

CHAPTER «AGRICULTURAL SCIENCES»

REDUCING THE RISKS OF HEAVY METALS CONTAMINATION OF CEREAL PLANT PRODUCTS IN THE ZONE OF TECHNOGENESIS INFLUENCE

ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ЗАБРУДНЕННЯ ЗЕРНОВОЇ РОСЛИННОЇ ПРОДУКЦІЇ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕНЕЗУ

Oleksandr Vinyukov¹

Olga Bondareva²

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-562-4-6>

Abstract. Pollution of agricultural landscapes with heavy metals has led to a disruption of the ecological balance, which primarily affects the soil and plants, since they are the main accumulators of toxicants. *The purpose* of the paper is to determine ways to reduce the risks of contamination of grain plant products with heavy metals in the zone of technogenesis influence. The research was conducted in the field crop rotation of the Donetsk state agricultural research station of the NAAS of Ukraine during 2021–2023. *Methodology* of the study is based on general research methods and methodological recommendations in crop production. Research methods: field, laboratory, mathematical and statistical. *Results.* Selection of spring barley and winter wheat varieties resistant to the accumulation of heavy metals make it possible to obtain high-quality grain in industrial regions. The coefficient of biological absorption of zinc varies for winter wheat and spring barley within 0.52–0.97 and 0.61–0.99, respectively. For copper,

¹ Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Director,
Donetsk State Agricultural Science Station
of the National Academy of Agrarian Sciences, Ukraine

² Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Scientific Secretary,
Donetsk State Agricultural Science Station
of the National Academy of Agrarian Sciences, Ukraine

this indicator has a value of 0.54–0.86 for winter wheat and 0.41–0.59 for spring barley. The coefficient of biological absorption of cadmium and lead is almost 5–6 times lower. In terms of the intensity of the transition from soil to plants of winter wheat and spring barley, the elements are arranged in the order $Zn > Cu > Cd > Pb$. Changes in hydrometeorological conditions affect the content of mobile forms of heavy metals in the soil and their translocation into grain. With increasing moisture availability, a tendency was observed for the content of the mobile form copper to increase, the content of lead under these conditions practically did not change. In conditions of excessive moisture, the content of cadmium in grain, an element of the first hazard class, increases by 40%. Polymyxobacterin in complex use with stimulants Humisol-plus and Vermistim exhibits a protective effect against lead and cadmium. When using Polymyxobacterin, the accumulation of lead in winter wheat grains decreased by 2.3 times, cadmium – by 1.8 times. The use of Vermistim provided almost the same effect: the biological absorption coefficient for lead was 0.10, for cadmium – 0.12, the lead content decreased by 1.8 times, cadmium – by 1.6 times. Under the conditions of seed inoculation with microhumin, the lead content in spring barley grain decreased by 21.6%, cadmium – by 22.9% compared to the control. Spraying of vegetative plants with potassium humate against the background of pre-sowing treatment of seeds with microhumin increases the resistance of plants to heavy metals. In this variant, the lowest accumulation of heavy metals – zinc, lead and cadmium in grain products was found. Compared to the control, the zinc content in spring barley grain decreased by 8.2%, lead – by 29.7%, cadmium – by 31.3%. *Practical implications.* We can recommend the winter barley varieties Donetsk 48, Vezha, Belosnezhka, Igrista and the spring barley varieties Donetsk 14, Stepovik, Shchedryk, Rezerv as resistant to the accumulation of heavy metals in technogenic regions. *Value/originality.* It has been experimentally established that the use of microbial preparations for pre-sowing seed treatment and spraying of winter wheat and spring barley crops with plant growth regulators ensures an increase in crop productivity and a reduction in the risks of contamination of grain plant products with heavy metals in the industrial region.

1. Вступ

Сучасні агроландшафти часто підпадають під вплив різних джерел забруднення, особливо в індустріальних регіонах, що веде до порушення екологічної рівноваги. Головними акумуляторами токсикантів являються важкі метали (ВМ), які в першу чергу впливають на ґрунт та рослини.

За темпами накопичення в біосфері та рівнем токсичності, важкі метали становлять найбільшу небезпеку для середовища і відносяться до найбільш токсичних ксенобіотиків, тому що загрожують здоров'ю людини. Вони забруднюють ґрунти, змінюючи його агрохімічні, мікробіологічні, екологічні властивості [1].

Серед забруднювачів ґрунту такі важкі метали як кобальт, мідь, кадмій, нікель, свинець, цинк (Co, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn) вирізняються особливим екологічним та біологічним впливом [2–10]. Важкі метали добре адсорбуються орним шаром ґрунту, накопичуються в продуктах харчування та в живих організмах. Особливістю сполук цих елементів є стійкість і зберігання токсичних властивостей упродовж тривалого часу, накопичення в сільськогосподарських культурах.

Аналіз результатів іноземних та вітчизняних досліджень щодо заходів по зменшенню нагромадження важких металів зерновими колосовими культурами в зонах техногенного навантаження свідчить, що важливого значення набуває широке використання біопрепаратів. Нові екологічні стимулятори росту та мікробіологічні препарати здатні регулювати процеси життєдіяльності рослин та ґрунтової мікрофлори [11]. При цьому за мінімальних витрат істотно поліпшуються умови росту і розвитку рослин, підвищується їх продуктивність, покращується якість врожаю.

Науковці відзначають високу ефективність використання гумінових препаратів, які утворюють хелатні комплекси гумусових кислот з важкими металами, що знижує їх рухливості [12–20]. Встановлено, що при відновленні деградованих ґрунтів вугільні гумати діють як меліоранти та детоксиканти в умовах забруднення важкими металами [12].

Застосування сульфат гумат амонію (СГА) значно знизило кількість ВМ в орному горизонті 0-20см: кількість Zn зменшилась з 2,75 мг/кг до 2,00 мг/кг, Ni – з 1,25 до 0,75 мг/кг, Co – з 1,75 до 0,75 мг/кг, Cd – з 0,30 до 0,20 мг/кг, Рb – з 0,75 до 0,60 мг/кг [14].

Внесення ефективних мікроорганізмів у ґрунт сприяє фіксації атмосферного азоту, перетворенню недоступної форми фосфору у доступну, покращенню розкладання залишків рослин для вивільнення поживних речовин, що підвищує продуктивність агроєкосистем, зменшує концентрацію важких металів у ґрунті. За даними науковців [15, 16] обробка насіння Ризоторфином дозволила зменшити вміст рухомих форм Cd в 1,16 рази, в зерні сої Zn – в 1,10 рази. Застосування для обробки насіння препарату Ризоторфин в поєднанні з препаратом Агрика суттєво зменшило вміст Pb в зерні – в 1,67 рази. Передпосівна обробка насіння поєднанням препаратів Ризоторфин і Гумариз снизила вміст рухомих форм у ґрунті Pb в 1,26 рази, а також вміст у зерні Cu – в 1,48 рази, Cd – в 1,12 рази. Таким чином, найбільш ефективним для зниження акумуляції важких металів особливо високотоксичних свинцю і кадмію було поєднання для інокуляції біологічно активних препаратів Ризоторфина з Агрикою и Ризоторфина з Гумаризом.

Застосування препаратів Граундфікс®, Органік-баланс® та Липосам® на провапнованих фонах знижувало темпи міграції ВМ в системі «ґрунт – рослина»: свинцю на 1,0–4,3, кадмію на 0,1–0,4, цинку на 1,6–138 мг/кг сухої речовини вегетативної маси відповідно [17].

Вивчення питання застосування гумінових і мікробних препаратів для зниження накопичення важких металів в зерні сільськогосподарських культур потребує дослідження на регіональному рівні. Пошук заходів покращення якості зернової продукції в зонах реального техногенного забруднення залишається актуальним. Для забезпечення стабільної ефективності мікробного препарату і біостимуляторів необхідно дотримання високої культури землеробства [19–21].

Дослідження проводились на дослідних ділянках Донецької державної сільськогосподарської дослідної станції НААН (Волноваський район Донецької області). Площа облікової ділянки – 62,7 м², повторність – триразова. Розміщення ділянок систематичне. Ґрунт – чорнозем звичайний малогумусний важкосуглинковий. Обробіток ґрунту і технологія вирощування зернових культур загальноприйняті в господарствах області. Під передпосівну культивуацію сівалкою СН-16 вносили мінеральні добрива. Врожай збирали комбайном Сампо-500 по ділянках.

Основний метод досліджень – польовий, доповнений аналітичними дослідженнями, вимірами, підрахунками і спостереженнями відповідно до загальноприйнятих методик та методичних рекомендацій у рослинництві [22].

Мета роботи – визначити шляхи зниження ризиків забруднення важкими металами зернової продукції в зоні впливу техногенезу.

2. Вплив сортового фактору на біоаккумуляцію важких металів в зерні пшениці озимої і ячменю ярого

Для одержання екологічно безпечного зерна в індустріальних регіонах важливим є використання сортів, які характеризуються мінімальним накопиченням ВМ. Толерантність рослин до ВМ пов'язана з активізацією в них комплексу захисних механізмів, серед яких виділяють зовнішні, які не пов'язані з життєдіяльністю рослинного організму, і внутрішні, котрими володіє сама рослина. Отже, урахування сортового фактору може забезпечити зменшення нагромадження важких металів в рослинах.

Дослідження проводились на сортах пшениці озимої і ячменю ярого.

У Степу пшениця озима – основна зернова колосова культура завдяки її високій продуктивності. Другою культурою за продуктивністю і посівними площами є ячмінь ярий, часто він використовується для пересіву озимих культур. Ці культури є визначальними у виробництві зерна і продовольчій безпеці країни. В Донецькій області вони займають понад 60% посівних площ.

Для визначення більш стійких сортів до поглинання хімічних елементів проведено аналітичне вимірювання вмісту цих токсикантів в зерні пшениці озимої (табл. 1) і зерні ячменю ярого різних сортів (табл. 2). Дослідні ділянки були в зоні впливу енергетичного виробництва Курахівської ТЕС.

Вміст важких металів в зерні сортів пшениці, що досліджувались, не перевищував ГДК, але за експериментальними результатами виявлено значне варіювання по елементам і сортам. Особливо це стосується таких небезпечних важких металів як свинець і кадмій. Рівень накопичення важких металів в зерні пшениці озимої залежить від генетичних особливостей сорту і властивостей елементу.

Вміст цинку змінюється в межах 0,39–0,72 часток ГДК. Максимальне накопичення цинку 36,0 мг/кг було характерне для сорту Юзовська. Мінімальний вміст цинку 19,4 мг/кг був в зерні сорту Росинка.

Мідь накопичувалась в зерні від 0,43 до 0,68 часток ГДК.

Вміст свинцю в зерні знаходився в межах 0,13–0,33 мг/кг. Найбільш чутливим до поглинання свинцю (0,66 часток ГДК) був сорт Попелюшка. Мінімальне накопичення свинцю відмічене для сортів Донецька 48, Перемога, Білосніжка, Вежа, Ігриста.

Вміст кадмію в зерні пшениці озимої змінювався від 0,03 мг/кг до 0,08 мг/кг, тобто 0,3 і 0,8 часток ГДК. Із табл. 1 видно, що найменшим вмістом кадмію характеризувались сорти Краплина, Вежа, Богиня, Донецька 48, Ігриста, Білосніжка. Максимальний вміст кадмію виявлено у сорту Росинка (0,8 часток ГДК).

Таблиця 1

Вміст ВМ в зерні пшениці озимої (2021–2023 рр.)

Сорт пшениці озимої	Урожайність, т/га	Вміст важких металів, мг/кг			
		Cu ГДК=10	Zn ГДК=50,0	Pb ГДК=0,5	Cd ГДК=0,1
Донецька 48	8,18	4,3	33,5	0,16	0,03
Олексіївка	8,77	6,3	29,2	0,20	0,06
Перемога	8,48	4,8	25,6	0,14	0,07
Білосніжка	6,24	5,5	26,8	0,13	0,04
Попелюшка	7,20	5,9	29,0	0,33	0,07
Богиня	8,64	6,6	20,9	0,18	0,04
Краплина	7,35	5,8	26,5	0,30	0,03
Юзовська	8,92	4,7	36,0	0,21	0,07
Ігриста	8,33	5,1	27,8	0,16	0,04
Вежа	8,08	4,3	25,6	0,14	0,03
Традиція	6,55	4,6	26,6	0,22	0,05
Росинка	7,40	6,8	19,4	0,25	0,08
НІР _{0,5}	0,51	0,98	2,2	0,09	0,01
Коефіцієнт варіації, %		16,4	14,5	30,5	36,0

Розраховані коефіцієнти варіації вмісту важких металів в зерні пшениці озимої свідчать, що найбільша залежність від сорту характерна для кадмію, коефіцієнт варіації становить 36,0%. Дещо менша

ступінь залежності від сорту виявлена для накопичення свинцю, коефіцієнт варіації 30,5%. Накопичення цинку по сортам пшениці озимої характеризується найбільшою стабільністю, коефіцієнт варіації має саме низьке значення 14,5 %, таким чином, накопичення цинку в зерні пшениці озимої має найменшу залежність від сорту в порівнянні з іншими елементами. По ступеню залежності накопичення від сорту елементи формують такий ряд $Cd > Pb > Cu > Zn$.

Ці дані свідчать про наявність сортів пшениці озимої більш толерантних до поглинання важких металів, особливо 1 класу небезпечності, що слід враховувати при підборі сортів для вирощування цієї культури в зонах значного техногенного навантаження. Толерантність окремих сортів пшениці озимої до свинцю і кадмію особливо важлива, так як дані експериментальних досліджень [15] говорять про те, що сумісне забруднення ґрунту свинцем і кадмієм приводить до зменшення маси зерна на 41%, а маси соломи на 19%.

Щодо вмісту важких металів в зерні ячменю ярого (табл. 2) також не відмічене перевищення ГДК. Розраховані коефіцієнти варіації свідчать, що накопичення важких металів в зерні ячменю ярого характеризується меншою мінливістю в порівнянні з пшеницею озимою, окрім цинку.

Для ячменю ярого найбільш стабільне накопичення міді, коефіцієнт варіації має саме низьке значення 13,5. Поглинання міді по сортам змінювалось в межах 0,29–0,41 часток ГДК.

Коефіцієнт варіації вмісту Zn був більшим в порівнянні з пшеницею озимою і становив 16,0.

Коефіцієнти варіації вмісту Pb і Cd мають більші значення, ніж для вмісту Cu і Zn. Це свідчить про більшу залежність накопичення Pb і Cd від сорту. Але варіювання вмісту цих елементів в зерні ячменю ярого було меншим, ніж для пшениці озимої.

Підвищений до фонового рівня вміст полютантів обумовлений тим, що дослідне поле розташоване в зоні техногенного впливу промислового джерела надходження важких металів – Курахівської ТЕС. В табл.4 наведені коефіцієнти біологічного поглинання хімічних елементів для пшениці озимої і ячменю ярого відповідно.

Вміст важких металів в зерні ячменю ярого (2021–2023)

Сорт ячменю ярого	Урожайність, т/га	Вміст важких металів, мг/кг			
		Cu (ГДК=10,0)	Zn (ГДК=50,0)	Pb (ГДК=0,5)	Cd (ГДК=0,1)
Донецький 14	4,39	3,09	23,7	0,18	0,046
Донецький 15	5,06	2,94	26,0	0,26	0,062
Бравий	5,65	2,99	24,5	0,34	0,060
Аверс	5,35	3,47	28,6	0,28	0,047
Східний	5,04	3,30	19,0	0,19	0,074
Степовик	5,35	3,33	19,6	0,20	0,052
Щедрик	5,07	2,92	29,7	0,22	0,032
Резерв	4,47	2,94	18,8	0,26	0,043
Реприз	5,36	3,03	21,9	0,38	0,048
Аватар	5,11	4,12	30,7	0,35	0,076
Подив	5,54	3,23	24,2	0,22	0,072
Аграрій	4,75	4,04	21,8	0,30	0,064
Сталкер	3,75	4,20	23,4	0,39	0,061
Вакула	5,96	3,30	21,8	0,23	0,054
НІР _{0,5}	0,48	0,38	2,6	0,07	0,008
Коефіцієнт варіації, %		13,5	16,0	26,1	22,6

Серед сортів ячменю ярого, що вивчались, найбільш стійким до забруднення свинцем був Донецький 14, а чутливим – Сталкер. Відносно кадмію найбільш толерантним був сорт Щедрик. В зерні сортів Аватар і Подив відмічене найбільше накопичення кадмію – 0,7 часток ГДК.

Порівняння накопичення Pb і Cd в зерні пшениці озимої і ячменю ярого вказує на більшу чутливість до них ячменю ярого. Мінімальний вміст свинцю 0,26 частки ГДК був в зерні пшениці озимої, в зерні ячменю ярого – 0,36ГДК. Це імовірно обумовлено різницею в будові кореневої системи, яка є бар'єром проти транспорту важких металів, зокрема свинцю, в системі ґрунт–рослина. Мінімальний вміст кадмію був практично однаковим 0,3 ГДК.

Як відомо, рослини здатні вибірково поглинати і накопичувати елементи, необхідні для свого росту та розвитку. Інтенсивність біоаккумуляції важких металів оцінювали за допомогою коефіцієнта біологічного поглинання, який дозволяє зробити висновок про ступінь доступності елемента для рослин та його поведінки в системі ґрунт–рослина.

Коефіцієнт біологічного поглинання ($K_{б.п}$) визначали за співвідношенням хімічного елемента в золі рослин до його вмісту в ґрунті. Для цього попередньо в ґрунті було визначено вміст валових і потенційно рухомих форм важких металів (табл. 3).

Таблиця 3

Вміст важких металів в ґрунті дослідних ділянок

Варіант досліджу	Вміст важких металів, мг/кг							
	Cu		Zn		Pb		Cd	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*
Пшениця озима	24,3	7,9	60,3	37,1	18,0	1,90	1,43	0,31
Ячмінь ярий	22,8	7,1	62,7	31,0	16,8	2,28	1,74	0,20
Фоновий вміст	22	5	55	10	13	5	1	<0,3
НІР _{0,5}		0,6		1,6		0,4		0,07

1* – валові форми, 2* – потенційно рухомі форми.

Підвищений до фонового рівня вміст поллютантів обумовлений тим, що дослідне поле розташоване в зоні техногенного впливу промислового джерела надходження важких металів – Курахівської ТЕС. В табл.4 наведені коефіцієнти біологічного поглинання хімічних елементів для пшениці озимої і ячменю ярого відповідно.

Експериментальні дані вказують на відмінність накопичення важких металів в зерні сільськогосподарських культур. Мідь та цинк поглинаються рослинами значно активніше, оскільки вони до певної концентрації є важливими мікроелементами, які необхідні для життєдіяльності рослинних організмів у кількостях в рази вище, ніж свинець та кадмій – елементи найбільш токсичного 1 класу небезпеки. Про це свідчать значення коефіцієнтів біологічного поглинання. Для міді цей показник має значення 0,54–0,86 для пшениці озимої, і 0,41–0,59 для ячменю ярого. Коефіцієнт біологічного поглинання цинку змінюється для цих культур відповідно в межах 0,52–0,97 і 0,61–0,99. Коефіцієнт біологічного поглинання кадмію і свинцю є меншим майже в 5–6 разів. По інтенсивності переходу із ґрунту в рослини пшениці озимої і ячменю ярого елементи розташовуються в ряд $Zn > Cu > Cd > Pb$.

Таким чином, підбір сортів ячменю ярого і пшениці озимої стійких до накопичення важких металів дасть змогу отримувати високоякісне

зерно, яке відповідає екологічним нормам і державним стандартам [23; 24], що в умовах індустріальних регіонів має велике практичне значення. При виборі сортів пшениці озимої і ячменю ярого для отримання рослинної продукції відповідно санітарно-гігієнічним нормам в зонах високого техногенного навантаження на агросферу доцільно орієнтуватися на сорти толерантні до дії свинцю і кадмію – найбільш токсичних елементів 1 класу небезпеки. Виходячи з цього, можна рекомендувати такі сорти пшениці озимої як Донецька 48, Вежа, Білосніжка, Ігрита і сорти ячменю ярого як Донецький 14, Степовик, Щедрик, Резерв.

Таблиця 4

Інтенсивність біоаккумуляції важких металів в зерні

Сорт пшениці озимої	Коефіцієнт біологічного поглинання				Сорт ячменю ярого	Коефіцієнт біологічного поглинання			
	Cu	Zn	Pb	Cd		Cu	Zn	Pb	Cd
Донецька 48	0,54	0,90	0,08	0,10	Донецький 14	0,44	0,76	0,08	0,23
Олексіївка	0,80	0,79	0,10	0,19	Донецький 15	0,41	0,84	0,11	0,31
Перемога	0,61	0,69	0,07	0,23	Бравий	0,42	0,79	0,15	0,30
Білосніжка	0,70	0,72	0,07	0,13	Аверс	0,49	0,92	0,12	0,24
Попелюшка	0,75	0,78	0,17	0,23	Східний	0,46	0,61	0,08	0,37
Богиня	0,84	0,56	0,09	0,13	Степовик	0,47	0,63	0,09	0,26
Краплина	0,73	0,71	0,16	0,12	Щедрик	0,41	0,96	0,10	0,16
Юзовська	0,59	0,97	0,11	0,23	Резерв	0,41	0,61	0,11	0,22
Ігрита	0,65	0,75	0,08	0,13	Реприз	0,41	0,71	0,17	0,24
Вежа	0,54	0,69	0,07	0,10	Аватар	0,58	0,99	0,15	0,38
Традиція	0,58	0,72	0,12	0,16	Подив	0,45	0,78	0,10	0,36
Росинка	0,86	0,52	0,13	0,26	Аграрій	0,57	0,70	0,13	0,32
					Сталкер	0,59	0,75	0,17	0,31
					Вакула	0,46	0,70	0,10	0,27

3. Ефективність комплексного застосування мікробних препаратів і стимуляторів росту для підвищення якості зерна пшениці озимої

В дослідях експериментально встановлено, що застосування мікробних препаратів для передпосівної обробки насіння і обприскування посівів зернових культур регуляторами росту рослин забезпечує

підвищення врожайності і зниження нагромадження важких металів в зерні.

Одержано прибавку врожаю пшениці озимої до контролю (табл. 5) за застосування Діазофіту 0,60 т/га (8,5%), Поліміксобактерину 0,79 т/га (11,1%). Комплексне застосування мікробних препаратів разом із стимуляторами росту рослин збільшило прибавку врожаю до 0,87–0,98 т/га або 12,3–13,8%.

Таблиця 5

Урожайність пшениці озимої сорту Перемога (2021–2023 р.)

Варіант досліджу	Урожайність, т/га	Прибавка,	
		т/га	%
Контроль (вода, без препаратів)	7,10	-	-
Діазофіт	7,70	0,60	8,5
Поліміксобактерин	7,89	0,79	11,1
Діазофіт + Гумісол-плюс	7,97	0,87	12,3
Діазофіт + В ерместім	7,83	0,73	10,3
Поліміксобактерин + Гумісол-плюс	8,08	0,98	13,8
Поліміксобактерин + Верместім	8,01	0,91	12,8
НІР 0,5 т/га	0,19		

Найбільш ефективним було поєднання інокуляції насіння Поліміксобактерином з обробкою посівів Гумісол-плюс. Урожайність у цьому варіанті склала 8,08т/га, що більше за контроль на 0,98 т/га або 13,8%.

В усіх варіантах досліджу вміст міді, цинку, кадмію, свинцю не перевищував гранично допустимі концентрації (табл. 6).

Поєднання мікробних препаратів для обробки насіння і біостимуляторів рослин Гумісол-плюс і Вермістім для обприскування посівів сприяє зменшенню накопичення найбільш небезпечних елементів свинцю і кадмію в зерні пшениці озимої. Це робить такий агрозахід перспективним для зниження ступеню ризиків забруднення зерна цими елементами при вирощуванні в зонах високого техногенного впливу.

Для встановлення кількісних параметрів міграції ВМ з ґрунту в рослини пшениці озимої розраховували коефіцієнти біологічного поглинання ($K_{бл}$), які дають можливість оцінити вплив технології

на процеси накопичення важких металів рослинами. $K_{\text{бп}}$ визначали за співвідношенням вмісту металу в рослині до його вмісту в ґрунті (табл. 7).

Таблиця 6

Вплив біопрепаратів на вміст важких металів в зерні пшениці озимої сорту Перемога (2021–2023 рр.)

Варіант досліджу	Вміст важких металів, мг/кг											
	Cu			Zn			Pb			Cd		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Контроль (вода)	6,2	5,9	5,0	27,4	25,1	25,5	0,36	0,26	0,29	0,082	0,071	0,072
Діазофіт	5,5	4,5	4,5	25,8	24,3	24,4	0,28	0,22	0,25	0,067	0,058	0,064
Полі-міксобактерин	5,0	4,7	4,9	25,1	23,6	24,0	0,21	0,15	0,20	0,056	0,046	0,051
$\text{НІР}_{0,5}$	0,63			1,0			0,05			0,008		

1, 2, 3 – варіанти обприскування посівів на фоні передпосівної обробки насіння:
1 – контроль (вода), 2 – Гумісол-плюс, 3 – Вермістім.

Таблиця 7

Вплив біопрепаратів на інтенсивність біоаккумуляції свинцю і кадмію в зерні пшениці озимої

Варіант досліджу	Коефіцієнт біологічного поглинання					
	Pb			Cd		
	1	2	3	1	2	3
Контроль (вода)	0,18	0,13	0,15	0,19	0,17	0,17
Діазофіт	0,14	0,11	0,13	0,16	0,13	0,15
Поліміксобактерин	0,11	0,08	0,10	0,13	0,11	0,12

1, 2, 3 – варіанти обприскування посівів на фоні передпосівної обробки насіння:
1 – контроль (вода), 2 – Гумісол-плюс, 3 – Вермістім.

Експериментально в ґрунті дослідного поля визначено концентрацію потенційно рухомого свинцю ($2,0 \pm 0,16$ мг/кг) та потенційно рухомого кадмію ($0,43 \pm 0,09$ мг/кг). Максимальний позитивний ефект дало комплексне застосування Поліміксобактерину і біостимулятора Гумісол-плюс. В цьому варіанті накопичення свинцю в зерні пшениці озимої знизилось в 2,3 рази, кадмію – в 1,8 рази. $K_{\text{бп}}$ на контролі становив

для Pb – 0,18, з обробкою – 0,08, для Cd – 0,19 і 0,11 відповідно. У варіанті з обробкою Вермістимом коефіцієнт біологічного поглинання для свинцю був 0,10, для кадмію – 0,12, вміст свинцю знизився в 1,8 рази, кадмію – в 1,6 рази.

Проведене порівняльне оцінювання біопрепаратів Агrostимулін, Мікрогумін, Поліміксобактерін і Біополіцид на врожайність та якість зерна ячменю ярого.

За рахунок передпосівної обробки насіння достовірне збільшення врожаю на 0,26-0,28 т/га щодо контролю забезпечили Агrostимулін, Мікрогумін і Біополіцид. Найбільш ефективним було спільне застосування передпосівної обробки насіння з позакореневою обробкою рослин. Істотна добавка врожаю в середньому 0,43 і 0,55 т/га в порівнянні з контролем була у варіантах інокуляції насіння Мікрогуміном і Агrostимуліном з подальшим обприскуванням посівів Агrostимуліном (табл. 8).

Таблиця 8

Вплив інокуляції насіння біопрепаратами і обприскування посівів Агrostимуліном на урожайність зерна ячменю ярого (2020–2022 рр.)

Варіанти передпосівної інокуляції насіння	Варіанти обприскування посівів на фоні передпосівної інокуляції насіння									
	Вода					Агrostимулін				
	Урожайність, т/га			Приріст до контролю		Урожайність, т/га			Приріст до контролю	
	2013	2014	середнє	т/га	%	2013	2014	середнє	т/га	%
Контроль (вода)	2,29	2,84	2,57	-	-	2,42	3,11	2,77	0,20	7,8
Біополіцид	2,47	3,23	2,85	0,28	10,9	2,56	3,24	2,90	0,33	12,8
Поліміксобактерін	2,39	3,13	2,76	0,19	7,4	2,44	3,11	2,78	0,21	8,0
Мікрогумін	2,42	3,27	2,85	0,28	10,9	2,68	3,32	3,00	0,43	16,7
Агrostимулін	2,56	3,07	2,82	0,26	9,9	2,96	3,27	3,12	0,55	21,2
НСР _{0,5}	0,15	0,19				0,15	0,19			

Для південно-східного промислового регіону в зв'язку зі значним техногенним навантаженням на агроландшафти актуальним є питання безпеки зерна. Дослідження вмісту важких металів у зерні ячменю ярого показало, що на всіх варіантах дослідів цей показник не перевищував ГДК (табл. 9).

Таблиця 9

**Вміст важких металів в зерні ячменю ярого сорту Степовик
(2020–2022 рр.)**

Варіанти передпосівної інокуляції насіння	Варіанти обприскування посівів на фоні передпосівної інокуляції насіння							
	Вода				Агростимулін			
	Вміст, мг/кг				Вміст, мг/кг			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
Контроль (вода)	2,2	17,1	0,11	0,02	2,9	21,5	0,19	0,01
Біополіцид	3,3	18,3	0,15	0,01	3,0	18,4	0,11	0,01
Поліміксо-бактерін	2,3	18,0	0,22	0,02	1,7	22,4	0,12	0,01
Мікрогумін	2,3	21,5	0,19	0,02	3,3	22,3	0,13	0,01
Агростимулін	2,1	16,0	0,11	0,01	2,7	20,5	0,15	0,01

Вміст міді був в межах 2,1-3,3 мг/кг, вміст цинку коливався від 16,0 до 22,4 мг/кг. Вміст токсикантів першого класу небезпеки свинцю і кадмію не перевищував, відповідно, 0,22 мг/кг і 0,02 мг/кг.

Також досліджено вплив мікробіологічного препарату мікрогумін і біостимулятора росту рослин природного походження гумату калію на нагромадження важких металів в зерні ячменю ярого.

Інокуляція насіння ячменю ярого мікробним препаратом мікрогумін з подальшим позакореневим підживленням фізіологічно активним препаратом гумат калію вегетуючих рослин в фазі трубкування сприяли підвищенню продуктивності культури (табл. 10). За цих умов достовірно одержано додаткового врожаю 0,61 т/га або 20,7 % в порівнянні з контролем, де врожайність склала 2,94 т/га.

Одночасно застосування мікрогуміну і позакореневого підживлення стимулятором росту рослин природного походження, яким є гумат калію, сприяло зниженню транспорту важких металів в сис-

темі ґрунт –рослина. Це обумовило покращення санітарно-гігієнічних показників якості зерна ячменю ярого за рахунок зменшення вмісту в зерні важких металів (табл. 11).

Таблиця 10

Вплив комплексного застосування мікрогуміну і гумату калію на врожайність зерна ячменю ярого (2019 – 2021 рр.)

Варіанти передпосівної інокуляції насіння	Варіанти обприскування посівів на фоні передпосівної інокуляції насіння					
	Вода			Гумат калію		
	Урожайність, т/га	Приріст до контролю		Урожайність, т/га	Приріст до контролю	
		т/га	%		т/га	%
Контроль (вода)	2,94	-	-	3,19	0,25	8,5
Мікрогумін	3,40	0,46	15,6	3,55	0,61	20,7
НІР _{0,5}	0,28			0,30		

Таблиця 11

Вплив мікрогуміну на вміст важких металів в зерні ячменю ярого сорту Степовик (2019 – 2021 рр.)

Варіант досліджу	Вміст важких металів, мг/кг			
	Cu (ГДК=10)	Zn (ГДК= 50)	Pb (ГДК=0,5)	Cd (ГДК=0,1)
Контроль	5,67	32,6	0,37	0,083
Інокуляція мікрогуміном	5,59	30,4	0,29	0,064
Позакоренева обробка гуматом калію	5,60	30,8	0,31	0,075
Мікрогумін+ гумат калію	5,56	29,9	0,26	0,057
НІР _{0,5}	0,18	1,03	0,06	0,012

За умов інокуляції насіння мікрогуміном вміст свинцю в зерні ячменю ярого зменшився проти контролю на 21,6 %, кадмію – на 22,9 %. Обприскування вегетуючих рослин гуматом калію на фоні передпосівної обробки насіння мікрогуміном підвищує сталість рослин до дії екологічних стресорів-важких металів. В цьому варіанті виявлено найменше накопичення важких металів – цинку, свинцю і кадмію в зерновій продукції. В порівнянні з контролем вміст цинку

в зерні зменшився на 8,2 %, свинцю – на 29,7 %, кадмію – на 31,3 %. Таке зменшення вмісту важких металів особливо важливе для найбільш токсичних елементів I класу небезпеки свинцю і кадмію.

Таким чином, мікробні препарати і стимулятори росту рослин виявляють протекторну дію до важких металів. Застосування такого агрозаходу дає змогу зменшити ризик забруднення зернової продукції при вирощуванні в техногенних умовах.

4. Вплив кліматичних чинників на формування якості продукції зернових культур

Зміни температури і умов зволоження істотно впливають на стан та мікробіологічну активність ґрунту. Транслокація важких металів залежить від багатьох факторів: хімічних властивостей, здатності до комплексоутворення, концентрації у ґрунтовому розчині, рН ґрунту, вмісту гумусу та ін. [25–27]. Температура і вологість ґрунту також є важливими факторами впливу на рухомість важких металів. В умовах всезростаючого техногенного пресингу на навколишнє середовище та за умов змін клімату велике практичне значення для АПК індустріальних регіонів має вивчення впливу абіотичних факторів на транспорт важких металів в системі ґрунт-рослина [28; 29].

До найбільш значущих метеорологічних параметрів належать температура навколишнього середовища і кількість атмосферних опадів.

Для клімату Донецької області характерне жарке, посушливе літо і прохолодна зима з нестійким сніговим покривом [30]. Середня температура січня $-4...-6$ °С, липня $+23...+24$ °С. Річна сума опадів складає 375 – 556 мм.

В Донецькому регіоні за останні 15 років зафіксовано підвищення середньої температури на 0,8°С. Розподіл температури на протязі року показує, що значно більш теплим став зимовий період, середньомісячні температури зросли на 1 – 2,5°С. В останні роки все більше посилюються в регіоні негативні впливи посушливих погодно-кліматичних умов. У регіоні відмічається перевищення інтенсивності температурного росту, температура порівняно з багаторічними нормами в останні роки зросла на 2,5 – 3,0 °С.

Виробничі затрати при вирощуванні культури можуть окупатися лише в тому випадку, якщо висока потенційна продуктивність сортів

достатньою мірою захищена їхньою екологічною стійкістю до абіотичних факторів, тобто нерегульованих факторів зовнішнього середовища. За відповідних агротехнологічних заходів навіть у несприятливих для вирощування умовах такі сорти повинні формувати високоякісне зерно.

Аналіз гідрометеорологічних умов останніх років (табл. 12) показав, що під час вегетації ячменю ярого температура повітря частіше перевищує багаторічний показник на 0,5-3,1°C. Дуже рідким буває зниження температур від багаторічних показників до 1,9°C. Кількість опадів в основному була нижча від багаторічних від 11,0 до 54,9 мм.

Таблиця 12

Метеорологічні умови весняно-літніх періодів

Рік	Місяць	Температура повітря, °C		Сума опадів, мм		ГТК	Умови
		середня	±до багаторічних	середня	±до багаторічних		
2018	квітень	12,3	+2,8	26,0	-17,2	0,7	середня посуха
	травень	18,7	+3,1	8,7	-33,1	0,2	дуже сильна посуха
	червень	21,8	+2,4	40,2	-26,5	0,6	середня посуха
2019	квітень	10,9	+1,4	54,2	-11,0	2,1	надмірно волого
	травень	18,2	+2,6	41,7	-0,1	0,6	середня посуха
	червень	22,5	+3,1	25,0	-41,7	0,4	сильна посуха
2020	квітень	8,2	+0,5	5,8	-37,4	0,15	дуже сильна посуха
	травень	13,7	-1,9	95,0	+53,2	2,2	надмірно волого
	червень	22,5	+3,1	11,8	-54,9	0,2	дуже сильна посуха
2021	квітень	9,3	-0,2	32,0	-4,6	1,72	надмірно волого
	травень	16,4	+0,8	34,3	-7,5	0,7	слабка посуха
	червень	20,2	+0,8	168,9	+102,2	2,8	надмірно волого
2022	квітень	8,4	-1,1	65,2	+22,0	4,0	надмірно волого
	травень	14,9	-0,7	66,7	+24,9	1,4	надмірно волого
	червень	21,8	+2,4	10,5	-56,2	0,2	дуже сильна посуха

Як видно з таблиці, найбільш посушливими були 2018 рік (гідротермічний коефіцієнт змінювався в межах 0,2–0,7), 2019 рік (ГТК в травні–червні склав 0,6–0,4) та 2020 рік, особливо квітень і червень (ГТК 0,15–0,20).

2021 рік мав значення ГТК 1,74, тобто умови були надмірно зволожені. Особливо це стосується червня. При цьому значення ГТК в травні–червні змінювалось в доволі широкому інтервалі від 0,7 до 2,8.

2022 рік виявився не стабільним за температурою та вологозабезпеченням. Квітень та травень характеризувалися надмірною вологою, проте температурний режим був нижчим за середньобогаторічні показники, що не могло не позначитись на вегетації рослин. З початком червня розпочалось інтенсивне наростання середньодобової температури, що призвело до сильної посухи та знизило показник ГТК до 0,2.

Результати визначення вмісту форм важких металів в ґрунті в роки з різним рівнем вологозабезпечення наведені в табл. 13. Зразки ґрунту відбирались наприкінці червня.

Таблиця 13

Вміст різних форм важких металів в орному шарі ґрунту

Рік	Середній вміст сполук елементів, мг/кг								Вологість ґрунту, мм
	Кислото розчинні				Рухомі				
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	
2018	6,9	45,9	6,77	0,47	0,69	3,20	1,79	0,19	14
2019	6,8	47,5	6,93	0,51	0,64	3,57	1,87	0,21	14
2020	7,0	45,3	6,88	0,46	0,65	3,19	1,81	0,19	6
2021	6,0	53,6	7,09	0,54	0,79	3,70	2,0	0,24	38
2022	7,3	53,8	7,12	0,54	0,80	3,75	2,1	0,24	8
НСР _{0,5-мг/кг}	1,5	5,0	0,4	0,09	0,07	0,31	0,11	0,02	

Достовірних змін вмісту кислото розчинних форм свинцю, міді і кадмію в посушливі і надмірно зволожені роки не спостерігалось. Для цинку відмічене зростання вмісту кислото розчинної форми при збільшенні вологості ґрунту. В посушливих умовах (2020 р.) вміст кислото розчинного цинку склав 45,3 мг/кг, в умовах надмірного зволоження 2022 року, не дивлячись на посуху в червні, зріс на 8,3–8,5 мг/кг при НСР 5,0 мг/кг.

Визначено, що вміст рухомих форм елементів збільшився при зростанні вмісту води в ґрунті. Це зростання було різного ступеню. Для цинку, свинцю і міді зростання вмісту рухомих форм, які найбільш

доступні рослинам, суттєво не відрізнялось і було відповідно 0,56 мг/кг, 0,29 мг/кг, 0,05 мг/кг. Найбільше підвищення відмічене для кадмію: вміст рухомого кадмію в 2022 вологий рік зріс на 0,15 мг/кг відносно посушливого 2020 року.

Для вивчення впливу агрокліматичних умов на біогенне нагромадження важких металів в рослинах проведене порівняння вмісту токсичних елементів в зерні ячменю ярого з врожаїв, які отримані в найбільш контрастні по метеорологічним показникам роки. Для порівняння були вибрані 2018 р., 2020 р. (посуха) і 2022 р. (надмірне зволоження). Результати аналітичних вимірювань наведені в табл. 14.

Вміст важких металів в зерні ячменю ярого при зростанні вологості не перевищував ГДК.

Таблиця 14

Вміст важких металів в зерні ячменю ярого сорту Степовик в агрокліматичних умовах 2022 р.

Рік, умови зволоження	Вміст елементів, мг/кг			
	Cu (ГДК=10,0)	Zn (ГДК=50,0)	Pb (ГДК=0,5)	Cd (ГДК=0,1)
2018, посуха	4,55	24,5	0,29	0,05
2020, посуха	4,62	24,2	0,24	0,05
2022, надмірно волого	5,00	28,9	0,33	0,07
НСП 0,5 мг/кг	0,50	3,7	0,07	0,01

При збільшенні вологозабезпеченості для вмісту міді спостерігалась тенденція до збільшення, але це збільшення було в межах похибки досліду. Вміст свинцю за цих умов практично не змінився, хоч вміст рухомої форми металу в ґрунті зріс. Вочевидь така поведінка свинцю обумовлена наявністю у кореневої системи бар'єрної захисної функції щодо цього токсиканту. Накопичення цинку в зерні ячменю ярого збільшилось з 24,2 мг/кг до 28,9 мг/кг або на 19,4% в надмірно вологий рік проти показника в посушливий рік. Вміст такого високотоксичного елементу як кадмій зріс на 0,02 мг/кг або на 40%. Така поведінка кадмію підвищує ризик забруднення зерна ячменю ярого цим елементом.

Таким чином, зростання вмісту важких металів в рослинній продукції може бути пов'язане не тільки з підвищенням вмісту рухо-

мих форм елементів у ґрунті. При зростанні кількості опадів викиди Курахівської ТЕС, в зоні впливу якої знаходились дослідні ділянки, утворювали відповідні кислоти, що призводить до підвищення вмісту розчинних сполук важких металів у ґрунті і атмосферних аерозолях. З атмосферними аерозолями розчинні важкі метали потрапляють на листя і через кутикулі транспортуються в рослини. Це обумовлює необхідність в застосуванні заходів щодо зменшення ризиків забруднення рослинної продукції важкими металами в умовах реального техногенного навантаження.

4. Висновки

Підбір сортів ячменю ярого і пшениці озимої стійких до накопичення важких металів дасть змогу отримувати високоякісне зерно в умовах техногенних регіонів, при чому доцільно орієнтуватися на сорти толерантні до дії свинцю і кадмію, як найбільш токсичних елементів. Можна рекомендувати сорти озимої Донецька 48, Вежа, Білосніжка, Гроста, ячменю ярого Донецький 14, Степовик, Щедрик, Резерв.

Коефіцієнти варіації вмісту важких металів в зерні пшениці озимої свідчать, що найбільша залежність від сорту характерна для кадмію, для нього коефіцієнт варіації становить 36,0%. Дещо менша ступінь залежності від сорту виявлена для накопичення свинцю, коефіцієнт варіації складає 30,5 %, для цинку коефіцієнт варіації має саме низьке значення 14,5 %. По ступеню залежності накопичення від сорту елементи формують такий ряд $Cd > Pb > Cu > Zn$.

Коефіцієнти варіації вмісту важких металів в зерні ячменю ярого свідчать, що найбільша залежність від сорту характерна для свинцю, для нього коефіцієнт варіації становить 26,1%. Дещо менша ступінь залежності від сорту виявлена для накопичення кадмію, коефіцієнт варіації складає 22,6%, для міді коефіцієнт варіації має саме низьке значення 13,5 %. По ступеню залежності накопичення від сорту елементи формують такий ряд $Pb > Cd > Zn > Cu$.

Коефіцієнт біологічного поглинання цинку змінюється для цих культур відповідно в межах 0,52 – 0,97 і 0,61 – 0,99. Для міді цей показник має значення 0,54 – 0,86 для пшениці озимої і 0,41 – 0,59 для ячменю ярого. Коефіцієнт біологічного поглинання кадмію і свинцю є меншим майже в 5 – 6 разів. По інтенсивності переходу із ґрунту в

рослини пшениці озимої і ячменю ярого елементи розташовуються в ряд $Zn > Cu > Cd > Pb$.

Поліміксобактерин за комплексне застосування зі стимуляторами Гумісол-плюс і Вермістім виявляє протекторну дію до свинцю і кадмію. Накопичення свинцю в зерні пшениці озимої знизилось в 2,3 рази, кадмію – в 1,8 рази. При використанні Поліміксобактерину коефіцієнт біологічного поглинання для Pb становив 0,08 проти 0,18 на контролі, для Cd – 0,11 і 0,19 відповідно. Використання Вермістіму забезпечило практично такий же ефект: коефіцієнт біологічного поглинання для свинцю був 0,10, для кадмію – 0,12, вміст свинцю знизився в 1,8 рази, кадмію – в 1,6 рази.

За умов інокуляції насіння мікрогуміном вміст свинцю в зерні ячменю ярого зменшився проти контролю на 21,6 %, кадмію – на 22,9 %. Обприскування вегетуючих рослин гуматом калію на фоні передпосівної обробки насіння мікрогуміном підвищує сталість рослин до дії екологічних стресорів-важких металів. В цьому варіанті виявлено найменше накопичення важких металів – цинку, свинцю і кадмію в зерновій продукції. В порівнянні з контролем вміст цинку в зерні зменшився на 8,2 %, свинцю – на 29,7 %, кадмію – на 31,3 %.

Зміни гідрометеорологічних умов впливають на вміст рухомих форм важких металів у ґрунті і на їх транслокацію в зерно. Зі збільшенням вологозабезпеченості спостерігалась тенденція до збільшення вмісту міді, вміст свинцю за цих умов практично не змінився, особливо збільшується вміст кадмію в зерні, елементу першого класу небезпеки.

Список літератури:

1. Екологічна експертиза технологій вирощування сільськогосподарських культур: метод. рекомендації / За ред. Н. А. Макаренко, В. В. Макаренка. Київ, 2008. 84 с.
2. Екологічна ситуація в зоні впливу Зміївської ТЕС / за ред. Балюка С. А., Фатєєва А. І., Ворона В. П. Харків: Бровін О. В., 2019. 88 с.
3. Гаврилюк Ю. В., Тохтарь К. І. Рівні забруднення важкими металами агроландшафтів Луганської області. *Біологія та валеологія*. 2018. № 20. С. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2543569>
4. Фатєєв Ф. І., Самохвалова В. Л. Концепція використання техногенно забруднених ґрунтів. Харків: Стильна типографія, 2018. 57 с.
5. Корсун С. Г., Довбаш Н. І. Трансформації в агроценозі кукурудзи під впливом важких металів: монографія. Київ: Аграр. наука, 2018. 192 с.

6. Шевчук В. Д., Мудрак Г. В. Оцінка інтенсивності забруднення важкими металами ґрунтів задіяних під вирощування овочевих культур. *Scientific research in XXI century: the Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference* (March 6–8, 2021). Canada, Ottawa: Scientific Collection «InterConf», (44), pp. 676–682. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/9911>
7. Рибалова О. В., Бригада О. В., Макаров Є. О., Бондаренко О. О. Новий метод оцінки ризику для здоров'я населення від впливу забруднення ґрунтів важкими металами. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2019. № 29 (1). С. 78–99. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2019_29%281%29_9
8. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А. Міграція Cu, Zn, Pb, Cd у системі «ґрунт–рослина». *Вісник Харківського національного аграрного університету*. 2013. № 1. С. 244–248.
9. Мазур В. А., Ткачук О. П., Яковець Л. А. Екологічна безпека зернової та зернобобової продукції. Вінниця : ВНАУ, 2020. 442 с.
10. Коноваленко Л. І., Бондарева О. Б., Вінюков О. О. Закономірності формування зон забруднення важкими металами навкруги техногенних об'єктів. *Priority directions of science development: Abstracts of the 5th International scientific and practical conference*. Lviv: SPC “Sci-onf.com.ua”, 2020, pp. 30–34. URL: <http://sci-conf.com.ua>
11. Коноваленко Л. І., Вінюков О. О., Бондарева О. Б. Буферна здатність ґрунтів агроландшафтів Донецького регіону щодо забруднення важкими металами. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98. № 9. С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.31867/agrovisnyk202009-07>
12. Найдюнова О. Є. Застосування гумінового препарату «Humin plus» в органічному землеробстві. *Вісник ХНАУ*. 2015. № 2. С. 39–50.
13. Вінюков О. О., Дудкіна А. П., Шевченко Т. В. Вплив післядії вермікомпосту на ефективність вирощування ячменю ярого в умовах східної частини Північного Степу України. *Зернові культури*. 2019. Том 3. № 2. С. 281–288. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2>
14. Бездрабко О. М., Макаренко Н. А., Кавецький В. М. Вплив сульфат гумат амонійних добрив на міграцію важких металів за ґрунтовим профілем в умовах Полісся України. *Вісник ДААУ*. 2000. № 2. С. 276–280.
15. Бондарева О. Б., Вінюков О. О., Коноваленко Л. І. Ефективність мікробних препаратів і регуляторів росту рослин для зниження накопичення важких металів в зерні пшениці озимої. *Аграрні інновації*. 2021. № 5. С. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2>
16. Gyrka A. D., Viniukov O. O., Gyrka T. V., Bokun O. I., Kulik A. O. Efficiency of growing winter wheat depending on the soil tillage and sowing systems. *Зернові культури*. 2019. Том 3. № 1. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0061>
17. Корсун С. Г., Клименко І. І., Болоховська В. А., Болоховський В. В. Транслокація важких металів у системі «ґрунт – рослина» за вапнування та впливу біологічних препаратів. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 1. С. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163245>

18. Мірошніченко Н. Н., Куц Е. А. Селективність поглинання важких металів ґрунтом та гуміновими кислотами за різних рівнів рН. *Ґрунтознавство*. 2016. Т. 17. № 1–2. С. 76–82. DOI: 10.15421/041607
19. Волкогон В. В., Гусев О. В., Волкогон К. І. Особливості азотного живлення ячменю при застосуванні нового біологічного препарату мікрогуміну. *Живлення рослин: теорія і практика*. Київ : Логос, 2005. С. 209–213.
20. Остапчук М. О., Поліщук І. С., Мазур О. В., Максимов А. М. Використання біопрепаратів – перспективний напрямок вдосконалення агротехнологій. *Сільське господарство та лісівництво*. 2015. № 2. С. 5–17.
21. Коноваленко Л. І., Вінюков О. О., Бондарева О. Б. Особливості накопичення фтору в ґрунті і рослинах в зоні впливу техногенезу. *Збалансоване природокористування*. 2018. № 3. С. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2018.190381>
22. Методологія та організація наукових досліджень: підручник / за ред. В. О. Дружиніної. Вінниця: Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2010. 358 с.
23. ДСТУ 3769-98. Ячмінь. Технічні умови.
24. ДСТУ 3768:2010. Пшениця. Технічні умови.
25. Фатєєв А. І., Семенов Д. О., Мірошніченко М. М., Ликова О. А., Смірнова К. Б., Шемет А. Співвідношення сгк/сфк у ґрунтах України як показник рухомості мікроелементів. *Вісник аграрної науки*. 2013. Вип. 7. С. 16–19.
26. Мінкіна Т. М., Мірошніченко Н. Н., Фатєєв А. І., Мотузова Г. В., Кривицька І. А. Природний і антропогенний фон мікроелементів в чорноземних звичайних Приазов'я та Нижнього Дону. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 3–4. С. 96–101.
27. Балук С. А., Медведєв В. В., Воротинцева Л. І., Шимель В. В. Сучасні проблеми деградації ґрунтів і заходи щодо досягнення нейтрального її рівня. *Вісник аграрної науки*. 2017. С. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01>
28. Вінюков О. О., Коноваленко Л. І., Бондарева О. Б., Василенко Т. Ф. Вплив абіотичних факторів на формування якості зерна пшениці озимої м'якої в умовах Донецької області. *Миронівський вісник*. 2017. Вип. 5. С. 114–125.
29. Бондарева О. Б., Вінюков О. О., Коноваленко Л. І., Чугрій Г. А. Вплив кліматичних і антропогенних чинників на вміст важких металів у зерні ячменю ярого в умовах східної частини Північного Степу України. *Зернові культури*. 2023. Том 7. № 2. С. 278–284. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0287>
30. Екологічний атлас Донецької області. 2020. 348 с.

References:

1. Ekologichna ekspertyza tekhnolohiy vyroshchuvannya silskohospodarskykh kultur: metod. rekomendatsiyi [Ecological expertise of agricultural crop growing technologies: methodological recommendations]. In N. A. Makarenko, V. V. Makarenko (Eds.). (2008) Kyiv, 84 p. (in Ukrainian)

2. Ekolohichna sytuatsiya v zoni vplyvu Zmiivskoyi TES [Ecological situation in the zone of influence of Zmiivska TPP] In S. A. Balyuk, A. I. Fateyev, V. P. Vorona (Eds.). (2019) Kharkiv: O. V. Brovin, 88 p. (in Ukrainian)
3. Gavrilyuk Yu. V., Tokhtar K. I. (2018) Rivni zabrudnennya vazhkymy metalamy ahrolandshaftiv luhanskoyi oblasti. [Pollution levels of agrilandscapes of human metals of the Lugansk region]. *Biolohiya ta valeolohiya – Biology and valeology*, no 20, pp. 29–34. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2543569> (in Ukrainian)
4. Fateyev F. I., Samokhvalova V. L. (2018) Kontseptsiya vykorystannya tekhnogenno zabrudnenykh hruntiv [Concept of using technogenically contaminated soils]. Kharkiv: Stilna typografiya, 57 p. (in Ukrainian)
5. Korsun S. G., Dovbash N. I. (2018) Transformatsiyi v ahrotsenozi kukurudzy pid vplyvom vazhkykh metaliv: monohrafiya [Transformations in the agrocenosis of corn under the influence of heavy metals: monograph]. Kyiv: Ahrar. nauka, 192 p. (in Ukrainian)
6. Shevchuk V. D., Mudrak G. V. (2021) Otsinka intensyvnosti zabrudnennya vazhkymy metalamy hruntiv zadiyanykh pid vyroshchuvannya ovochevykh kultur [Assessment of the intensity of heavy metal contamination of soils used for growing vegetable crops]. *Scientific research in xxi century: the Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference* (March 6-8, 2021). Canada, Ottawa: Scientific Collection «InterConf», (44), pp. 676–682. Available at: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/interconf/article/view/9911> (in Ukrainian)
7. Rybalova O. V., Brigada O. V., Makarov E. O., Bondarenko O. O. (2019) Novyy metod otsinky ryzyku dlya zdorov'ya naselennya vid vplyvu zabrudnennya gruntiv vazhkymy metalamy [A new method for assessing the risk to public health from the impact of soil contamination with heavy metals]. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy – Problems of Emergency Situations*, no 29 (1), pp. 78–99. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pns_2019_29%281%29_9 (in Ukrainian)
8. Gerasymchuk L. O., Valerko R. A. (2013) Mihratsiya Cu, Zn, Pb, Cd u systemi «grunt–roslyna» [Migration of Cu, Zn, Pb, Cd in the soil–plant system]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu – Bulletin of the Kharkiv National Agrarian University*, no. 1, pp. 244–248. (in Ukrainian)
9. Mazur V. A., Tkachuk O. P., Yakovets L. A. (2020) Ekolohichna bezpeka zernovoyi ta zernobobovoyi produktsiyi [Environmental safety of grain and legume products]. Vinnytsia: VNAU, 442 p. (in Ukrainian)
10. Konovalenko L. I., Bondareva O. B., Vinyukov O. O. (2020) Zakonomirnosti formuvannya zon zabrudnennya vazhkymy metalamy navkruhy tekhnogenykh ob'ektiv [Regularities of formation of zones of pollution by heavy metals around technogenic objects]. *Priority directions of science development: Abstracts of the 5th International scientific and practical conference*. Lviv: SPC “Sci-onf.com.ua”, pp. 30–34. URL: <http://sci-conf.com.ua> (in Ukrainian)
11. Konovalenko L., Vinyukov O., Bondareva O. (2020) Buferna zdatsnist gruntiv ahrolandshaftiv Donetskoho rehionu shchodo zabrudnennya vazhkymy metalamy [Soil buffering of landscapes of Donetsk region before pollution by heavy

metals]. *Visnyk ahrarynoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, vol. 98, no. 9, pp. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202009-07> (in Ukrainian)

12. Naidyonova O. E. (2015) Zastosuvannya huminovoho preparatu «Humin plus» v orhanichnomu zemlerobstvi [Application of humic preparation "Humin plus" in organic farming]. *Visnyk KhNAU – Bulletin of the KhNAU*, no. 2, pp. 39–50. (in Ukrainian)

13. Vinyukov O. O., Dudkina A. P., Shevchenko T. V. (2020) Vplyv pislyadiyi vermikompostu na efektyvnist vyroshchuvannya yachmenyu yarohto v umovakh skhidnoyi chastyny Pivnichnoho Stepu Ukrayiny [Influence of vermicompost aftereffect on the efficiency of spring barley cultivation in arid conditions of the Steppe of Ukraine]. *Zernovi kultury – Grain Crops*, 4 (2), pp. 281–288. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0> (in Ukrainian)

14. Bezdrabko O. M., Makarenko N. A., Kavetsky V. M. (2000) Vplyv sulfatumat amoninykh dobyrv na mihratsiyu vazhkykh metaliv za hruntovym profilem v umovakh Polissya Ukrayiny [The influence of sulfate humate ammonium fertilizers on the migration of heavy metals along the soil profile in the conditions of Polissya, Ukraine]. *Visnyk DAAU – Bulletin of the State Academic Academy of Ukraine*, no. 2, pp. 276–280. (in Ukrainian)

15. Bondareva O. B., Vinyukov O. O., Konovalenko L. I. (2021) Efektyvnist mikrobykh preparativ i rehulyatoriv rostu roslyn dlya znyzhennya nakopychennya vazhkykh metaliv v zerni pshenytsi ozymoyi. [The use of microbial preparations and plant growth regulators to reduce the accumulation of heavy metals in the grain of winter wheat]. *Ahrarni innovatsiyi – Agrarian innovations*, no. 5, pp. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2021.5.2> (in Ukrainian)

16. Gyrka A. D., Viniukov O. O., Gyrka T. V., Bokun O. I., Kulik A. O. (2019) Efficiency of growing winter wheat depending on the soil tillage and sowing systems. *Zernovi kultury – Grain Crops*, vol. 3, no 1, pp. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0061>

17. Korsun S. G., Klymenko I. I., Bolokhovska V. A., Bolokhovskiy V. V. (2019) Translokatsiya vazhkykh metaliv u systemi «grunt – roslyna» za vapnuvannya ta vplyvu biolohichnykh preparativ [Translocation of heavy metals in the soil-plant system during liming and the influence of biological preparations]. *Ahroekolohichnyy zhurnal – Agroecological Journal*, no 1, pp. 29–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163245> (in Ukrainian)

18. Miroshnychenko N. N., Kuts E. A. (2016) Selektivnist pohlynannya vazhkykh metaliv gruntom ta huminovymy kyslotamy za riznykh rivniv pH [Selectivity of absorption of heavy metals by soil and humic acids at different pH levels]. *Hruntознавство – Soil Science*, vol. 17, no. 1–2, pp. 76–82. DOI: [10.15421/041607](https://doi.org/10.15421/041607) (in Ukrainian)

19. Volkogon V. V., Gusev O. V., Volkogon K. I. (2005) Osoblyvosti azotnoho zhyvlennya yachmenyu pry zastosuvanni novoho biolohichnoho preparatu mikrohuminu. Zhyvlennya roslyn: teoriya i praktyka [Peculiarities of nitrogen nutrition of barley when using a new biological preparation microhumin. Plant nutrition: theory and practice]. Kyiv: Logos, pp. 209–213. (in Ukrainian)

20. Ostapchuk M. O., Polishchuk I. S., Mazur O. V., Maksimov A. M. (2015) Vykorystannya biopreparativ – perspektyvnyy napryamok vdoshkonalennya

ahrotekhnolohiy [The use of biological products is a promising direction for improving agricultural technologies]. *Sil'ske hospodarstvo ta lisivnytstvo – Agriculture and Forestry*, no. 2, pp. 5–17. (in Ukrainian)

21. Konovalenko L. I., Vinyukov O. O., Bondareva O. B. (2018) Osoblyvosti nakopychennya floru v grunt i roslynakh v zoni vplyvu tekhnohenezu. [Peculiarities of storage of fluorine in soil and plants in the zone of the influence of technogenesis]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannya – Balanced nature management*, no. 3, pp. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2018.190381> (in Ukrainian)

22. Metodolohiya ta orhanizatsiya naukovykh doslidzen: pidruchnyk (za red. V. O. Druzhyninoyi) [Methodology and organization of scientific research: textbook (ed. V.O. Druzhinina)]. (2010) Vinnytsya: Vydavnytstvo VNTU «UNIVERSUM-Vinnytsya». [in Ukrainian]

23. DSTU 3769 – 98. Barley. Technical conditions. (in Ukrainian)

24. DSTU 3768:2010. Wheat. Technical conditions. (in Ukrainian)

25. Fateyev A. I., Semenov D. O., Miroshnychenko M. M., Lykova O. A., Smirnova K. B., Shemet A. (2013) Spivvidnoshennya shk/sfk u gruntakh Ukrayiny yak pokaznyk rukhomosti mikroelementiv [The ratio of shk/sfk in Ukrainian soils as an indicator of microelement mobility]. *Visnyk ahraryoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, vol.7, pp. 16–19. (in Ukrainian)

26. Minkina T. M., Miroshnychenko N. N., Fateyev A. I., Motuzova G. V., Kryvytska I. A. (2012) Pryrodnyy i antropohennyy fon mikroelementiv v chornozemakh zvychaynykh Pryazov'ya ta Nyzhnoho Donu. Lyudyna ta dovkillya [Natural and anthropogenic background of trace elements in ordinary chernozems of the Azov region and the Lower Don. Man and the environment]. *Problemy neokolohiyi – Problems of neoecology*, no. 3-4, pp. 96–101. (in Ukrainian)

27. Baliuk S., Medvedev V., Vorotintseva L., Shymel V. (2017) Suchasni problemy dehradatsiyi gruntiv i zakhody shchodo dosyahnennya neytralnoho yiyi rivnyi [Problems of degradation of soils and measures on reaching its neutral level]. *Visnyk ahraryoi nauky – Bulletin of Agricultural Science*, vol. 95, no 8, pp. 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201708-01> (in Ukrainian)

28. Viniukov O. O., Konovalenko L. I., Bondareva O. B., Vasylenko T. F. (2017) Vplyv abiotychnykh faktoriv na formuvannya yakosti zerna pshenytsi ozymoyi m'yakoyi v umovakh Donetskoyi oblasti [The influence of abiotic factors on forming grain quality of bread winter wheat in the conditions of the Donetsk region]. *Myronivskyi visnyk – Mironivskyi visnyk*, vol. 5, pp. 114–125. (in Ukrainian)

29. Bondareva O. B., Viniukov O. O., Konovalenko L. I., Chugrii H. A. (2023) Vplyv klimatychnykh i antropohennykh chynnykiv na vmist vazhkykh metaliv u zerni yachmenyu yarohto v umovakh skhidnoyi chastyny Pivnichnoho Stepu Ukrayiny [Influence of climate and anthropogenic factors on the heavy metals content in barley grain in the eastern part of the Northern Steppe of Ukraine]. *Zernovi kultury – Grain Crops*, vol. 7, no. 2, pp. 278–284. DOI <https://doi.org/10.31867/2523-4544/0287> (in Ukrainian)

30. Ekolohichnyy atlas Donetskoyi oblasti [Ecological atlas of Donetsk region]. 2020. 348 p. (in Ukrainian)