –

41,8% від загальної кількості видів, які відносяться до 35 родів (45,5%) та 16 родин (61,54%); 2 – 34 види (37,4%), які відносяться до 31 роду (40,3%) та 17 родин (65,4%); 8 – 32 види (41,7%), які відносяться до 30 родів (38,9%) та 14 родин (53,9%). Найменша кількість таксонів встановлена для ділянок, які зазнають незначного (ділянки 5–6) або помірного (ділянки 7–8) рівня забруднення. Аналіз співвідношення таксонів на дослідних ділянках виявив, що насиченість родин видами збільшується від 1,46 (ділянка 5) до 2,38 (ділянки 1 та 9) (табл. 1).

Таблиця 1

Флористичні пропорції рослинних угруповань

Таксони	Дослідні ділянки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид/рід	1,09	1,10	1,05	1,08	1,06	1,00	1,44	1,07	1,06
Вид/родина	2,38	2,00	1,62	1,73	1,46	2,14	1,63	2,29	2,38
Рід/родина	2,19	1,82	1,54	1,60	1,38	2,14	1,13	2,14	2,25

За співвідношенням родів до родин для рослинних угруповань дослідних ділянок спостерігається наступна тенденція: від 1,13 (ділянка 7) до 2,25 (ділянка 9). Насиченість родів видами становить відповідно від 1,0 (ділянка 6) до 1,44 (ділянка 7). Спільні риси морфології, будови, розміщення в просторі, а також

певна відмінність екологічних умов обумовлюють існування на ділянках з різним рівнем забруднення рослинності, флористична подібність якої за коефіцієнтом Жаккара змінюється від 0,08 (ділянки 1-6) до 0,46 (ділянки 4-9). На нашу думку, це зумовлено гомогенним складом угруповання, що свідчить про високий рівень толерантності до забруднення рослин, які формують рослинний покрив Криворізького урбопромислового комплексу.

Екологічна характеристика рослинності дослідних ділянок за системою екоморф О. Л. Бельгарда (1950) виявила переважання певних екоморф в екоморфічних спектрах. Встановлено, що панівне положення серед ценоморф належить рудерантам (51,27% від загальної кількості видів) та степантам (21,61%) (рис. 3А). На ділянках високого рівня забруднення (1-4) також домінують рудеранти та степанти, окрім ділянки 3, де значно переважають сільванти (47,6%).

Кліматоморфічний спектр виявив кількісне переважання у складі рослинних угруповань гемікриптофітів (50% від загальної кількості видів) і терофітів (25,9%) (рис. 3В). Загалом на всіх ділянках переважають рослини, які на початку несприятливого періоду відмирають до рівня ґрунту або переживають його виключно у вигляді насіння.

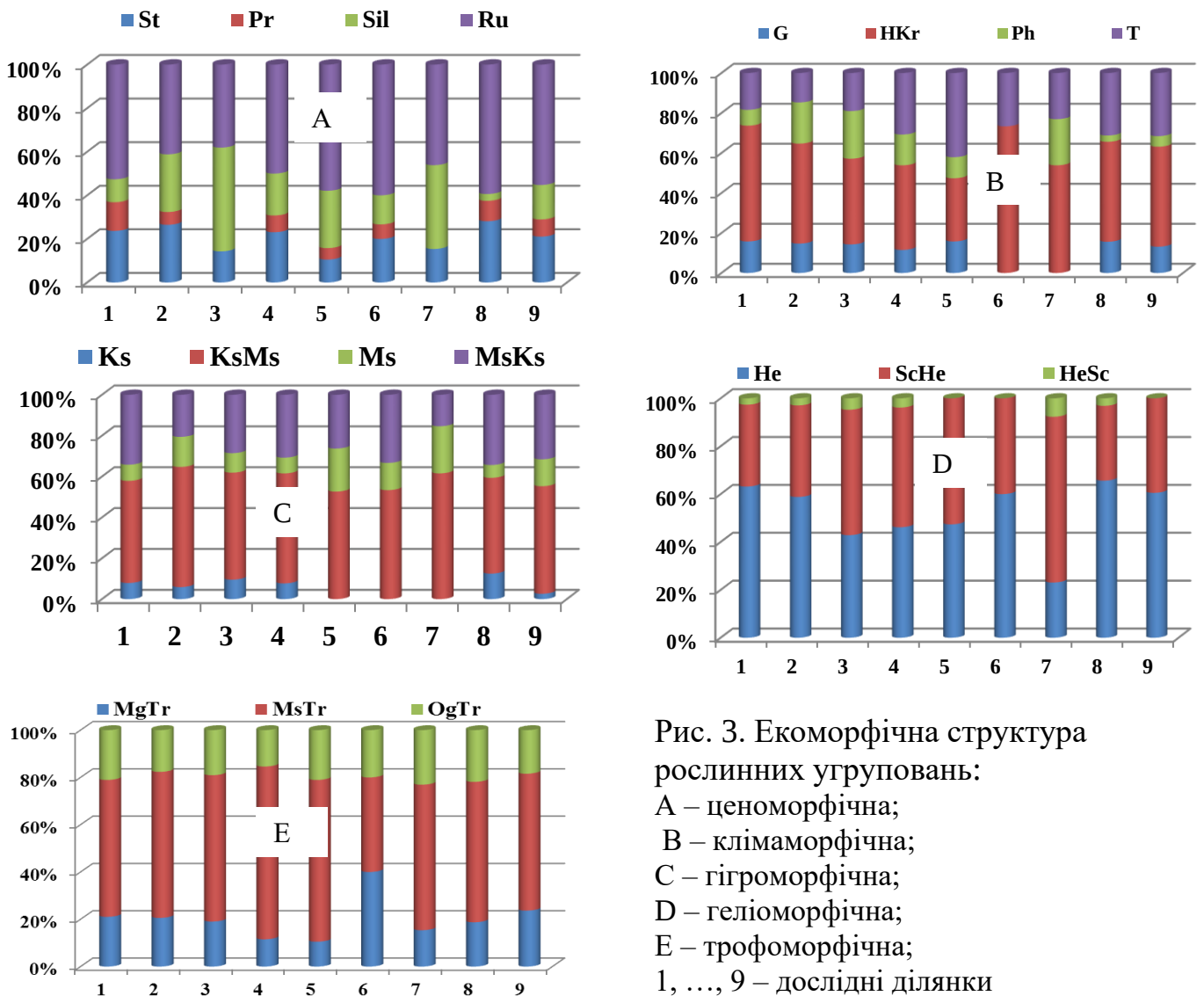


Рис. 3. Екоморфічна структура рослинних угруповань:

А – ценоморфічна;
 В – кліматоморфічна;
 С – гігроморфічна;
 Д – геліоморфічна;
 Е – трофоморфічна;
 1, ..., 9 – дослідні ділянки

Це один із дієвих фізіологічних механізмів збереження та збільшення чисельності видового складу на ділянках. Аналіз спектрів гігроморф виявив панівну роль перехідних форм від ксерофітів до мезофітів. Ксеромезофіти представлені майже 53% від загальної кількості рослин, а мезоксерофітів налічується 29,4% (рис. 3С). На ділянках 5-7 відсутні ксерофіти, а мезофіти представлені незначною кількістю (13% – 23%) видів.

Чисельність геліофітів (55,0% від загальної кількості видів) є найбільшою серед геліоморф всіх дослідних ділянок (рис. 3D). Серед трофоморф найчисельнішими є мезотрофи (60,6% від загальної кількості видів), мегатрофи і оліготрофи представлені в рівній кількості, а саме по 19 % (рис. 3Е). Таким чином, найчисельнішими екоморфами у складі фітоценозів дослідних ділянок з різним рівнем забруднення, є рудеранти, гемікриптофіти, ксеромезофіти, геліофіти і мезотрофи. Стабільною присутністю вирізняються степанти, сільванти, терофіти, мезофіти, мегатрофи та оліготрофи. Отже, аналіз екоморфічної структури угруповань за участю *T. officinale* вказує на їх подібність, що свідчить про відносно однотипні світлові та едафічні умови (окрім рівня забруднення), які створюються в дослідних техногенних екотопах.

Встановлено, що в ґрунтах ділянки умовного контролю серед металів І класу небезпеки найбільший уміст рухомих форм характерний для Zn (в середньому 16,17 мг/кг ґрунту), тоді як Pb і Cd менший у 7,5 і 23 рази, відповідно (табл. 2). Показано, що кількість рухомих форм по відношенню до валового вмісту була найбільшою для Cd, що може свідчити про специфіку його розподілу в чорноземі звичайному. Серед металів II класу небезпеки найбільше в ґрунті міститься Ni. У ґрунті дослідних ділянок, які безпосередньо межують з майданчиками промислових підприємств і знаходяться в зоні високого рівня забруднення (табл. 3) вміст Zn становить до 98,24 мг/кг, що є більшим серед елементів які контролюються нормативними актами (СанПіН 42-128-4433-87, 1987; Методические указания..., 1987).

Таблиця 2

Уміст рухомих форм важких металів в ґрунтах умовного контролю,
мг/кг ґрунту

Важкі метали	% до валового вмісту	Статистичні параметри			
		min	max	M± m	V%
І клас небезпеки					
Pb	5,3	0,45	1,40	0,82±0,04	16,99
Cd	33,8	0,14	0,38	0,26±0,04	24,06
Zn	10,5	14,16	18,27	16,17±0,44	18,27
II клас небезпеки					
Ni	6,1	1,58	2,06	1,44±0,03	14,26
Cu	18,7	0,40	0,60	0,56±0,06	18,41

Примітка: min – мінімальне значення; max – максимальне значення; M – середнє значення вибірки; m – абсолютна похибка середнього значення; V% - коефіцієнт варіації.

В умовах високого рівня забруднення Ni і Zn акумулюється в едафотопях в 8 і 6 разів більше, ніж в умовному контролі, тоді як Pb, Cu і Cd – в 31, 37 і 47 разів

відповідно, що може бути обумовлено як властивостями іонів самих елементів так і едафотопів. Причому максимальне перевищення ГДК (у 6,7 разів) встановлено для рухомих форм Cu, тоді як для Pb і Zn – у 4,3 рази, а Ni – 2,7 рази.

Таблиця 3

Уміст рухомих форм та їх відсоткове співвідношення до валових форм важких металів у ґрунті дослідних ділянок, мг/кг ґрунту

Рівень забруднення	Дослідні ділянки	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
Високий	1	$\frac{10,93 \pm 0,05^*}{80,6\%}$	$\frac{6,36 \pm 0,05^*}{15,5\%}$	$\frac{39,49 \pm 1,42^*}{55,1\%}$	$\frac{15,05 \pm 0,05^*}{13,1\%}$	$\frac{2,52 \pm 0,15^*}{35,4\%}$
	2	$\frac{6,62 \pm 0,18^*}{21,9\%}$	$\frac{18,01 \pm 0,55^*}{17,6\%}$	$\frac{98,24 \pm 16,61^*}{14,5\%}$	$\frac{19,88 \pm 0,24^*}{14,6\%}$	$\frac{8,11 \pm 0,19^*}{64,9\%}$
	3	$\frac{8,39 \pm 0,22^*}{24,5\%}$	$\frac{20,64 \pm 0,73^*}{15,8\%}$	$\frac{63,92 \pm 0,49^*}{25,5\%}$	$\frac{26,13 \pm 0,31^*}{15,0\%}$	$\frac{12,17 \pm 0,20^*}{42,6\%}$
	4	$\frac{6,87 \pm 0,02^*}{63,3\%}$	$\frac{6,38 \pm 0,22^*}{22,3\%}$	$\frac{34,01 \pm 2,67^*}{15,8\%}$	$\frac{25,5 \pm 0,60^*}{26,0\%}$	$\frac{1,65 \pm 0,16^*}{38,8\%}$
Помірний	5	$\frac{6,82 \pm 0,32^*}{39,9\%}$	$\frac{1,62 \pm 0,02^*}{9,5\%}$	$\frac{33,23 \pm 0,38^*}{21,3\%}$	$\frac{6,89 \pm 0,91^*}{25,3\%}$	$\frac{0,35 \pm 0,01}{31,8\%}$
	6	$\frac{2,29 \pm 0,11}{18,6\%}$	$\frac{2,84 \pm 0,70^*}{14,6\%}$	$\frac{20,58 \pm 2,67^*}{10,45\%}$	$\frac{3,37 \pm 0,88^*}{5,9\%}$	$\frac{0,23 \pm 0,17^*}{14,3\%}$
Незначний	7	$\frac{4,34 \pm 0,17^*}{41,7\%}$	$\frac{1,26 \pm 0,06^*}{13,9\%}$	$\frac{16,66 \pm 0,90^*}{25,9\%}$	$\frac{6,88 \pm 0,59^*}{22,4\%}$	$\frac{0,15 \pm 0,01^*}{27,8\%}$
	8	$\frac{4,58 \pm 0,08^*}{31,6\%}$	$\frac{1,37 \pm 0,12^*}{9,4\%}$	$\frac{40,32 \pm 3,36^*}{33,1\%}$	$\frac{2,47 \pm 0,65^*}{12,3\%}$	$\frac{0,17 \pm 0,01^*}{23,9\%}$

Примітка: чисельник – середня величина вмісту рухомих форм ВМ в ґрунтах; знаменник – відсоток кількості рухомих форм до валових; * - різниця достовірна з контролем, $P < 0,05$

У ґрунтах ділянок помірного і незначного забруднення також у 8 разів міститься більше Pb, Cu, а Zn і Ni – до 2 і 5 разів, відповідно, та Cd лише на 30% більше (помірний рівень), або на 35% менше (незначний), ніж в умовному контролі. Дослідження рухомих форм важких металів в ґрунтах ділянок високого і помірного рівня забруднення дозволяють сформулювати наступний ряд елементів за їх вмістом: $Cd < Ni < Cu < Pb < Zn$. Аналізуючи отримані результати вмісту рухомих форм важких металів та їх відсотку до валового вмісту в едафотопіях високого рівня забруднення, можна констатувати, що найсуттєвіше підвищення відсотку рухомих форм зафіксоване для Ni, Cd і Zn (81; 64 і 55), тоді як Cu і Pb було до 26%.

АКУМУЛЯЦІЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ РОСЛИНАМИ *T. officinale* ЗА РІЗНОГО РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ В СИСТЕМІ «ҐРУНТ – РОСЛИНА»

Встановлено, що у вегетативних органах *T. officinale* за умов різного рівня атмосферного забруднення накопичення токсикантів вище, ніж за умов контролю (табл. 4). Винятком є лише накопичення коренями Cu на дослідних ділянках 4 та 8,

де зафіксовано незначне зниження концентрації цього елементу в порівнянні із контролем.

Таблиця 4

Уміст важких металів у коренях *Taraxacum officinale*, мг/г

Дослідна ділянка	Е л е м е н т				
	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
1	5,70±0,67*	2,49±0,06*	52,83±1,04*	3,14±0,22*	8,03±0,39*
2	6,92±0,17*	2,59±0,06*	75,10±0,018*	4,87±0,55*	9,38±0,52*
3	8,86±0,39*	2,92±0,50*	70,58±5,06*	4,81±0,33*	7,67±0,06*
4	5,58±0,56*	0,44±0,06	47,52±2,29*	3,62±0,22*	8,14±0,02*
5	3,89±0,32*	0,68±0,07*	13,67±0,68*	1,99±0,36	2,31±0,22*
6	4,45±0,29*	0,60±0,07	12,02±1,47*	1,72±0,63	2,75±0,12*
7	2,25±0,47*	0,63±0,06*	16,54±1,10*	1,48±0,14*	2,11±0,30*
8	2,80±0,19*	0,46±0,04	15,05±1,43*	2,08±0,16*	3,27±0,55*
9	2,44±0,23	0,49±0,02	7,66±0,12	1,34±0,07	1,08±0,49

Примітка: * - різниця достовірна з контролем, $P < 0,05$.

Накопичення Cu відбувається вибірково коренями та листковими пластинками. На дослідних ділянках з високим рівнем забруднення зафіксовано перевищення вмісту Cu в коренях рослин у 6 разів, на ділянках 5 та 7 у 1,5 рази (табл. 4). По накопиченню зазначеного елементу листковими пластинами спостерігаємо іншу тенденцію. Максимальне перевищення концентрації у 36 разів зафіксовано на ділянці 2. Встановлено, що більш активне накопичення Ni відбувалось коренями в порівнянні з листками рослин. Так, на ділянці 3 (високий рівень забруднення) зафіксовано збільшення елементу в 4 рази у порівнянні із контролем, а на ділянках з незначним і помірним рівнями забруднення – до 2 разів.

Таблиця 5

Уміст важких металів у листках *Taraxacum officinale*, мг/г

Дослідна ділянка	Е л е м е н т				
	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
1	5,92±0,94	10,31±0,18*	33,82±0,71*	5,28±0,40*	0,47±0,04*
2	9,04±0,38*	24,97±1,79*	23,20±0,89*	7,74±0,43*	0,54±0,11*
3	3,07±0,11*	10,44±0,38*	42,92±1,19*	7,18±0,21*	0,81±0,04*
4	4,19±0,51	2,70±0,64*	56,56±2,15*	4,51±0,72*	0,40±0,05*
5	4,56±0,25	5,25±0,06*	66,01±1,41*	3,84±0,82*	0,34±0,02*
6	9,78±0,73*	7,40±0,29*	50,98±1,75*	2,15±0,05*	0,27±0,04
7	12,27±1,49*	8,19±0,55*	56,40±1,61*	3,63±0,63*	0,26±0,10
8	7,66±1,03*	1,35±0,16	25,10±1,42*	2,72±0,46*	0,37±0,04*
9	4,11±0,47	0,70±0,38	8,05±2,00	0,68±0,16	0,22±0,02

Примітка: * - різниця достовірна з контролем, $P < 0,05$.

Аналіз розподілу Ni в листових пластинах виявив незначне його накопичення в рослинах на ділянках з високим рівнем забруднення – від 9,04±0,38мг/г до 4,19±0,51мг/г (табл. 5) в порівнянні з ділянками помірного і незначного рівня

забруднення; де накопичення в листках збільшується від 2 до 3 разів у порівнянні із контролем (табл. 5). Таким чином, підвищене фоліарне накопичення Ni рослинами *T. officinale* зафіксовано на ділянках з меншим рівнем забруднення.

Аналізуючи дані щодо вмісту Zn, відмічаємо, що даний елемент є абсолютним лідером по накопиченню як коренями, так і листовими пластинками. На ділянках з помірним і незначним рівнем забруднення виявлено статистично закономірне підвищення накопичення Zn від 3 до 8 разів (табл. 5). На ділянці 2 зафіксовано зростання концентрації елементу у 3 рази в порівнянні з ділянкою умовного контролю, але й у 2 рази менше порівняно з рослинами на ділянках з помірним рівнем забруднення. Отримані дані є аналогічними до даних по накопиченню Ni і свідчать про фоліарне поглинання у рослин *T. officinale* на ділянках з помірним та незначним забрудненням.

Результати дослідження по накопиченню Pb та Cd продемонстрували іншу залежність для листових пластинок та аналогічну для коренів щодо металів другого класу небезпеки (табл. 5). Корені, в порівнянні з умовним контролем, акумулюють Pb більше в 1,5 рази на ділянках незначного рівня та до 3,5 разів на ділянках високого рівня забруднення, а листові пластинки *T. officinale* на ділянках високого рівня (1 та 4) – від 7 до 11 разів. Отримані дані розподілу Cd відображають чітку градацію між ділянками з різним рівнем забруднення. Збільшення акумуляції коренями Cd на ділянках із високим рівнем забруднення знаходиться в межах від 8 до 9 разів у порівнянні з ділянкою умовного контролю та до 3 разів у порівнянні з ділянками незначного рівня забруднення. Вміст Cd у листових пластинках *T. officinale* закономірно підвищується на ділянках з високим рівнем забруднення порівняно із контролем.

Таким чином, процеси накопичення важких металів першого та другого класів небезпеки мають певні закономірності. Лідером накопичення як у коренях, так і в листових пластинках є Zn. Особливості акумуляції мікроелементів можна відобразити в рядах убутання (табл. 6). Наявність зв'язку між накопиченням важких металів коренями та листками *T. officinale* Wigg з різних ділянок за рівнем забруднення дозволяє використовувати даний вид у фітоіндикації.

Таблиця 6

Ряди убутання накопичення важких металів вегетативними органами рослини
Taraxacum officinale

Рівень забруднення	Дослідна ділянка	Ряди накопичення важких металів	
		Корені	Листки
Високий	1	Zn>Cd>Ni> Pb>Cu	Zn>Cu>Ni>Pb>Cd
	2		
	3		
	4		
Помірний	5	Zn>Ni>Cd>Pb> Cu	Zn>Cu= Ni>Pb>Cd
	6		
Незначний	7	Zn>Ni=Cd>Pb> Cu	Zn>Ni>Cu=Pb>Cd
	8		
Умовний контроль	9	Zn>Ni>Pb>Cd>Cu	Zn>Ni>Pb=Cu>Cd

Для *T. officinale* були розраховані транслокаційні коефіцієнти важких металів для бар'єрного блоку «грунт – корені рослин» (рис. 4). Міцний антиконцентраційний бар'єр як у контролі, так і за умов забруднення

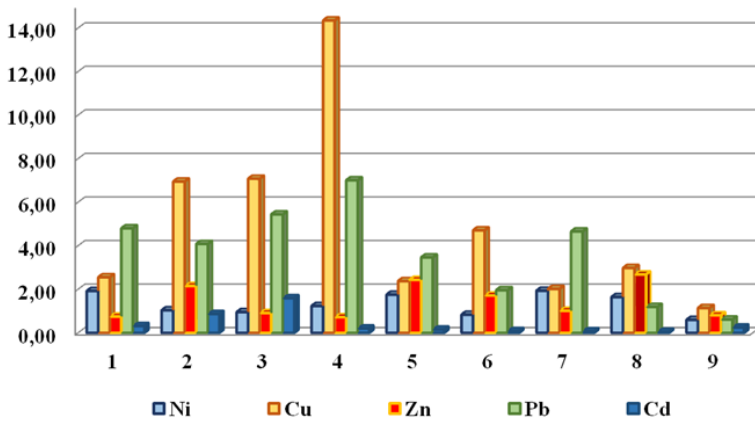


Рис. 4. Значення коефіцієнту транслокації в системі «грунт – корені рослин» для рослин *Taraxacum officinale*: 1, ...9 – дослідні ділянки

інтенсивності транслокації іонів Zn із ґрунту в корені. На ділянках з високим рівнем забруднення зафіксовано міцний бар'єр, окрім ділянки 2, де зафіксовано показник із значенням 2,15. Чіткого бар'єрного ефекту на ділянках з помірним та незначним рівнями забруднення не зафіксовано. Для Ni інтенсивність транслокації із ґрунту до коренів практично однакова на всіх ділянках, окрім контролю та ділянки 6, де спостерігається бар'єрний ефект (рис. 4).

Обговорюючи отримані результати по пересуванню важких металів від кореня до листка, констатуємо відсутність бар'єрного ефекту для Cd на всіх пробних ділянках, Zn на ділянці 2 та Ni на ділянці 3 (рис. 5).

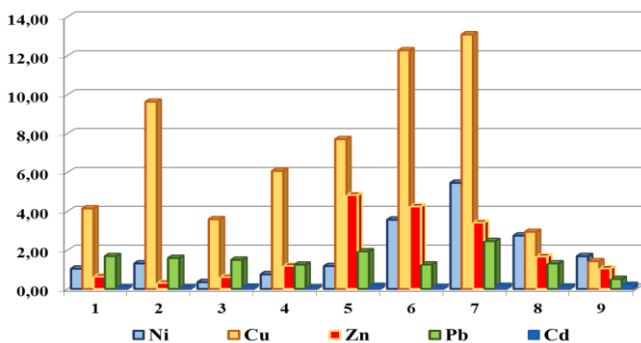


Рис. 5. Значення коефіцієнту транслокації в системі «корінь - листок» для рослин *Taraxacum officinale* (по вісі абсцис – номер дослідної ділянки; по вісі ординат – значення коефіцієнту транслокації)

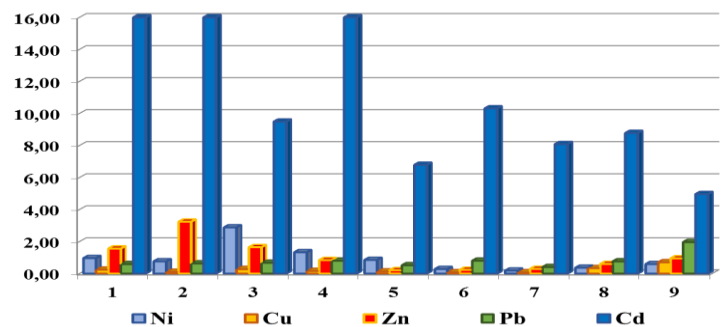


Рис. 6. Значення коефіцієнту транслокації в системі «листок – корінь» для рослин *Taraxacum officinale* (по вісі абсцис – номер дослідної ділянки; по вісі ординат – значення коефіцієнту транслокації)

Крім того, для умовного контролю значення коефіцієнту для Pb були на рівні 1,96, що можна розглядати як гіперакумуляцію. Всі інші елементи на ділянках з різним рівнем забруднення мали підвищену інтенсивність функціонування бар'єрного механізму в системі «корінь-листок» (рис. 5).

Отримані дані щодо розрахунку транслокаційних коефіцієнтів у системі «листок-корінь» демонструють наявність міцного антиконцентраційного бар'єру для Cd, який характерний для рослин на різних дослідних ділянках (рис. 6).

Висока активність бар'єрного ефекту на ділянках з високим рівнем забруднення зафіксована для Zn та Ni. Для всіх інших елементів на дослідних ділянках встановлена гіперакумуляція елементів за рахунок зниження інтенсивності функціонування бар'єрного механізму «листок-корінь» (рис. 6).

Транслокація Ni відбувається безбар'єрно в системі «листок-корінь» на ділянках помірного та незначного рівнів забруднення. У системі «корінь-листок» фіксуємо міцний антиконцентраційний бар'єр нікеля. За високого рівня забруднення транслокаційні режими Pb знаходяться у діапазоні від деконцентратора до макроконцентратора. При переході Cu із кореня в листок існує міцний бар'єр. Такий бар'єр відсутній при транслокації Cu із ґрунту в корінь та із листка до кореня. Особливістю Zn та Cd є їхня безбар'єрна міграція при усіх рівнях забруднення.

ФІЗІОЛОГО – БІОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АДАПТАЦІЇ РОСЛИН *T. OFFICINALE* ДО РІЗНОГО РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ

Мінімальна ферментативна активність зафіксована в умовному контролі. За активної акумуляції важких металів у листках суттєво, статистично достовірно, підвищується концентрація ТБК-активних сполук. Так, на ділянках з високим рівнем забруднення спостерігається збільшення показників до 3 разів, що складає від $8,28 \pm 0,84$ до $9,20 \pm 1,54$ нмоль/г наважки (табл. 7).

Таблиця 7

Уміст ТБК-активних сполук у надземній частині рослин *T. officinale* за різного рівня забруднення, нмоль/г сирової речовини

Рівень забруднення	Дослідні ділянки	Статистичні показники			
		M $\pm$ m	V, %	% контр	T _{st}
Високий	1	9,13 $\pm$ 0,50	9,5	289,4	7,70
	2	8,97 $\pm$ 1,50	29,0	284,6	3,60
	3	9,20 $\pm$ 1,54	29,1	291,7	3,65
	4	8,28 $\pm$ 0,84	17,5	262,6	5,00
Помірний	5	6,67 $\pm$ 0,57	14,7	211,7	4,29
	6	6,80 $\pm$ 1,47	37,3	215,6	2,31
Незначний	7	5,11 $\pm$ 1,19	40,4	162,1	1,47
	8	5,34 $\pm$ 0,24	7,8	169,4	3,42
Умовний контроль	9	3,15 $\pm$ 0,59	32,6	-	-

Зростання активності понад 200% від умовного контролю простежується і на ділянках з помірним рівнем забруднення. Але існує суттєва різниця між

зазначеними ділянками, що проявляється у зниженні на них інтенсивності процесів пероксидного окиснення ліпідів у 1,5 рази. Для з'ясування залежності між ферментативною активністю та інтенсивністю накопичення листовими пластинками важких металів, було розраховано коефіцієнт кореляції. Фіксуємо наявність у більшій мірі обернених, ніж прямих зв'язків. Серед металів першого класу небезпеки лише для Zn зафіксовано міцний обернений кореляційний зв'язок ($r \geq -0,99$) на більшості ділянок. Для Pb та Cd обернена залежність є середньою ($r \geq -0,50$) або слабкою ($r \geq -0,20$). На ділянках з незначним і помірним рівнем кореляційний зв'язок вищий у порівнянні із високим рівнем забруднення. Таким чином, спостерігається тісний обернений зв'язок між інтенсивністю утворення ТБК-активних продуктів та активністю накопичення важких металів без чіткої обумовленості рівнем забруднення.

Встановлене закономірне зниження вмісту хлорофілу в листках рослин на ділянках з високим рівнем забруднення (табл. 8). Вміст хлорофілів *a* і *b* у листках рослин *T. officinale* достовірно різниться із контролем. Найменший вміст хлорофілу *a* (0,86 мг/г сирої маси) зафіксовано у рослинах на ділянці 4. Такі дані аналогічні із даними на ділянках з помірним рівнем забруднення, а саме 5 та 6 (табл. 8). На ділянках з незначним рівнем виявлено зниження вмісту хлорофілу *a* до 1,5 разів у порівнянні із контролем і відносно ділянок з високим рівнем його кількість також зменшилась у 1,5 рази. Встановлено особливу реакцію хлорофілу *b* на забруднення. Зокрема, спостерігається збільшення до 2 разів його вмісту у листках на ділянках з незначним рівнем забруднення, що становить від 0,74 до 0,72 мг/г відповідно для дослідних ділянок 7 та 8 на противагу 0,47 мг/г в умовному контролі (табл. 8). На ділянках з високим та помірним рівнями забруднення чіткої закономірності зниження чи збільшення даного пігменту не відмічено. Таким чином, концентрація хлорофілу *a* зі збільшенням рівня забруднення зменшується нелінійно. При незначному та помірному рівні забруднення зменшення вмісту цього пігменту відбувається у середньому на 44,6%, а при сильному рівні забруднення відбуваються компенсаторні явища так, що зменшення складає тільки 31,9%.

Таблиця 8

Уміст фотосинтетичних пігментів у листках рослин *T. officinale* за різного рівня забруднення, мг/г сирої речовини

Рівень забруднення	Дослідні ділянки	Chl _a	Chl _b	Car	Chl _a /Chl _b	Chl _{a+b}	Chl _{a+b} /Car
Високий	1	1,41±0,06	0,43±0,04	0,26±0,08	3,54	1,66	6,51
	2	1,47±0,05	0,27±0,01	0,27±0,05			
	3	1,43±0,26	0,43±0,20	0,27±0,21			
	4	0,86±0,11	0,34±0,01	0,21±0,02			
Помірний	5	0,89±0,08	0,29±0,04	0,30±0,04	2,65	1,28	4,96
	6	0,96±0,01	0,42±0,01	0,23±0,02			
Незначний	7	1,11±0,05	0,74±0,06	0,42±0,07	1,60	1,91	4,05
	8	1,25±0,11	0,72±0,07	0,53±0,02			
Умовний контроль	9	1,90±0,19	0,47±0,07	0,54±0,12	4,01	2,37	4,39

Концентрація хлорофілу *b* зростає за умов незначного забруднення, але при більш високих рівнях аеротехногенного забруднення цей показник зменшується від контрольного рівня на 22,7 %.

Концентрація каротиноїдів при незначному рівні забруднення не відрізняється від контролю, а при більш високих рівнях забруднення різко знижується у середньому на 52,5%. Найбільш чутливим індикатором рівня аеротехногенного забруднення є індекс Chl_{a+b}/Car , який збільшується зі збільшенням рівня забруднення. Отже, фотосинтетична система рослин *T. officinale* виявляє високу чутливість до урботехногенних чинників, відповідно зміни кількісного складу фотосинтетичних пігментів можна віднести до неспецифічних інтегральних біоіндикаційних ознак анротехногенного забруднення довкілля.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ГЕНЕРАТИВНОЇ СФЕРИ *T. OFFICINALE* В УМОВАХ ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА МОЖЛИВІСТЬ ЇЇ ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ БІОДІАГНОСТИКИ

Реакція чоловічого гаметофіту на техногенне навантаження середовища

Певна інтенсивність забруднення у *T. officinale* спричинює суттєвий вплив на життєздатність пилку (рис. 7). Так, у рослин найбільша кількість нежиттєздатного пилку (50,4%) утворюється на ділянці 1, на інших дослідних ділянках з високим рівнем забруднення кількість фертильного пилку була до 5% вищою (табл. 9). За помірного рівня забруднення утворюється в середньому на 10% менше стерильного пилку, ніж при високому і його кількість не перевищує 40%. В умовах незначного рівня забруднення рослини *T. officinale* формують від 17 до 24% стерильних пилкових зерен, тоді як в умовному контролі кількість життєздатного пилку перебільшує 85% (табл. 9).

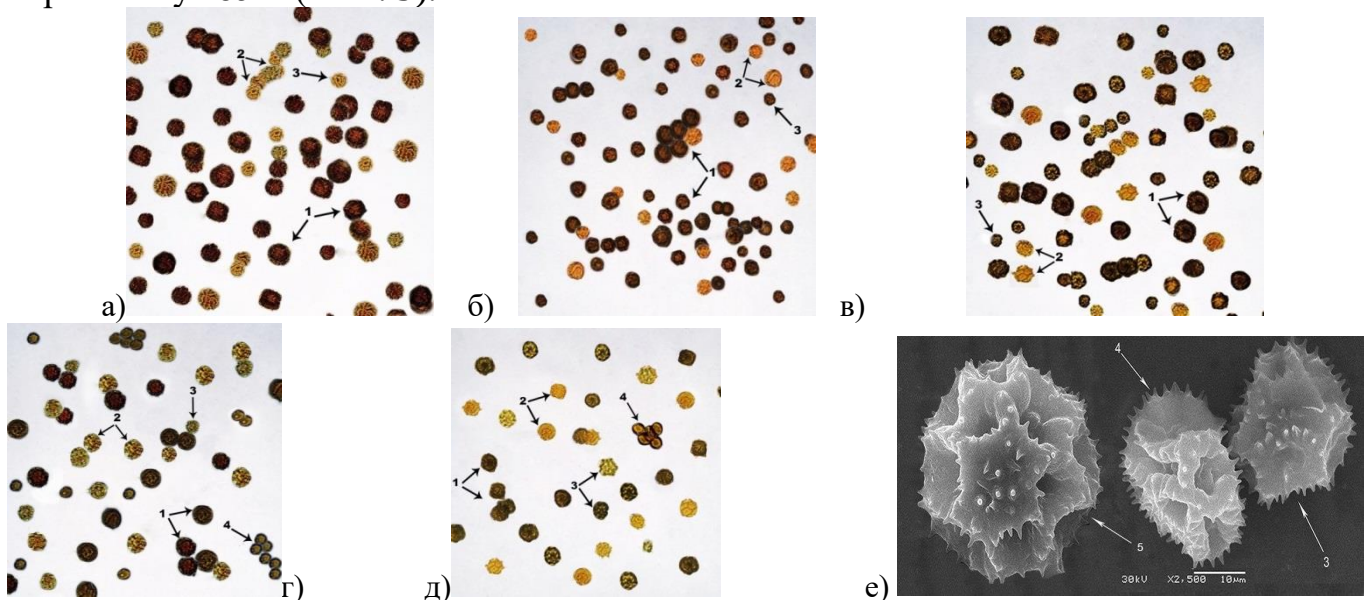


Рис. 7. Життєздатність та морфологічна будова пилкових зерен *Taraxacum officinale* в зонах з різним рівнем техногенного навантаження: а) дослідна ділянка 9; б) дослідна ділянка 8; в) дослідна ділянка 7; г) дослідна ділянка 1; д) дослідна ділянка 3; е – ультраструктура поверхні пилкових зерен; 1 – фертильні зерна; 2 – стерильні зерна; 3 – морфологічно змінені; 4 – лінзовидні; 5 – вигляд пилкового зерна в нормі.

Додатковим показником гаметоцидного впливу забруднення слугує й кількість морфологічно змінених пилкових зерен. Наприклад, при високому рівні забруднення у рослин *T. officinale* такого пилку формується 31-44% від кількості життєздатного, тоді як при помірному – до 25, незначному – 10, а в умовному контролі – не перевищує 7% (рис. 7).

Лінзовидна форма абортівного пилку спостерігається лише при сильному рівні забруднення (рис 7 г, д). За результатами досліджень в умовному контролі рівень спонтанної стерильності пилку не перевищує 15% (табл. 9).

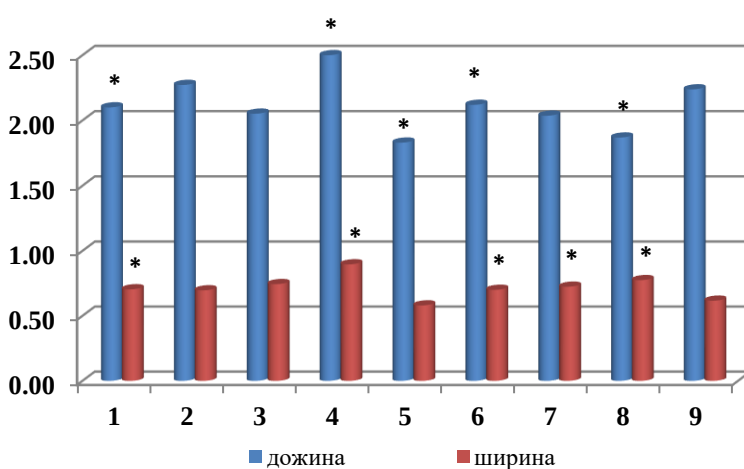
Таблиця 9

Показники чутливості пилкових зерен *T. officinale* до рівня забруднення атмосфери

Рівень забруднення	Дослід-на ділянка	ІС	КЧ	ПЕ	% фертильних пилкових зерен	% стерильних пилкових зерен	% індукованого забрудненням стерильного пилку
Високий	1	2,54	1,75	53,38	49,64	50,36	35,61
	2	3,27	2,83	49,01	51,41	48,59	33,81
	3	2,38	2,10	47,52	55,14	44,86	30,11
	4	2,91	1,78	45,61	53,49	46,51	31,76
Помірний	5	1,94	2,76	43,78	62,44	37,56	22,81
	6	1,93	1,49	42,67	63,18	36,82	22,07
Незначний	7	1,71	4,44	20,34	77,26	22,74	7,99
	8	1,00	6,96	27,21	83,25	16,75	2,0
Умовний контроль	9	–	9,53	–	85,51	14,75	-

Примітка: ІС – індекс стерильності; КЧ – коефіцієнт чутливості, ПЕ – палінотоксичний ефект.

Кількість індукованого стерильного пилку зростає в залежності від рівня забруднення з 9% при незначному рівні до 36% – при високому. Аналіз даних розрахунку коефіцієнта чутливості (КЧ), індекса стильності (ІС), палінотоксичного ефекту (ПЕ), за якими оцінюють чутливість чоловічого гаметофіту, свідчить, що в умовах Криворіжжя для рослин *T. officinale* доцільніше використовувати два останніх показники, як більш інформативні.



Вони підвищуються пропорційно з рівнем забруднення. Тоді як для коефіцієнта чутливості відмічається відсутність чіткого розмежування між високим та помірним рівнями забруднення.

Рис. 8. Морфометричні показники сім'янок *Taraxacum officinale*, мм, * - достовірна різниця з умовним контролем.

Отже, за високого рівня промислових викидів поступово збільшується кількість стерильних (до 50 %) і морфологічно змінених пилкових зерен. За високого рівня зафіксовано утворення лінзоподібної аномальної форми.

Зменшення кількості фертильного пилку із зростанням рівня забруднення збільшує частку нежиттєздатних сім'янок. Висока чутливість чоловічого гаметофіту *T. officinale* до атмосферного забруднення проявляється у збільшенні абортівного пилку, що впливає на формування життєздатного насіння. Цей процес також гальмує проростання пилку, що ускладнює запліднення в умовах забруднення.

Більш суттєвих змін зазнали значення довжини сім'янок, ніж показники ширини. У рослин *T. officinale* з дослідних ділянок 1-3 формувались сім'янки ширина яких була на 17% більшою, тоді як на ділянках 7-8 – на 20-45% (рис. 8). Дещо інші закономірності зафіксовані у зміні довжини сім'янок. Так, на дослідних ділянках 3, 7 та 8 сім'янки у *T. officinale* були на 9 – 17% меншими за довжиною, ніж в контролі. У рослин з ділянки 4 довжина сім'янок збільшувалась на 13%, а на ділянках 1 та 2 формувались сім'янки, які не відрізнялися за довжиною від умовного контролю (рис. 8).

Доведено, що в умовах незначного рівня забруднення рослини *T. officinale* утворюють насіння, вага якого не відрізняється статистично достовірно від умовного контролю. Зменшення ваги насіння супроводжується зменшенням його розмірів (або довжини або ширини насінини). Найлегше насіння сформувалося на ділянці 3, де різниця між вагою 1000 насінин у порівнянні з умовним контролем становила 155,6 мг, тоді як на інших – не перевищувала 80 мг (табл. 10).

Таблиця 10

Вага 1000 насінин *Taraxacum officinale*, мг

Дослідна ділянка	$M \pm m$	V, %	t_{st}	% до контролю
1	532,6 $\pm$ 21,3	13,30	3,25	87,5
2	526,43 $\pm$ 17,7	12,64	4,01	87,6
3	456,7 $\pm$ 31,2	25,53	4,65	74,7
4	586,2 $\pm$ 33,8	17,04	0,73	95,4
5	443,7 $\pm$ 28,2	18,53	3,65	72,4
6	513,7 $\pm$ 20,2	15,53	3,85	83,2
7	614,3 $\pm$ 13,6	5,43	0,11	100,7
8	528,1 $\pm$ 33,2	24,60	2,38	87,3
9	612,3 $\pm$ 12,1	6,47	—	—

Примітка: М – середнє значення вибірки; m – абсолютна похибка середнього значення; V, % – коефіцієнт варіації; t_{st} – коефіцієнт Стюдента.

Формування меншого за вагою насіння, у випадках коли зміни зазначених морфометричних показників не зафіксовано (на дослідній ділянці 2), можна пояснити специфічними змінами складу запасних речовин.

На ділянках високого рівня забруднення зафіксовано статистично достовірне зниження схожості сім'янок *T. officinale* (табл. 11).

Схожість сім'янок *Taraxacum officinale*, %

Дослідна ділянка	$M \pm m$	V, %	t_{st}	% до контролю
1	52,8±2,7	22,63	9,52	56,5
2	65,4±2,6	18,00	6,66	70,0
3	42,0±2,2	23,08	12,96	44,9
4	62,8±2,9	20,84	6,96	67,24
5	55,8±2,5	23,14	5,46	59,74
6	53,6±2,3	18,84	4,96	57,39
7	95,4±3,5	16,93	0,42	102,1
8	83,2±3,6	19,52	2,09	89,0
9	93,4±3,3	16,85	—	—

Примітка: M – середнє значення вибірки; m – абсолютна похибка середнього значення; V% – коефіцієнт варіації; t_{st} – критерій Стюдента.

Найсуттєвіше зниження схожості (на 55%) зафіксовано на ділянці 3. У рослин на моніторингових ділянках із незначним рівнем забруднення спостерігалось зменшення схожості сім'янок до 10% (ділянка 8) або вона суттєво не відрізнялась від контролю (ділянка 7).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вивчено особливості накопичення важких металів та їх транслокації у синантропного виду *T. officinale* Wigg. за дії стресових екологічних чинників в умовах м. Кривий Ріг, проаналізовано фізіолого-біохімічні та палінологічні особливості аутоекології виду в умовах забруднення довкілля важкими металами. Отримано такі основні наукові результати:

1. У складі рослинних угруповань за участі *T. officinale* Wigg Криворізького урбопромислового комплексу виявлено 91 вид, які належать до 77 родів та 26 родин. Найбільш часто зустрічаються представники таких родин, як Asteraceae, Fabaceae, Brassicaceae, Poaceae, Rosaceae, Apiaceae, Plantaginaceae, Salicaceae. Видова насиченість рослинних угруповань варіює від 13 до 38 видів. За флористичним складом угруповання дослідних ділянок з різним рівнем забруднення є подібними, що свідчить про високий рівень толерантності до забруднення рослин, які формують рослинний покрив в Криворізькому урбопромисловому комплексі.

2. Екологічну структуру рослинних угруповань Криворізького урбопромислового комплексу створюють рудеранти (51,27% від загальної кількості видів) та степанти (21,61%). У складі рослинних угруповань переважають гемікриптофіти (50% від загальної кількості видів) і терофіти (25,9%). У аспекті преференцій до водного режиму найчисельнішими є ксеромезофіти (53% від загальної кількості рослин) та мезоксерофіти (29,4%). В угрупованнях домінують геліофіти (55,0%) та мезотрофи (60,6%).

3. Незначний рівень забруднення середовища супроводжується значним підвищенням вмісту в ґрунті таких важких металів, як Ni, Cu, Zn, Pb. Статистично вірогідне підвищення вмісту кадмію відбувається при помірному та більш значних

рівнях забруднення. Значне перевищення валового вмісту важких металів у ґрунті, а саме Cu, Zn, Pb та Cd є особливістю високого рівня забруднення. Незначний рівень забруднення позначається на рухомості важких металів, що проявляється у збільшенні частки рухомих форм таких елементів як Ni, Cu, Zn, Pb. Суттєве збільшення рухомих форм відбувається при високому рівні забруднення, що найбільшою мірою проявляється для Ni та Cd.

4. Коефіцієнти транслокації для Ni свідчать про безбар'єрне його надходження в рослину *Taraxacum officinale* в системі «листок-корінь» на ділянках помірного та незначного рівнів забруднення. У системі «корінь-листок» встановлений міцний антиконцентраційний бар'єр нікеля. В умовах високого рівня забруднення транслокаційні режими Pb знаходяться у діапазоні від деконцентратора до макроконцентратора. При переході Cu із кореня в листок існує міцний бар'єр. Такий бар'єр відсутній при транслокації Cu із ґрунту в корінь та із листка до кореня. Особливістю Zn та Cd є їх безбар'єрна міграція при усіх рівнях забруднення.

5. Концентрація хлорофілу *a* зі збільшенням рівня забруднення зменшується нелінійно. При незначному та помірному рівні забруднення зменшення вмісту цього пігменту відбувається на 44,6 %, а при сильному рівні забруднення відбуваються компенсаторні явища так, що зменшення складає тільки 31,9 %. Концентрація хлорофілу *b* різко зростає за умов незначного забруднення, але при більш високих рівнях аеротехногенного забруднення цей показник зменшується в порівнянні з контрольною ділянкою на 22,7 %.

6. Концентрація каротиноїдів при незначному рівні забруднення не відрізняється від контролю, а при більш високому суттєво знижується на 52,5%. Найбільш чутливим індикатором аеротехногенного забруднення є індекс Chl_{a+b}/Car , який збільшується з підвищенням рівня забруднення.

7. Мінімальний вміст ТБК-активних сполук зафіксовано в умовному контролі. За активної акумуляції важких металів у листках *T. officinale* їх концентрація підвищувалась до 3 разів. Встановлено наявність тісних обернених кореляційних зв'язків між акумуляцією важких металів та концентрацією ТБК-активних сполук. Найвищий коефіцієнт кореляції ($r \geq -0,99$) виявлено між концентрацією ТБК-активних сполук та Zn.

8. Встановлена висока чутливість чоловічого гаметофіту *T. officinale* до атмосферного забруднення, яка проявляється у збільшенні абортівного пилку та впливає на формування життєздатного насіння. Високий рівень промислових викидів призводить до поступового збільшення кількості стерильних (до 50 %) і морфологічно змінених пилкових зерен. За високого рівня зафіксовано утворення лінзоподібної аномальної форми. Рівень забруднення суттєво не впливає на вагу насіння *T. officinale*, але призводить до зменшення його розмірів (довжини і ширини насінини, або одного з цих показників).

9. В умовах Криворіжжя найінформативнішими для біоіндикації забруднення доцільно використовувати індекс стерильності та палінотоксичний ефект пилку *T. officinale*.

Список публікацій здобувача в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографія:

1. Е. О. Євтушенко, В. І. Шанда, В. М. Савосько, Я. В. Маленко, Н. В. Ворошилова, Н. В. Гнілуша, В. В. Качинська, О. О. Кобрюшко, **І. О. Комарова**, Є. В. Поздній, С. О. Марченко Структура та розвиток культурфітоценозів Криворіжжя: монографія / за ред. Е.О. Євтушенка, В.М. Савоська. – Кривий Ріг: Діонат, 2017. – 168 с. (*Особистий внесок: аналіз літературних даних щодо структури та стану трав'янистих та деревно-чагарникових культурфітоценозів Криворіжжя, написання та оформлення розділу монографії*).

Публікації у наукових фахових виданнях, які включені до міжнародних наукометричних баз

2. **Komarova I.** *Taraxacum officinale* as bioindicator of heavy metal accumulation in soil Danish Scientific Journal (DSJ) Istedgade 1041650 København V Denmark, №8/2018. – p. 10 – 12. (site: <http://www.danish-journal.com>). (IIJIF, DIIIF, Scientific Indexing Services).

3. **Сіліч (Комарова) І. О.** Вміст важких металів у рекреаційних та промислових зонах Криворіжжя // Ґрунтознавство: науковий журнал. – Дніпропетровський національний університет, 2013. – Випуск 14, № 3–4. – С. 35-42. (**Index Copernicus**).

4. Гришко В.М. **Сіліч (Комарова) І. О.** Деякі особливості формування насіння *Taraxacum officinale* Wigg. в умовах різного рівня забруднення // Вісник Львівського національного університету. Серія біологічна, 2014. – Випуск 69. – С. 45 – 56. (*Здобувачем проведено експериментальну роботу, аналіз та обговорення результатів досліджень*). (**Thomson Scientific Master Journal List**).

5. **Сіліч (Комарова) І. О.** Буферні властивості ґрунтів як показник забруднення важкими металами едафотопів Криворізької урбоекосистеми / Агроекологічний журнал: науково – теоретичний журнал НААН інститут агроекології і природокористування, 2015. – Вип. 4. – С. 65 – 69. (**Index Copernicus, Journals Master List, Citefactor**).

Публікації у наукових фахових виданнях України

6. **Комарова І. О.** Особливості функціонування рослинного організму в урботехногенній екосистемі (аналіз стану проблеми) / Питання біоіндикації та екології. – Запоріжжя: ЗНУ, 2015. – Вип. 20, № 2. – С. 18 – 29.

7. Гришко В. М., **Комарова І. О.** Біоіндикація атмосферного забруднення за реакцією пилкових зерен *Taraxacum officinale* F.H.Wigg (на прикладі м. Кривий Ріг) / ScienceRise: Scientific Journal, 2016. – № 5 (22). – С. 15-20. (*Здобувачем проведено експериментальну роботу, аналіз та обговорення результатів досліджень*).

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. **Сіліч (Комарова) І. О.** Фитомониторинг состояния окружающей среды техногенно нагруженного региона (на примере г. Кривой рог) / Современное естествознание и охрана окружающей среды // труды Международной молодежной конференции (г. Курган, 20 сентября 2013г.). – Курган: из-во Курганского гос. Ун-та, 2013. – С. 50 – 51.

9. **Сіліч (Комарова) І. О.,** Кузьменко В. Г. Моніторинг стану едафотопу м. Кривий Ріг (на прикладі двох районів міста) / Рослини та урбанізація // Матеріали третьої міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 19–20

березня 2013р.). – Дніпропетровськ: ТОВ ТВГ «Куніца», 2013. – С. 19 – 21. (Здобувачем проведено експериментальну роботу, аналіз та обговорення результатів досліджень).

10. **Сіліч (Комарова) І. О.** Кузьменко В. Г. Залежність фітотоксичності ґрунту від його буферних властивостей // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: Матеріали 3-го Міжнародного конгресу (Львів, 17 – 19 вересня 2014 року). – ЛНУ, 2014. – с. 32 – 33. (Здобувачем проведено експериментальну роботу, аналіз та обговорення результатів досліджень).

11. **Сіліч (Комарова) І. О.** Деякі особливості формування насіння *Taraxacum officinale* Wigg в умовах Криворізької урбоекосистеми / Біологічні дослідження – 2015 // Збірник наукових праць. – Житомир: ПП «Рута», 2015. – С. 293-297.

12. **Сіліч (Комарова) І. О.** Пилковий аналіз *Taraxacum officinale* Wigg в умовах Криворізької урбоекосистеми / Молодь і поступ біології // Збірник тез XI Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів (м. Львів, 20 – 23 квітня 2015р.). – Львів: СПОЛОМ, 2015. – С. 229-230.

13. **Комарова І. О.** Насіннева продуктивність *Taraxacum officinale* Wigg в умовах криворізької урбоекосистеми / Регіональні аспекти флористичних і фауністичних досліджень // Матеріали другої міжнародної науково-практичної конференції (24–25 квітня 2015 року смт Путила, Чернівецька область). – Чернівці «Друк Арт», 2015. – С. 124 – 126.

14. **Комарова І. О.** Регіональні особливості накопичення рухомих форм важких металів у ґрунтах на території м. Кривий Ріг / Біологія та екологія ґрунтів // Матеріали наукової конференції (14-16 жовтня 2015 р. м. Львів), - Львів, 2015. – С. 75 – 77.

15. **Комарова І. О.** Використання *Taraxacum officinale* Wigg для біоіндикації рівня забруднення навколишнього природного середовища / Інтродукція рослин, збереження та збагачення біорізноманіття в ботанічних садах та дендропарках // Матеріали Міжнародної наукової конференції (15-17 вересня 2015 р. м. Київ). – Київ, 2015. – С. 104-106.

16. **Комарова І. О.** Морфометричні особливості насіння *Taraxacum officinale* Wigg. в умовах Криворізької урбоекосистеми / Наукові основи збереження біотичної різноманітності // Матеріали I (XII) Міжнародної конференції молодих учених (21-22 травня 2015р. м. Львів). – Львів, 2015. – С. 184 – 187.

17. **Комарова І. О.** Фітотоксична оцінка стану едафотопу Криворізької урбоекосистеми / Екологія і природокористування в системі оптимізації відносин природи і суспільства // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (24-25 березня 2016р. м. Тернопіль). – Тернопіль: Крок, 2016. – С. 89 – 91.

18. **Комарова І.** Біоіндикація техногенного забруднення довкілля за фізіологічними реакціями *Taraxacum officinale* Wigg // Модернізація національної системи управління державним розвитком: виклики і перспективи: Матеріали II Міжнародної наук.-практ. Конференції (Тернопіль, 8–9 грудня 2016 р.) Ч. 1. – Тернопіль : Крок, 2016. – 198 с.

19. **Комарова І. О.** Біоіндикація рівня забруднення за реакцією репродуктивних структур *Taraxacum officinale* Wigg / Шевченківська весна 2016:

біологічні науки // Матеріали XIV Міжнародної наукової конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (6-8 квітня 2016р. м. Київ). – Київ, 2016. – С.111 – 112.

20. **Комарова І.** Особливості функціонування фотосинтетичної системи рослин *T. officinale* в умовах дії важких металів / Молодь: наука та інновації – 2017 // Матеріали V Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених (28-29 листопада 2017 року м. Дніпро). – Дніпро.: ДВНЗ НГУ, 2017. – С. 25-26.

21. **Komarova Irina** Heavy metal accumulation in roots of *Taraxacum officinale* Wigg // Applied Biotechnology in Mining: Proceedings of the International Conference (April 25-27, 2018, Dnipro). – Dnipro: National Technical University «Dnipro Polytechnic», 2018. – P 91.

22. Komarova Irina Bioindication of environmental condition of mining region by photosynthesis pigment content of *Taraxacum officinale* Wigg / Smart Bio // 2 ND International Conference (03-05 May 2018, Kaunas, Lithuania). – Kaunas, 2018. – P. 302-303.

23. **Комарова І.** *Taraxacum officinale* як біоіндикатор акумуляції важких металів в ґрунті / Екологічні дослідження лісових біогеоценозів степової зони України // Матеріали II Міжнародної наукової конференції (м. Дніпро, 14–15 листопада 2018 р.). – Дніпро: Ліра, 2018. – С. 33 – 35.

АНОТАЦІЯ

Комарова І. О. Еколого–біологічні особливості *Taraxacum officinale* Wigg за дії забруднення важкими металами в умовах промислового Криворіжжя –

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.16 «екологія». – Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара МОН України, Дніпро, 2019.

Уперше в умовах міста Кривий Ріг, а саме промислового забруднення від підприємств гірничо-металургійного комплексу, оцінено особливості та специфіку транслокації важких металів в системі «ґрунт–рослина» на прикладі *Taraxacum officinale* Wigg. Проаналізовано специфіку акумуляції важких металів рослинами з ґрунту і подальшу транслокацію до листків в системі «ґрунт–корінь», «корінь–листок». Доведено, що високий рівень поліелементного забруднення докільля спричинює активізацію процесів пероксидного окислення ліпідів. З’ясовані особливості розвитку генеративної сфери *T. officinale* в умовах різного рівня забруднення. Оцінено можливості генеративної сфери *T. officinale* в залежності від різного рівня стресового фактору.

Результати вивчення адаптаційних можливостей *T. officinale* до різного рівня забруднення важкими металами навколишнього середовища можуть бути використані як критерії біоіндикації стану довкілля. Встановлено, що зміни палінологічних показників є інформативними критеріями для екологічного моніторингу та системи біоіндикації. Особливості проростання насіння може бути використано для розробки рекомендацій щодо оцінки рівня забруднення ґрунтів важкими металами.

Ключові слова: *Taraxacum officinale* Wigg, рослинні угруповання, техногенне забруднення, гірничо-металургійний регіон, стійкість, пилок, фотосинтезуючі пігменти, ПОЛ, транслокація важких металів.

АННОТАЦІЯ

Комарова І. А. Еколого-біологічні особливості *Taraxacum officinale* Wigg при дії важких металів в умовах промислового Криворіжжя. Кваліфікаційна наукова робота. На правах рукопису.

Дисертація на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 03.00.16 «экология». - Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара Министерство образования и науки Украины, Днепр, 2019.

В условиях техногенной нагрузки при неблагоприятных климатических условиях степной зоны актуальным является изучение ответных реакций живых организмов и механизмов их устойчивости к воздействию различных факторов антропогенного происхождения. В этом аспекте тяжелые металлы рассматриваются как один из важнейших факторов техногенного загрязнения, поскольку эти элементы способны к аккумуляции в различных компонентах экосистем. В частности, их избыток приводит к нарушению стабильности и устойчивости структурно-функциональных свойств почв. Аккумулируясь в растениях, соединения тяжелых металлов приводят к уменьшению ассимиляционного потенциала. Сейчас проблема действия такого фактора особенно остро стоит на территориях с развитой горно-металлургической промышленностью. Поэтому вполне обоснованным является выбор г. Кривой Рог, как одного из важных промышленных центров Украины.

В последние годы приоритетным направлением является разработка системы биологических показателей для мониторинга окружающей среды. Важными критериями для этого могут быть показатели аккумуляции поллютантов видами-индикаторами, адаптации растений на физиологическом уровне. Не теряет важности и изучение процессов транслокации тяжелых металлов, их участие в почвенных барьерных механизмах при загрязнении едафотопов. Поэтому крайне актуальными являются исследования адаптационной способности определенных видов растений к действию поллютантов, что имеет как теоретическое значение - для дальнейшего развития экологической физиологии растений, так и практическое - для биоиндикации состояния окружающей среды. Однако выяснение особенностей накопления тяжелых металлов и их транслокации в синантропных видах, в частности *Taraxacum officinale* Wigg., в условиях Криворіжжя до сих пор не рассматривались.

По результатам работы определены особенности транслокации тяжелых металлов в системе «почва-растение» на примере *Taraxacum officinale* Wigg. Проанализирована специфика аккумуляции тяжелых металлов растениями из почвы и последующая транслокация к листьям в системе «почва-корень», «корень-лист». Доказано, что высокий уровень полиэлементного загрязнения окружающей среды вызывает активизацию процессов перекисного окисления липидов. Установлены особенности развития генеративной сферы *T. officinale* в условиях разного уровня загрязнения. Оценены возможности семенного воспроизводства *T. officinale* в зависимости от разного уровня стрессового фактора. Установлено, что изменения

палинологических показателей являются информативными критериями для экологического мониторинга и системы биоиндикации. Особенности прорастания семян могут быть использованы для разработки рекомендаций по оценке уровня загрязнения почв тяжелыми металлами.

Результаты изучения адаптационных возможностей *T. officinale* к разному уровню загрязнения тяжелыми металлами окружающей среды используются Департаментом экологии и природных ресурсов Днепропетровской облгосадминистрации в рамках Днепропетровской областной комплексной программы экологической безопасности в качестве критериев биоиндикации состояния окружающей среды.

Ключевые слова: *Taraxacum officinale* Wigg, растительные сообщества, техногенное загрязнение, горно-металлургический регион, устойчивость, пыльца, фотосинтезирующие пигменты, ПОЛ, транслокация тяжелых металлов.

SUMMARY

Komarova I.O. Ecological-biological features of *Taraxacum officinale* Wigg to the action of heavy metals in the conditions of industrial Kryviy Rih -Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a candidate degree in biological sciences by specialty 03.00.16 "Ecology". - Dniprovsky National University named after. Oles Gonchar, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2019.

For the first time in the conditions of the city of Kryviy Rih, namely industrial pollution from the enterprises of the mining and metallurgical complex, the peculiarities and specifics of heavy metals translocation in the soil-plant system were evaluated on the example of *Taraxacum officinale* Wigg. The specifics of the accumulation of heavy metals by plants from the soil and the subsequent translocation to the leaves in the system "soil-root", "root-leaf" system are analyzed. It has been proved that high level of polyelemental contamination of the environment causes activation of lipid peroxide oxidation processes. The peculiarities of development of generative sphere *T. officinale* in the conditions of different level of pollution are revealed. Possibilities of seed reproduction of *T. officinale* depending on different level of stress factor are estimated.

The results of the detection and study of adaptation possibilities of *T. officinale* to different levels of pollution by heavy metals in the environment can be used as criteria for bioindicating the state of the environment. It was established that changes in palynological indices are informative criteria for ecological monitoring and the system of bioindication. The features of seed germination can be used to develop recommendations for assessing the level of soil contamination by heavy metals.

Key words: *Taraxacum officinale* Wigg, plant groups, industrial pollution, mining and metallurgical region, resistance, pollen, photosynthesis pigments, POL, heavy metal translocation.

Підписано до друку 10.09.2019р.
Формат 60×84/16. Ум.др.арк. 1,5
Папір офсетний 80г\м²
Тираж 100 прим. Замовлення № 10-09/19-2

Видавець ФО-П Чернявський Д. О.
пр. 200 річчя Кривого Рога, 17, (зуп. «Спаська»),
тел.: (067)46-46-102, (067)562-40-21
Свідоцтво ДК 3449 від 02.04.2009р.
www.dionat.com

издательство
Дионат