

РЕМЕДІАЦІЯ ТЕХНОГЕННО ЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТІВ

Вінюков О. О., Самохвалова В. Л., Бондарева О. Б.

ВСТУП

За посилення мілітарно-техногенних впливів на ґрунти внаслідок російських бойових дій, що тривають за одночасного зростання площ територій хімічного забруднення ґрунтів в Україні, значно актуалізувались питання щодо наукового обґрунтування напрямів відновлення та повернення в господарський обіг забруднених ґрунтів та щодо розроблення методів екологічної реабілітації ґрунтів для зменшення площ мілітарно-техногенного забруднення неорганічними і органічними контамінантами та хімічної деградації ґрунтів у зонах впливу промислових об'єктів¹.

Вивчення та аналіз сучасних стратегій відновлення ґрунтів, ефективних методів і технологій ремедіації забруднених ґрунтів країн ЄС та світу^{2,3,4,5,6,7,8,9,10}, засвідчило створення на їх основі он-лайн баз даних, що містять детальну інформацію про алгоритми прийняття

¹ Samokhvalova, V. Innovative methods to remediate polluted soils. *Soils Under Stress* / Dmytruk, Y., Dent, D. (eds). Springer Nature Switzerland AG. 2021. Pp. 227-239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68394-8_22

² Sustainable Management of Contaminated Land: An Overview. A report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies. Vienna, Umweltbundesamt, 2002. Available from: http://www.commonforum.eu/Documents/DOC/Clarinet/rblm_report.pdf

³ TRC, Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework. [online], Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) / report GSR-2. Washington, D.C., 2011. Available from: <http://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=34>

⁴ Holland K.S., Lewis R.E., Tipton K. et al. Framework for integrating sustainability into remediation projects. *Remediation*. 2011. 21 (3). Pp. 7–38.

⁵ Holland K., Karnis S., Kasner D.A., Butler P.B., Hadley P.W., Nathanail P. et al. Integrating Remediation and Reuse to Achieve Whole-System Sustainability Benefits. *Remediation*. 2013. 23 (2). Pp. 5–17.

⁶ Meuser, H. *Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land. Environmental Pollution*. Springer Netherlands. 2013. 406 p.

⁷ US EPA. Remediation technologies for cleaning up contaminated sites. 2019. <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technologies-cleaning-contaminated-sites>

⁸ US EPA. RE-Powering America's Land Initiative: Tracking Completed Projects on Contaminated Lands, Landfills, and Mine Sites. 2019. https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-10/documents/re_tracking_matrix_final_508_100219.pdf

⁹ US EPA. CLU-IN technologies: Bioremediation overview. 2020. [https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioremediation/cat/Anaerobic_Bioremediation_\(Direct\)/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioremediation/cat/Anaerobic_Bioremediation_(Direct)/)

¹⁰ FAO. Forthcoming. Online Database on Best Management and Remediation Techniques for Polluted Soils. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-pollution/en/>

рішень і чинні ефективні технології управління та відновлення забруднених ґрунтів

ФАО та ЮНЕП у 2021 р. оприлюднили Глобальну оцінку ґрунту у форматі доповіді про забруднення¹¹.

Базові положення документу розроблено Глобальним ґрунтовим партнерством (GSP) ФАО та його міжурядовою технічною Комісією з питань ґрунтів (ITPS) щодо загрози забруднення ґрунтів для здоров'я та добробуту населення світу. Доповідь охоплює масштаби та майбутні тенденції забруднення ґрунту, ризики та наслідки впливу забруднення ґрунту на здоров'я довілля та продовольчу безпеку.

Стійкість ремедіації ґрунту (відновлення та регенерація функціонування) визначено головним фактором у процесі прийняття рішень щодо моніторингу, проектування і впровадження стратегій ремедіації забруднених ґрунтів.

Ремедіація ґрунту розглядається як процес відновлення забрудненого ґрунту до початкового стану або зниження концентрації забруднюючих речовин до прийняттого рівня. Передбачає етапність, що потребує ретельного планування та виконання розроблених алгоритмів для гарантування ефективності відновлення ґрунту за впливу забруднення. Визначено загальні процедури відновлення ґрунту для оцінювання доцільності, проектування, застосування та оцінки ефективності дій за ремедіації ґрунтів забруднених територій.

Базовими елементами стратегії використання ґрунтових ресурсів у світі є забезпечення виконання ґрунтами екологічних функцій, якості надання широкого спектру екосистемних послуг, збереження біорізноманіття^{12,13,14,15}.

В Україні розроблено концептуальні положення щодо відновлення та використання хімічно забруднених ґрунтів земельних ділянок з урахуванням особливостей їх моніторингу за мілітарно-техногенних впливів¹⁶.

¹¹ FAO and UNEP. *Global assessment of soil pollution: Report*. Rome. 2021. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>

¹² Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. *Soil Pollution: a hidden reality*. Rome, FAO. 2018. 142 p.

¹³ FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC. *State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities*, Report 2020. Rome, FAO. 2020. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>

¹⁴ FAO and UNEP. *Towards Zero pollution: Launch of the Global Assessment of Soil Pollution: Report*. Rome. 2021. 846 p. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>

¹⁵ FAO and UNEP. 2021. *Global assessment of soil pollution. Summary for policy makers*. Rome, FAO. 84 p. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>.

¹⁶ Baliuk S. A., Kucher A. V., Plisko I. V. (Ed.) (2024). *Conceptual approaches to the restoration of soils damaged by the armed aggression: monograph*. Kyiv, Agrarna nauka. 216 p. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-604-4>

Запропоновано напрями консолідації національних і міжнародних зусиль для відновлення порушених війною ґрунтів України; концептуально-методологічні підходи до відновлення пошкоджених ґрунтів. Визначено вплив збройної агресії та бойових дій на ґрунтовий покрив України, основні види мілітарної деградації ґрунтів. Запропоновано алгоритм оцінювання збитків, завданих ґрунтам унаслідок збройної агресії, визначено основні заходи з їх відновлення на етапі воєнного стану та повоєнної відбудови України за такими напрямками: законодавче, нормативно-методичне, інформаційне, технологічне, кадрове та фінансове забезпечення.

Важливою складовою у контексті поліпшення екологічного стану забрудненої системи ґрунт-рослина за мілітарно-техногенних впливів на агроценози є дослідження ефективності використання розроблених методів і заходів з відновлення та екологічної реабілітації хімічно забруднених ґрунтів, системи ґрунт-рослина^{17,18} за умов комплексного впливу на ґрунти мілітарного фактору фізичної, хімічної та біологічної їх деградації, зокрема у Донецькій області, що характеризується значними рівнями мілітарно-техногенних впливів на агроценози особливо в зонах діючих підприємств енергетичного виробництва, зокрема Курахівської ТЕС (потужність 1460 МВт)¹⁹.

До демонтажу у 2024 р. Курахівська ТЕС працювала під обстрілами, з початком повномасштабної російської війни в Україні стала справжнім енергетичним форпостом. Визначені збитки через обстріли території Курахівської ТЕС склали майже 1 млрд. грн.

Вище наведене обумовлює актуальність досліджень, спрямованих на пошук шляхів розв'язання важливої науково-прикладної проблеми зменшення мілітарно-техногенного навантаження на довкілля, поліпшення екологічного стану забрудненої системи ґрунт-рослина за мілітарно-техногенних впливів на агроценози.

¹⁷ Samokhvalova V.L. Monitoring of chemically contaminated soils as a result of military operations in Ukraine. *Current state of the soil cover in Ukraine in the conditions of armed aggression of the Russian Federation: Abstracts of the International Science and Practice conference* [Electronic edition], October 20, 2022. Kharkiv: NSC "ISSAR named after O.N. Sokolovsky", 2022. 174 p. P. 122-127. <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>

¹⁸ Samokhvalova V.L. Chemically contaminated soils as a result of military operations: degradation and measures for ecological rehabilitation of ecosystem services. *Current state of the soil cover in Ukraine in the conditions of armed aggression of the Russian Federation: Abstracts of the International Science and Practice conference* [Electronic edition], October 20, 2022. Kharkiv: NSC "ISSAR named after O.N. Sokolovsky", 2022. 174 p. P. 127-131. <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>

¹⁹ Сябер М.О. Курахівська теплова електростанція. *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / ред. рада: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2016. <https://esu.com.ua/article-51781>

1. Формування зон забруднення ґрунтів важкими металами в умовах впливу Курахівської ТЕС

В Донецькій області поряд з підприємствами металургійного виробництва енергетичні виробництва є основними джерелами забруднення сільгоспугідь важкими металами. У районах ТЕС, які працюють на вугіллі, ґрунт у значній мірі забруднюється продуктами згорання палива, зола якого практично містить усі техногенні метали.

Зважаючи на те, що дослідні ділянки підпадають під вплив аерогенних викидів Курахівської ТЕС, проведено експериментальне дослідження впливу відстані і напрямку від джерела техногенного надходження важких металів в агроландшафти на вміст різних форм цих елементів в ґрунті. Вивчалися цинк, мідь, свинець і кадмій, які за даними екологів найбільш поширені промислові полютанти в Донецькому регіоні.

Аналіз статистичних даних показав, що щорічно з техногенними аерогенними емісіями Курахівської ТЕС в оточуюче середовище надходить 5,0 т важких металів та їх з'єднань. Серед них 1,3 т цинку, 0,8 т свинцю, 0,28 т міді та 0,08 т кадмію. Середньорічна роза вітрів свідчить, що в Донецькій області переважають східні, південно-східні і північно-східні вітри. Внаслідок цього найбільше розсіювання викидів ВМ буде в напрямку пануючих вітрів по векторах західного і північно-західного напрямку.

Аналітичними вимірюваннями встановлено (табл. 1), що в зоні відстані до джерела техногенного постачальника важких металів до 2 км в напрямі пануючих вітрів спостерігається найбільша концентрація валових і рухомих форм кадмію, свинцю, міді. З віддаленням від джерела забруднення до 10 км спостерігається зменшення вмісту цих елементів. Найбільше розсіювання цинку відбувається з віддаленням від енергетичного виробництва, на відстані до 30 км за роззою вітрів відмічається перевищення фону.

Перевищення фонового загального вмісту Cd і Cu було на відстані 2 км. Загальний вміст Pb перевищував фон не залежно від відстані і напрямку пануючих вітрів. Вміст рухомих форм Cd, Pb, Zn, Cu в ґрунтах, що знаходяться в зоні дії викидів ТЕС 10–30 км практично не змінюється і значно залежить від напрямку. Більші концентрації відповідають напрямку пануючих вітрів.

Аерогенні емісії енергетичних виробництв, окрім важких металів, містять також значну кількість кислотних компонентів – оксиди азоту, сірки, які в атмосфері утворюють відповідні кислоти. Так, на Курахівській ТЕС в атмосферу щорічно надходить пилу, який містить важкі метали, 47 т, SO₂ 49 т, NO_x 8 т. Це впливає на фізико-хімічні властивості складових викидів, може зумовлювати перехід ВМ із

оксидів у більш розчинні сполуки, наприклад нітрати і сульфати. За умов високого вмісту кислотних компонентів важкі метали будуть розсіюватись у вигляді аерозолів на значні відстані від джерела забруднення.

Таблиця 1

**Вміст важких металів в ґрунті в залежності від напрямку
і відстані від промислового об'єкту**

Напрямок	Відстань, км	Вміст ВМ в ґрунтах мг/кг			
		Cd	Pb	Zn	Cu
Захід, північ. захід	2	1,1/0,19*	20,8/1,9	58/6,2	28,0/6,5
	10	0,9/0,12	18,0/1,7	70/6,1	21,0/5,0
Захід, північ. захід	20	0,7/0,09	17,3/1,8	69/5,6	20,6/4,8
Захід, північ. захід	30	0,8/0,10	16,9/1,5	65/5,6	19,7/4,7
Південний, схід	10	0,3/0,06	15,0/0,6	47/4,8	16/1,8
Південний, схід	20	0,3/0,05	14,76/0,4	44/4,6	13,5/1,7
Загальний вміст ²⁰		1,0	13,0	55,0	22,0

**чисельник – валові форми ВМ, знаменник – рухомі форми ВМ (рН 4,8)*

Вірогідність забруднення рослинної продукції важкими металами багато в чому визначається спрямованістю процесів трансформації сполук цих елементів при надходженні у ґрунт, наслідком чого є зміна ступеня доступності їх для кореневої системи рослин. Більш чітке уявлення про рухомість важких металів в ґрунті дає кількісний показник рухомості – ступінь рухомості (ω , %), який було розраховано із співвідношення концентрації рухомих форм елемента до концентрації його валової форми. Результати розрахунків наведені в табл. 2.

²⁰ Самохвалова В. Л., Фатєєв А. І., Лучникова Є. Еколого-геохімічна оцінка фонового рівня вмісту різних форм мікроелементів ґрунту. Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2011. Вип. 55. С. 125–133.

Таблиця 2

Вплив відстані і напрямку пануючих вітрів на рухомість важких металів у ґрунті

Напрямок	Відстань, км	Ступінь рухомості ω , %			
		Cd	Pb	Zn	Cu
Захід, північ. захід	2	17,2	9,1	10,7	23,2
	10	13,3	9,4	8,7	23,8
Захід, північ. захід	20	12,9	10,4	8,1	23,3
Захід, північ. захід	30	12,5	8,8	8,6	23,8

Порівняння цих показників дає змогу зробити висновок про більшу рухливість міді. Ступінь рухливості кадмію суттєво більша від ступеня рухливості свинцю, не зважаючи на те, що концентрація рухомих форм свинцю майже на порядок вища за концентрацію рухомих форм кадмію.

В напрямку пануючих вітрів ступінь рухливості міді практично не змінюється в залежності від відстані до джерела надходження важких металів. Для цинку така поведінка характерна на відстані 10–30 км.

Для визначення ризиків забруднення рослинної продукції важкими металами експериментально досліджено вміст потенційно рухомих форм важких металів у ґрунті в напрямку пануючих вітрів в залежності від відстані до джерела техногенного надходження важких металів в агроландшафти, а також на основі цих даних проведена оцінка рівня техногенного навантаження для ґрунтів різної буферності. Вміст потенційно рухомих форм важких металів характеризує їх депоновану кількість у ґрунті, яка може за певних умов стати доступною рослинам.

Для оцінки впливу техногенного навантаження доцільно порівняти вміст важких металів у ґрунті з їх фоновими концентраціями з використанням коефіцієнту техногенної концентрації і сумарного показника поліелементного забруднення відносно фону. Було використано сумарний показник S_{Σ} Z_c , значення якого проградуировані за класами небезпеки²¹. Критичні значення, які дозволяють охарактеризувати сумарне забруднення Z_c за рівнем небезпеки такі: $Z_c < 16$ забруднення вважається безпечним; $16 < Z_c < 32$ – помірно безпечним; $32 < Z_c < 128$ –небезпечним, $Z_c > 128$ – надзвичайно небезпечним.

З використанням поправочного коефіцієнту на токсичність, запропонованого Водяницьким Ю. М., розраховували показник

²¹ Польовий А. М., Гуцал А. І., Дронова О. О. Ґрунтознавство: навч. посібник для студентів вищ. навч. закладів. *Екологія*. 2013. 668 с.

сумарного забруднення $Z_{ст}$ за формулою: $Z_{ст} = \sum(K_{ki} K_{ti}) - (n - 1)$, де K_{ti} – коефіцієнт токсичності i -го елемента. $K_{ki} = C_i/C_{if}$, де C_{if} і C_i – фоновий і фактичний вміст i -го елемента в ґрунті. Для міді $K_{ti}=1,0$, для цинка, кадмію і свинцю $K_{ti}=1,5$.

Розрахунки проведені для ґрунтів різною буферною здатністю – високобуферні (табл. 3) і малобуферні (табл. 4). Ґрунти різної буферної здатності характеризуються за Фатєєвим А. І. різним фоновим вмістом важких металів.

Таблиця 3

**Сумарний показник поліелементного забруднення (Z_c)
високобуферного ґрунту в зоні впливу аеротехногенних викидів
Курхівської ТЕС**

Відстань , км	Потенційно рухомі форми								Zc
	Cu		Zn		Pb		Cd		
	мг/кг	перевищення фону (K _{сф})	мг/кг	перевищення фону (K _{сф})	мг/кг	перевищення фону (K _{сф})	мг/кг	перевищення фону (K _{сф})	
0,5	62	12,4	88,3	8,83	37,8	7,56	0,96	3,20	38,79
1	40,1	8	64,1	6,41	21,5	4,3	0,64	2,13	24,27
3	31,3	6,3	61,3	6,13	17,5	3,5	0,44	1,47	19,95
5	23,5	4,7	58,2	5,82	15	3	0,41	1,37	16,98
7	17,1	3,4	51,8	5,18	14,4	2,88	0,34	1,13	14,19
15	15,4	3,1	45,7	4,57	14,9	2,98	0,37	1,23	13,28
НСР 0,5	2,6		4,9		1,3		0,08		
Фон [20]	5		10		5		<0,3		

Для високобуферних ґрунтів рівень забруднення важкими металами на відстані 0,5 км характеризується як небезпечний, на відстані до 5 км – помірно безпечний, при відстані від 7 км і далі – безпечний. Однак при цьому треба враховувати ризик забруднення рослин важкими металами некореневим фоліантним шляхом.

Отримані результати вказують, що для малобуферних ґрунтів рівень забруднення важкими металами на відстані 0,5 км характеризується як надзвичайно небезпечний і далі на відстані до 15 км – небезпечний.

2. Руїнування ґрунтової поверхні під мілітарним впливом

Дослідженням території, що зазнали мілітарного впливу виявлено руїнування ґрунтової поверхні з утворенням виврів; засмічення металевими уламками, забруднення хімічними речовинами у місцях вибухів снарядів та ракет. Зокрема, встановлено перевищення фонових рівнів вмісту у ґрунті металів-токсикантів Cd, Pb, Cu, Ni. Отримані результати ґрунтових проб вказують на перевищення над фоновими

концентрацій забруднюючих речовин в ґрунтах в місцях бойових дій в 1,1–1,3 рази для ртуті, кадмію, свинцю, у місцях потрапляння снарядів або воронок досягало 7–17 раз.

Таблиця 4

**Сумарний показник поліелементного забруднення (Zc)
малобуферного ґрунту в зоні впливу аеротехногенних викидів
Курахівської ТЕС**

Відстань, км	Потенційно рухомі форми								Zc
	Cu		Zn		Pb		Cd		
	мг/кг	переві- щення	мг/кг	переві- щення	мг/кг	переві- щення	мг/кг	переві- щення	
0,5		фону (K _к)		фону (K _к)		фону (K _к)		фону (K _к)	162,31
1	40,1	40,1	64,1	32,05	21,5	8,6	0,64	6,40	107,68
3	31,3	31,3	61,3	30,65	17,5	7	0,44	4,40	91,38
5	23,5	23,5	58,2	29,1	15	6	0,41	4,10	79,30
7	17,1	17,1	51,8	25,9	14,4	5,76	0,34	3,40	66,69
15	15,4	15,4	45,7	22,85	14,9	5,96	0,37	3,70	61,17
НСР _{0,5}	2,6		4,9		1,3		0,08		
Фон [20]	1		2		2,5		<0.1		

Досліджено наявні вирви (рис. 1), що утворено різними видами застосованої агресором зброї за масованих обстрілів дослідженої території і ранжовано характеристики вирв відповідно до ТТХ видів зброї (табл. 1). Встановлено, що найбільшу кількість вирв досліджених ділянок утворено за обстрілів з використанням установки «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм та мінометів з 82-мм осколково-фугасними снарядами та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм.

Встановлено, що найбільшу кількість вирв досліджених ділянок утворено за обстрілів з використанням установки «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм та мінометів з 82-мм осколково-фугасними снарядами та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм. Апробацію нових методів хімічної та біологічної ремедіації хімічного забруднення ґрунту було зосереджено саме на таких порушених земельних ділянках.

На рис. 2 наведено наявні табличні дані щодо елементного статусу ґрунтів фонових територій та зон впливу атмотехногенних емісій, зокрема ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС» за дослідження хімічно забруднених ґрунтів земельних ділянок, зокрема Волноваського та Покровського районів Донецької області; ґрунтів зон ризику хімічного забруднення і фонових територій та використанням розробленої

системи діагностичних показників властивостей ґрунтів і методів діагностування.



Рис. 1. Досліджена вирва (діаметр до 3,5 м) обстежених хімічно забруднених територій зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС»

Таблиця 5

Індикаторні характеристики мілітарного впливу на ґрунти досліджених земельних ділянок

Спряжені характеристики окремих ТТХ видів зброї і діаметру вирв				
Види зброї, що використано агресором для обстрілів	Реактивна система залпового вогню «Ураган», калібр 220 мм	Міномети з 152-мм снарядами, гармати, що буксируються, гаубиці, самохідні гаубиці, калібр 152 мм	Установки «Град», польові і самохідні гаубиці; калібр 120 мм	Міномети з 82-мм осколко-вим снаряди та осколко-во-фугасними мінами, калібр 82 мм
Діаметр вирв, що утворюють різні види застосованої зброї	близько 7 м	4–6 м	2,5–3,5 м	близько 1 м

Таблиця 1 - Вміст мікроелементів у ґрунтах Донецької області (ААБ-рпН 4.8), мг/кг

№	№	№	область	район	тип ґрунту	Сд	Сп	Сс	Сс	Fe	Mn	Mo	Zn
10	49 004838	37 497597	Донецька	Славянський	14-18-20	0.0954	0.244	0.078	0.134	1.181	22.751	1.081	0.765
20	49 116077	37 782075	Донецька	Красноградський	14-18-19	0.0863	0.144	0.065	0.151	0.745	20.565	1.165	0.907
30	49 008108	38 001124	Донецька	Красноградський	14	0.159	0.254	0.105	0.11	3.721	18.715	0.941	0.121
40	48 668064	37 242564	Донецька	Олександрійський	14	1.76	0.32	0.075	0.154	1.374	8.861	0.625	0.571
50	48 668064	37 837641	Донецька	Костянтинівський	14-20	0.171	0.231	0.121	0.075	1.118	14.635	1	0.131
60	38 122102	48 596132	Донецька	Артемівський	14	0.0854	0.524	0.7054	0.1254	0.4054	22.994	1	0.734
70	37 008614	48 331294	Донецька	Красноградський	14	0.086	0.344	0.3954	0.0354	0.4754	26.241	2.254	0.671
80	37 500874	48 334564	Донецька	Костянтинівський	14	0.061	0.254	0.431	0.0354	0.4254	23.764	0.641	0.364
90	38 337890	48 334564	Донецька	Артемівський	19	0.1054	0.274	0.321	0.051	0.461	31.635	0.574	1.331
100	36 997542	47 909502	Донецька	Великовисоцький	15-16	0.114	0.114	0.291	1.2254	0.371	31.441	2.591	1.731
110	37 500874	47 870264	Донецька	Маріупольський	15	0.1154	0.254	0.2454	0.151	0.921	27.7654	0.771	1.281
120	37 953348	47 853921	Донецька	Старобільський	19-15	0.151	0.181	0.1954	0.071	0.431	33.2754	1	0.781
130	36 501184	47 85661	Донецька	Авдіївський	19-15	0.1214	0.144	0.3754	0.0654	0.2154	31.8154	1.244	1.854
140	37 003894	47 667514	Донецька	Великовисоцький	16	0.071	0.174	0.281	0.121	0.2454	32.4154	2.331	1.111
150	37 734832	47 667514	Донецька	Великовисоцький	15	0.1254	0.151	0.341	0.131	0.331	24.9954	1.791	1.291
160	38 364054	47 664281	Донецька	Авдіївський	15-18	0.0754	0.154	0.4254	0.1854	0.2754	23.721	2.271	1.941
170	37 252734	47 330781	Донецька	Волноваський	15	0.0654	0.191	0.241	0.171	0.441	23.8954	1.831	1.241
180	37 500874	47 334604	Донецька	Волноваський	19-15	0.0954	0.254	0.4954	0.111	0.561	24.961	1.071	1.331
190	38 001124	47 330781	Донецька	Новоазівський	15-13	0.0854	0.11	0.561	0.1054	0.3454	32.1154	1.291	1.831
200	37 154284	47 050126	Донецька	Петровський	16	0.0754	0.121	0.6354	0.121	0.2354	27.1954	2.114	1.631
210	38 118067	47 134574	Донецька	Новоазівський	13	0.1	0.194	0.344	0.181	0.181	28.8654	1.131	1.331

Рис. 2. Табличні дані (фрагмент) щодо елементного статусу ґрунтів Донецької області, що було залучено до аналізувань

2. Діагностування якості хімічно забруднених ґрунтів

Дослідження земельних ділянок зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС» проводились на територіях Волноваського і Покровського районів Донецької області для екологічного контролю. Методика діагностування якості хімічно забруднених ґрунтів різних типів для індикації їх екологічного стану базується на системі діагностичних показників властивостей ґрунтів, спряженості набору методів діагностування та нових методичних підходах щодо діагностування якості ґрунтів за природних умов та територій впливу хімічного забруднення із забезпеченням більшої керованості та прогнозованості екологічного стану ґрунтів за прискорення отримання точних діагностичних оцінок якості ґрунтів за елементним статусом, прогнозування надлишку та нестачі ME і BM у ґрунтах різної буферної здатності для проведення наукового, виробничого та кризового моніторингу.

Визначено фонові рівні вмісту валових форм ME у ґрунтах (табл. 5), що є недостатнім для визначення ступеня їх забруднення хімічними елементами.

Таблиця 5

**Розраховані рівні вмісту МЕ у ґрунтах різної буферної здатності
Донецької області за результатами діагностичного оцінювання
даних щодо елементного статусу ґрунтів**

Ґрунти	МЕ								
	Zn	Cd	Ni	Co	Fe	Mn	Pb	Cu	Cr
Валовий вміст МЕ									
Високобуферні ґрунти	55	1	20	20	27492	534	13	22	48
Малобуферні ґрунти	15	1	15	14	11428	332	7	11	18
Рухомі форми МЕ									
Високобуферні ґрунти	$\frac{1,6^{1)}}{10^{2)}$	$\frac{0,1}{<0,3}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{0,6}{3,5}$	$\frac{2}{600}$	$\frac{43}{150}$	$\frac{0,8}{5}$	$\frac{0,5}{5}$	$\frac{0,1}{4,5}$
Малобуферні ґрунти	$\frac{0,8}{2}$	$\frac{0,08}{<0,1}$	$\frac{0,5}{1,5}$	$\frac{0,05}{0,5}$	$\frac{1,5}{300}$	$\frac{22}{100}$	$\frac{0,3}{2,5}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,06}{2}$

Примітка: ¹⁾ – екстрагент ацетатно-амонійний буферний розчин, рН 4,8;

²⁾ – екстрагент 1н НСІ

Валовий склад хімічних елементів, як і вміст валових форм МЕ, у ґрунтах є показником, що характеризує базові властивості ґрунтів. Зміни їх спостерігаються лише при аварійних ситуаціях (гостре забруднення) або за поліелементного хронічного забруднення.

Для отримання об'єктивних діагностичних оцінок мікроелементного статусу ґрунтів (нестача МЕ, надлишок ВМ), як кінцевої мети фонового моніторингу, необхідними є дані як щодо валового МЕ складу ґрунтів так і вмісту рухомих форм МЕ певної території регіону. Однак валовий вміст елемента в ґрунті, не завжди відображає дійсну його міграційну здатність у системі ґрунт-рослина, тому що в ґрунті водночас присутні різні форми елементів, що відрізняються міцністю зв'язку й доступністю для поглинання рослинами. Отже, для більш точної оцінки зв'язку рухомості МЕ і його міграції слід використовувати показники вмісту рухомих форм МЕ в ґрунті.

На базі наявних даних проведення обстежень ґрунтів та визначення забруднення ґрунту певним хімічним елементом проведено визначення вмісту валових форм певного хімічного елемента на дослідженій ділянці.

За формулою:

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{n_i \bar{c}_i}{s_i^2}}{\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{s_i^2}},$$

де: Θ – середньозважене значення у об'єднаній вибірці (регіональний фон);

– m – кількість вибірок, які об'єднують;

- n_i – кількість проб у вибірці;
- c_i – середній вміст елементу у i -тій вибірці;
- s_i^2 – оцінка стандартного відхилення,

визначають регіональний ФРВ МЕ в ґрунтах на незабруднених територіях, дані обробляють з використанням математико-статистичних методів, на базі яких створюють електронні картосхеми ФРВ МЕ в ґрунтах та відповідною градацією їх вмісту, які порівнюють з даними про регіональний вміст МЕ і за умови відхилення показників в бік збільшення або зменшення судять про нестачу або надлишок МЕ в ґрунтах, а межею відліку визначають відсутність різниці не більше ніж 30% випадках.

Такий алгоритм забезпечує можливість отримати об'єктивні діагностичні оцінки щодо вмісту МЕ/ВМ у ґрунті, прогнозувати його екологічний стан при зниженні трудомісткості, підвищенні рівня інформативності та підтримки контролю якості ґрунтів різної буферної здатності, проводити її оцінку та оцінку небезпеки чи ризику забруднення і нестачі МЕ за показниками вмісту хімічних елементів, прогнозувати якість рослинної продукції, одержаної на ґрунтах з різними рівнями вмісту МЕ/ВМ за результатами проведення відповідного контролю якості за фоновим моніторингу та моніторингу забруднення в зонах впливу джерел атмотехногенних емісій, що дозволить підвищити окупність внесення туків та мікродобрив на 20%.

3. Метод поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина

Спектр проблемних питань щодо необхідності скорочення площ техногенно забруднених ґрунтів Донецького регіону, зокрема забруднених неорганічними та органічними контамінантами, значно актуалізувався за посилення воєнно-техногенних впливів на ґрунтовий покрив.

Результатами досліджень ґрунтів земельних ділянок у складі агроценозів, що зазнали впливу хімічного забруднення ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС», встановлено пріоритетність забруднення системи ґрунт-рослина рухомими сполуками Cd, Pb, Zn і Cu на відстанях до 3 км, 10 км, 20 км і 30 км від центру емісій забруднювачів об'єкту енергетичного виробництва (табл.6).

Таблиця 6

Вміст важких металів в рослинах в зонах впливу різних рівнів техногенного навантаження

Об'єкт аналізу	Вміст ВМ, мг/кг											
	Cu (ГДК=10)			Pb (ГДК=0,5)			Zn (ГДК=50)			Cd (ГДК=0,1)		
	Відстань до джерела викидів, км											
	≤ 3	5-15	>30	≤ 3	5-15	>30	≤ 3	5-15	>30	≤ 3	5-15	>30
Різотрав'я	7,7	—	2,36	8,7	3,5	0,42	57,0	49,1	18,5	0,63	0,44	0,30
Оз.												
пшениця:												
зерно	4,5	2,5	1,2	2,5	1,3	0,7	37,0	19,1	19,3	0,78	0,51	0,48
солома	4,9	3,7	1,9	2,8	2,3	1,0	42,2	22,5	22,2	0,96	0,58	0,52
Ячмінь												
ярий:												
зерно	10,5	6,5	6,6	1,8	1,0	0,7	26,4	14,0	14,7	1,28	0,56	0,38
солома	14,4	11,1	9,3	1,9	1,3	0,9	31,9	17,0	15,0	1,62	0,45	0,51

З віддаленням від джерела забруднення спостерігається зменшення вмісту валових форм Cd, Pb, Zn, Cu. По інтенсивності міграції із ґрунту в рослини пшениці озимої і ячменю ярого елементи розташовуються в ряд $Zn > Cu > Pb > Cd$.

Новий метод поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина із використанням нового хелатно-гуматного препарату Смарагд (ХГП Смарагд)²² застосовано за нових умов мілітарного впливу на систему ґрунт-рослина.

ХГП Смарагд з удобрювально-стимулюючим ефектом містить Fe, Mn, Zn, Cu, Co, Mo і B у вигляді хелатних сполук з використанням комплексону ОЕДФ (оксиетилідендифосфоновна кислота), з подальшим введенням у хелатний розчин препарату відомого гумату з органічної сировини природного походження. Агенти препарату взаємодіють у визначеному співвідношенні, що забезпечує ремедіаційний ефект за хімічного забруднення системи ґрунт-рослина. Новий хелатно-гуматний препарат створено для обробки насіння, підживлення рослин та внесення у ґрунт за умов хімічного забруднення ВМ.

Суть нового методу хімічної ремедіації забрудненого ВМ ґрунту полягає у наступному: екологічна реабілітація хімічно забруднених чорноземних ґрунтів с.-г. використання із застосуванням розробленої ефективної композиції нового хелатно-гуматного препарату Смарагд у системи ґрунт-рослина зон атмотехногенного впливу ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС» та зон порушених ґрунтів земельних ділянок за

²² Пат. на корисну модель 135145 UA, МПК (2006): C05B 11/02 (2006.01), G01N 33/24 (2006.01), C05D 11/00 Спосіб одержання хелатно-гуматного препарату Смарагд з удобрювально-стимулюючим ефектом для поліпшення екологічного стану системи ґрунт – рослина / Самохвалова В.Л., Бублик В., Скрильник Є.В. та ін. № u201806925; заявл. 20.06.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл.12. 7 с.

діаметрів вирв від 1 м до 4 м з подальшою ідентифікацією видів зброї у спряженні з окремими її ТТХ та попереднього визначення екологічного стану системи ґрунт – рослина.

Метод поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина базується на хімічній ремедіації забруднення ВМ використанням нової композиції ХГП Смарагд та на встановлених закономірностях транслокації ВМ і МЕ у системі ґрунт-рослина. Забезпечує зменшення надходження ВМ у продукцію рослинництва, вирощуваної за умов хімічного забруднення; оптимізацію мікроелементного складу рослин та відновлення їх продуктивності за мінімізації впливу хімічного забруднення та забезпечення екологічної безпеки за відтворення родючості ґрунту, поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина.

Внесення препарату Смарагд у ґрунт проводили у дозі 2,5-3 л /га та 1,5-2 л/т – для обробки насіння; 2,5-3 л/га – для підживлення рослин у фазі активного їх росту і розвитку, із подвоєнням внесених доз препарату за встановленого поліелементного забруднення ґрунту Cd, Pb і Zn. Після відбирання проб ґрунтів і рослин проводили визначення показників вмісту МЕ у ґрунті та рослинах, продуктивності тест-рослин.

Результати апробації порівнювали з прийомами і методами хімічної ремедіації та екологічної реабілітації системи ґрунт-рослина за комплексних негативних впливів хімічного забруднення та мілітарного фактору, з контрольним варіантом без застосування препарату Смарагд за впливу хімічного забруднення та мілітарного фактору.

Результатами фенологічних спостережень за дослідження впливу ХГП Смарагд на урожайність ячменю (*Hordeum vulgare*) та показники якості і екологічної безпеки зерна і соломи на хімічно забруднених ґрунтах, встановлено позитивний вплив ХГП Смарагд на показники структури урожаю – польової схожості та кущистості тест-культури на забруднених ґрунтах. Зокрема, польова схожість ячменю збільшилась на 4,5 % порівняно з контрольним варіантом, де цей показник становив 87,5%; показник кущистості тест-культури зріс від 1,7 (контроль) до 2,3 (варіант застосування ХГП Смарагд); коефіцієнт кушіння підвищився до 1,5-1,7 порівняно з продуктивною кущистістю у 1,3 контролю.

На обраних дослідних ділянках (0-3 км, 3-10 км за середньорічною розою вітрів та найбільшого розсіювання викидів ВМ) визначено ступінь техногенного впливу Курахівської ТЕС на агрофітоценоз ячменю із урахуванням застосування ХГП Смарагд у системі ґрунт-рослина за умов впливу хімічного забруднення та мілітарного фактору. Встановлено позитивний вплив застосування ХГП Смарагд на показники прибавок врожайності тест-культури (*Hordeum vulgare*)

порівняно з контролем, що свідчить про відновлення продуктивності культур фітоценозу (рис. 3). Додатковий урожай ячменю ярого на варіантах з використанням ХГП Смарагд на забруднених ґрунтах складав 0,52 т/га (18%) та 0,45 т/га (16%).



Рис. 3. Вплив застосування ХГП Смарагд на урожай *Hordeum vulgare*

Досліджено вплив ХГП Смарагд на акумуляцію ВМ тест-рослинами ячменю за умов впливу атмотехногенних емісій забруднювачів і мілітарного впливу (табл. 9).

Застосування ХГП Смарагд запропонованим способом у системі ґрунт-рослина за умов впливу викидів забруднювачів Курахівської ТЕС сприяло зниженню вмісту Cd у зерні ячменю на 18 %, вегетативній масі – на 28 %. За мілітарного впливу та хімічного забруднення системи ґрунт-рослина ВМ використання запропонованого методу хімічної ремедіації сприяло зниженню вмісту Cd у зерні ячменю на 27 %, у вегетативній масі – на 23 %.

За забруднення ВМ використання ХГП Смарагд забезпечило зниження вмісту Pb у зерні ячменю на 24 %, вегетативній масі – на 24%; за мілітарного впливу – зниження вмісту Pb відповідно становило 15 % і 18 %.

Таблиця 9

Вплив застосування ХГП Смарагд на вміст металів-токсикантів у рослинах *Hordeum vulgare*

Варіанти дослідів	Вміст металів-токсикантів у тест-рослинах, мг/кг		
	Cd	Pb	Zn
1. Контроль (система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів Курахівської ТЕС)	<u>0.11</u> ¹ 0,64 ²	<u>0.59</u> 3,42	<u>50.5</u> 60,4
2. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + ХГП Смарагд	<u>0.09</u> 0,46	<u>0.45</u> 2,60	<u>40.75</u> 45,9
3. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + мілітарний фактор	<u>0.13</u> 0,69	<u>0.65</u> 3,8	<u>52.9</u> 56,9
4. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + мілітарний фактор + ХГП Смарагд	<u>0.08</u> 0,49	<u>0.50</u> 2,80	<u>42.52</u> 47,2
Примітка: ¹ чисельник – вміст ВМ у зерні; ² знаменник – вміст ВМ у вегетативній масі тест-культури.			
ГДК ВМ у зерні	0,1	0,5	50,0
ГДК ВМ у вегетативній масі рослин	0,3	5,0	50,0

Вміст Zn у тест-рослинах також зменшився за застосування ХГП Смарагд в зонах емісій забруднювачів енергетичного виробництва. Зокрема, встановлено зниження вмісту Zn у зерні на 19,3 % та на 24 % у вегетативній масі ячменю ярого. За впливу мілітарного фактору використанням ХГП Смарагд досягнуто зменшення вмісту Zn на 16 % у зерні, на 22 % у вегетативній масі тест-культури.

Отже, отриманими результатами з апробації нового методу поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина за воєнно-техногенних впливів в зоні Курахівської ТЕС встановлено: удобрювально-стимулюючий і ремедіаційний ефекти ХГП Смарагд за рахунок створення та використання нової ефективної композиції препарату із забезпеченням планованого ресурсозбереження на 10–15%; нове добриво не має обмеження на жорсткість води; є придатним до використання на карбонатних ґрунтах; рідинна форма препарату та добра розчинність у воді складових запропонованої композиції надає можливість споживачам отримати його робочі розчини в широкому діапазоні співвідношення хелат-гумат у польових умовах у необхідних дозах в залежності від складу ґрунту і потреби рослин у поживних речовинах із одночасним спрощенням транспортування та здешевлення його використання; забезпечення покращення адаптогенних властивостей та відновлення продуктивності рослин за умов забруднення ВМ і мілітарного впливу за рахунок зменшення надходження ВМ і оптимізації мікроелементного складу тест-рослин;

поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина за мінімізації хімічного забруднення воєнно-техногенних впливів; придатність методу на чорноземних ґрунтах порушених земельних ділянок внаслідок обстрілів з установок «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм і мінометів з 82-мм осколковыми снарядами та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм за виявлених діаметрів вирв від 1 м до 4 м для мінімізації комплексних негативних впливів мілітарного фактору та хімічного забруднення на систему ґрунт-рослина та для зниження інтенсивності процесів хімічної і біологічної деградації ґрунтів.

Метод рекомендовано до впровадження у господарствах різних форм власності Донецької області, що спеціалізуються на виробництві зернових культур на територіях з ризиками забруднення та комплексних негативних впливів мілітарного фактору, хімічного забруднення для зниження інтенсивності процесів хімічної деградації ґрунтів, відновлення їх родючості за воєнно-техногенних впливів, повернення ґрунтів земельних ділянок у господарський обіг.

4. Метод активізації біологічного потенціалу ґрунту для біоремедіації хімічно забрудненої системи ґрунт – рослина

Значення розроблених заходів з відновлення і екологічної реабілітації ґрунтів Донецького регіону значно зросло за умов комплексного впливу на ґрунти мілітарного фактору фізичної, хімічної та біологічної їх деградації внаслідок російських бойових військових дій в Україні.

Метод активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої важким металами (ВМ) системи ґрунт-рослина²³ застосовано на хімічно забруднених ВМ ґрунтах у зоні техногенного впливу енергетичного виробництва ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС і на окремих земельних ділянках за впливу мілітарного фактору на ґрунти внаслідок російських воєнних дій у Донецькій області (Волноваський район, Донецька область, загальна площа 0,5 га). Тест-культура – озима пшениця (*Triticum aestivum* L.).

Виявлено руйнування ґрунтової поверхні з утворенням вирв у місцях вибухів снарядів; засмічення металевими уламками, забруднення хімічними речовинами. Отримані результати ґрунтових проб вказують на перевищення над фоновими концентрацій забруднюючих речовин в

²³ Пат. на корисну модель 132724 UA, МПК: G01N 33/24 (2006.01) C12R 1/07 (2006.01) C12P 1/04 (2006.01) C05F 11/08 (2006.01) A01C 1/02 (2006.01) A01B 79/02 (2006.01) Спосіб активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої важкими металами системи ґрунт – ґрунтова біота – рослина / Самохвалова В.Л., Найдьонова О.Є., Погромська Я.А. та ін. № u201809304; заявл. 12.09.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5. 8 с.

грунтах в місцях бойових дій в 1,1–1,3 рази для ртуті, кадмію, свинцю, у місцях потрапляння снарядів або воронок досягало 7–17 раз. Досліджено наявні вирви, що утворено різними видами застосованої агресором зброї за масованих обстрілів дослідженої території та ранжовано характеристики вирв відповідно до ТТХ видів зброї. Встановлено, що найбільшу кількість вирв досліджених ділянок утворено за обстрілів з використанням установки «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм та мінометів з 82-мм осколковыми снарядами та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм.

Метод біологічної ремедіації забруднення ВМ у системі ґрунт-рослина базується на активізації біологічного (мікробіологічний, біохімічний) потенціалу техногенно забруднених ґрунтів, використанням нової властивості біологічного препарату Гаупсин БТ; на створенні і використанні специфічних мікробно-рослинних асоціацій за посилення біологічної ефективності застосованого біопрепарату і відновлення продуктивності вирощуваних рослин за умов хімічного забруднення.

Порядок проведення апробації методу включав наступне: Екологічна реабілітація хімічно забруднених чорноземних ґрунтів с.-г. використання із застосуванням активного агенту біопрепарату *Гаупсин БТ* з активізацією функціонування мікробної системи ґрунту, підвищення продуктивності рослин на ґрунтах земельних ділянок зон ризику та атмотехногенного впливу ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС» і мілітарного впливу (наслідки обстрілів з РСЗО і ракетами) на порушених ґрунтах земельних ділянок за діаметрів вирв від 1 м до 4 м з подальшою ідентифікацією видів зброї у спряженні з окремими її ТТХ за попереднього визначення екологічного стану системи ґрунт – мікроорганізми ґрунту – рослина. Біопрепарат *Гаупсин БТ* на основі двох штамів В – 306 і В – 111 бактерії виду *Pseudomonas aureofaciens* вносили навесні безпосередньо у ґрунт при його обробітку за 5-6 днів до посіву рослин при температурі повітря вище +12 С, у вигляді робочого розчину дозою 2-10 л /га препарату у день його виготовлення та попереднього проведення, інюкуляції насіння у дозі 2 л/т за 1–2 дні до його висіву, з подальшим боронуванням ґрунту. Для обприскування вегетуючої маси рослин використовували розчин біопрепарату в дозі 2 л/га за у разі моноелементного забруднення з необхідним подвоєнням дози препарату за встановленого поліелементного характеру забруднення ґрунту і рослин ВМ.

Результати апробації порівнювали з прийомами та методами біологічної ремедіації і екологічної реабілітації техногенно забруднених ґрунтів і системи ґрунт-рослина за комплексних негативних впливів мілітарного фактору і хімічного забруднення; з

контрольним варіантом без застосування препарату Гаупсин БТ за впливу хімічного забруднення та мілітарного фактору.

Результатами фенологічних спостережень за дослідження впливу Гаупсин БТ на урожайність пшениці озимої (*Triticum aestivum*) та показники якості і екологічної безпеки зерна на хімічно забруднених ґрунтах, встановлено позитивний вплив запропонованого алгоритму використання Гаупсин БТ на хімічно забруднених ґрунтах на показники структури урожаю – польової схожості та кущистості тест-культури. Зокрема, польова схожість пшениці збільшилась на 3,5 % порівняно з контрольним варіантом, де цей показник становив 86,7%; показник кущистості тест-культури зріс від 1,9 (контроль) до 2,8 (варіант застосування Гаупсин БТ); коефіцієнт кушіння підвищився до 1,6–1,8 порівняно з продуктивною кущистістю у 1,4 контрольного варіанту.

На обраних дослідних ділянках (0-3 км, 3-10 км за середньорічного розою вітрів та найбільшого розсіювання викидів ВМ) визначено ступінь техногенного впливу Курахівської ТЕС на агрофітоценоз ячменю із урахуванням застосування Гаупсин БТ у системі ґрунт-рослина за умов впливу хімічного забруднення та мілітарного фактору. Встановлено позитивний вплив застосування Гаупсин БТ на показники приросту врожайності тест-культури порівняно з контролем, що свідчить про відновлення продуктивності культури фітоценозу (рис. 4).



Рис. 4. Вплив застосування Гаупсин БТ на урожай *Triticum aestivum*

Виявлено, що на варіантах з внесенням Гаупсину БТ додатковий урожай становив 0,6 т/га (18%) та 0,52 т/га (15%).

Результати застосування Гаупсин БТ на вміст металів-токсикантів у рослинах *Triticum aestivum* наведено в таблиці 10.

Таблиця 10

Вплив застосування Гаупсин БТ на вміст металів-токсикантів у рослинах озима пшениця (*Triticum aestivum* L.)

Варіанти дослідів	Вміст металів-токсикантів у тест-рослинах, мг/кг		
	Cd	Pb	Zn
1. Контроль (система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів Курахівської ТЕС)	<u>0,11</u> ¹ 0,9 ²	<u>0,80</u> 5,2	<u>59,5</u> 62,4
2. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + Гаупсин БТ	<u>0,07</u> 0,52	<u>0,55</u> 3,22	<u>39,75</u> 50,9
3. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + мілітарний фактор	<u>0,10</u> 0,92	<u>0,75</u> 5,9	<u>60,9</u> 67,92
4. Система ґрунт-рослина зон впливу атмотехногенних емісій забруднювачів + мілітарний фактор + Гаупсин БТ	<u>0,08</u> 0,64	<u>0,52</u> 3,59	<u>45,3</u> 42,5
Примітка: ¹ чисельник – вміст ВМ у зерні; ² знаменник – вміст ВМ у вегетативній масі.			
ГДК ВМ у зерні	0,1	0,5	50,0
ГДК ВМ у вегетативній масі рослин	0,3	5,0	50,0

Встановлено, що застосування біопрепарату Гаупсин БТ запропонованим способом у системі ґрунт-рослина за умов впливу викидів забруднювачів Курахівської ТЕС сприяло зниженню вмісту Cd у зерні пшениці на 36,4 %, вегетативній масі – на 42%. Виявлено, що за мілітарного впливу та хімічного забруднення системи ґрунт-рослина ВМ використання запропонованого методу біологічної ремедіації сприяло зниженню вмісту Cd у зерні ячменю на 27,3 %, у вегетативній масі – на 2%.

За хімічного забруднення ВМ використання біопрепарату Гаупсин БТ забезпечило зниження вмісту Pb у зерні ячменю на 31%, вегетативній масі – на 3 %; за мілітарного впливу – зниження вмісту Pb відповідно становило 35% і 31%.

Вміст металу-токсиканту Zn у тест-рослинах також зменшився за застосування біопрепарату Гаупсин БТ в досліджених зонах емісій забруднювачів енергетичного виробництва. Зокрема, встановлено зниження вмісту у зерні на 33 % та на 18,4 % у вегетативній масі пшениці озимої. За впливу мілітарного фактору використанням запропонованого біопрепарату Гаупсин БТ досягнуто зменшення вмісту Zn на 24 % у зерні та на 32 % у вегетативній масі тест-культури.

Отже, за результатами з апробації методу встановлено біоремедіаційний ефект біопрепарату у забрудненій системі ґрунт-рослина за інтенсифікації процесів біоремедіації і відновлення продуктивності рослин за показниками приросту врожайності тест-культури та зниження акумуляції ВМ тест-рослинами порівняно з контролем.

5. Спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій

Військові дії на сході України призвели до руйнування цілісних природних ландшафтів. У 2018 році Донецькою ДСД станцією НААН розпочато дослідження з рекультивації земель, що підлегли. Біологічний етап проведення рекультиваційних робіт даної території було ускладнено через високу забур'яненість, що вимагало проведення посиленних агротехнічних (лушення, дискування, триразова культивування) та хімічних методів боротьби з бур'янами. Доведено, що нехтування системами захисту рослин хоча б на один сільськогосподарський сезон може бути причиною зниження показників продуктивності рослин від 25 % і більше.

Крім складної гербологічної ситуації, характерні ґрунти Східної частини Північного Степу чорноземи типові під впливом важких артилерійських снарядів змінили профільну структуру біокосних тіл. Результати ґрунтового обстеження підтверджують необхідність проведення точкової рекультивації. Для забезпечення проведення технічного етапу з рекультивації земель були залучені працівники державних служб з надзвичайних ситуацій з метою розмінування території.

Метою даного способу є швидке та повне відновлення сільськогосподарських земель, які постраждали внаслідок військових дій, з використанням агротехнологічних прийомів без виводу з обробітку окремих територій.

Розпочинати рекультивацію земель необхідно тільки після розмінування відповідних площ та після отримання відповідного дозволу.

Першим етапом відновлювальних робіт (при настанні технологічних умов) є механічна підготовка ґрунту з одночасним вирівнюванням окремих частин поля, на яких розташовувались військові споруди (окопи, бліндажі, тощо), а також вирви від снарядів. Механічна підготовка ґрунту складається з дискування в 3 сліди важкими дисковими боронами з метою якнайбільшого подрібнення рослинних решток.

Наступний крок – обприскування площі, що заросла бур'янами, гербіцидами загальної дії.

Першою культурою, яку необхідно висіяти на даній площі є соняшник. Навесні проводяться страхова культивуація та передпосівна культивуація. Передпосівна культивуація має бути проведена не менше ніж за тиждень до сівби для того, щоб дати змогу бур'янам вирости до отримання сходів соняшнику. Разом з передпосівною культивуацією необхідно внести в ґрунт органічне добриво біогумус нормою не нижче 500 кг/га, що дозволить знизити накопичення важких металів кінцевою продукцією (насінням соняшнику).

Саме через значну забур'яненість соняшник було обрано культурою для першого року рекультивації як найбільше пристосовану для значного гербіцидного навантаження, без якого знищити бур'яни не можливо. Задля отримання необхідного результату необхідно використовувати гібриди соняшнику під технологію Clearfield. До сходів культури необхідно провести обприскування площ гербіцидом загальної дії для знищення першої хвилі бур'янів. У фазі 4–6 листків соняшнику необхідно провести обприскування посівів гербіцидом з діючими речовинами імазапір (15 г/л) + імазамокс (33 г/л). Такий гербіцидний шар дозволяє утримувати посіви соняшнику чистими від бур'янів до збирання.

За даними видно, що врожайність соняшнику при використанні технології Clearfield значно переважала контрольний варіант (табл. 11). Цей результат було забезпечено суттєвим знищенням бур'янів, які не заважали формуванню рослинами соняшнику вегетативних та генеративних органів.

Таблиця 11

Ефективність використання запропонованої технології при вирощуванні соняшника, 2018 р.

Варіант	Урожайність, т/га	Прибавка	
		т/га	%
Контроль	0,4	-	-
Clearfield	1,2	0,8	200

Після збирання соняшнику необхідно відразу провести лущення рослинних решток соняшника з одночасною сівбою пшениці озимої. Пшениця озима була обрана для другого етапу через її біологічну здатність боротися з бур'янами, формуючи щільний стеблостій.

Паралельно з сівбою пшениці озимої необхідно вносити органічне добриво біогумус дозою не менше 500 кг/га. Цей прийом дозволяє знизити відсоток накопичення важких металів в остаточній продукції.

Пшениця озима була обрана для другого етапу через її біологічну здатність боротися з бур'янами формуючи щільний стеблостій. Контрольним варіантом було розміщення сортів на площах, на яких проводилось механічне знищення бур'янів протягом весни-літа 2018 року. На варіантах використовували однакову схему хімічного захисту посівів, яка складалася з використання гербіциду у фазі кушіння пшениці озимої, фунгіциду та інсектициду у фазах кушіння та колосіння. Гербіцид використовували проти дводольних бур'янів, проте на площах, на яких попередньо проводилось механічна боротьба з смітною рослинністю, було відмічене значне ураження злаковими бур'янами. В той же час, на посівах пшениці озимої, яка розміщувалася після соняшнику такої проблеми не було. Відповідна ситуація суттєво вплинула на рівень врожайності пшениці озимої табл. 12.

Таблиця 12

Врожайність пшениці озимої залежно від попередника та сорту, 2019 р.

Сорт	Урожайність після соняшнику, т/га	Урожайність після механічної обробки ділянки, т/га	Прибавка т/га
Богиня	4,3	2,1	2,2
Олексіївка	4,4	1,7	2,7
Білосніжка	3,8	0,9	2,9
Мудрість од.	3,0	1,2	1,8
Житниця	2,5	0,5	2,0
Щедрість	3,3	0,7	2,6
Журавка	3,5	1,1	2,4

Аналіз отриманих даних говорить про те, що використання механічного способу боротьби з бур'янами не дозволяє забезпечити відповідної чистоти полів. Через значний відсоток злакових бур'янів в посівах пшениці озимої було отримано суттєве зниження рівня врожайності порівняно з площами, де попередником виступав соняшник, не залежно від сорту пшениці озимої.

Також було відмічене, що різні сорти по різному реагують на процеси рекультиваци посівних площ. Так, найвищий рівень врожайності забезпечили сорти донецької селекції Богиня та Олексіївка, які характеризуються значною адаптивною здатність до складних умов вирощування.

Після збирання пшениці озимої вище зазначені площі можна використовувати у звичайній сівозміні за традиційними для господарства технологіями. Таким чином відновлення агроценозу порушеного в наслідок військових дій відбувається протягом 3 років з одночасним отриманням сільськогосподарської продукції (одержано

патент на корисну модель «Спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій»²⁴.

У варіантах з передпосівним внесенням біогумусу після збирання врожаю були відібрані зразки ґрунту для визначення агрохімічних показників (табл. 13).

Таблиця 13

Агрохімічні показники ґрунту (шар 0–20 см)

Варіант досліджу	Легкогідралізований азот, мг/кг	Рухомий фосфор, мг/кг	Обмінний калій, мг/кг
Контроль	135,0	120,0	169,0
Біогумус-1	156,0	142,0	174,3
Біогумус-2	148,0	137,0	167,2

За внесення біогумусу збільшився вміст поживних речовин. Вміст легкогідралізованого азоту був більшим на 13–21 мг/кг (9,6–15,6%), рухомого фосфору – на 17–22 мг/кг (14,2–18,3%).

Тобто, на ділянках, які постраждали від антропогенного порушення ґрунтових горизонтів необхідно використовувати додаткові рекультиваційні прийоми, а саме застосування біогумусу, який пришвидшує поступове відновлення родючості.

ВИСНОВКИ

Досліджено ґрунти фонових територій Донецької області та ґрунти, що зазнали впливу хімічного забруднення ТОВ «ДТЕК Курахівська ТЕС» та земельних ділянок зон впливу російських воєнних дій за обстрілів і вибухів снарядів різних видів зброї.

Експериментальними даними встановлено, що на агроекологічний стан ґрунту в зоні впливу підприємств енергетичного виробництва щодо забруднення важкими металами, який впливає на біоаккумуляцію рослинами цих токсикантів, впливає буферність ґрунту і відстань від техногенного джерела надходження важких металів. На основі результатів аналітичних вимірювань вмісту потенційно рухомих форм важких металів в ґрунті з урахуванням коефіцієнту токсичності елементу розраховано сумарний показник поліелементного забруднення (Zc). За цим показником високобуферні ґрунти в зоні впливу аеротехногенних викидів Курахівської ТЕС на відстані

²⁴ Патент на корисну модель 153112 UA, МПК A01B 79/00, A01C 7/00, A01C 21/00 Спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій / Вінюков О.О., Бондарева О.Б., Удовиченко С.М. № у 202202641; заявл. 22.07.2022 р.; опубл. 24.05.2023 р., Бюл. №21.

завбільшки 7 км характеризуються як безпечні, на відстані 5 км помірнобезпечні, до 0,5 км – небезпечні. Малобуферні ґрунти на відстані до 15 км є практично небезпечними щодо потенційно рухомих важких металів.

Апробовано нові методи хімічної та біологічної ремедіації забруднення ВМ – метод поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина із використанням нового синтезованого ХГП Смарагд та метод активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої ВМ системи ґрунт – рослина.

Методи є придатними до використання на чорноземних ґрунтах порушених земельних ділянок внаслідок обстрілів з установок «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм та мінометів з 82-мм осколковою снарядом та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм за виявлених діаметрів вивр від 1 м до 4 м. За умов збільшення частоти вивр на одиницю площі рекомендовано збільшення дози добрива у 1,5–2 рази для мінімізації комплексних негативних впливів мілітарного фактору та хімічного забруднення на систему ґрунт – рослина та для зниження інтенсивності процесів хімічної і біологічної деградації ґрунтів.

Метод активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої ВМ системи ґрунт-рослина може знайти застосування за проведення заходів ремедіації та екологічної реабілітації хімічно забруднених ґрунтів для покращення екологічного стану ґрунтів та мінімізації впливів забруднення; створення умов для посилення захисних і трофічних функцій ґрунту шляхом активізації біологічного його потенціалу для запобігання зниження рівня продуктивності, відтворення ресурсного потенціалу ґрунтів; у науково-дослідній практиці – для розробки нових біопрепаратів, що містять сполуки мікробного походження та є стійкими до хімічного забруднення; для розробки технологічних прийомів зниження інтенсивності процесів хімічної і біологічної деградації ґрунтів.

Розроблені методи рекомендуються до впровадження у господарствах різних форм власності, що спеціалізуються на виробництві зернових культур на територіях з ризиками забруднення та комплексних негативних впливів мілітарного фактору і хімічного забруднення для відновлення родючості хімічно забруднених ґрунтів.

Спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій, дозволяє одержати позитивний результат через 3 роки з одночасним отриманням сільськогосподарської продукції кожного року. На ділянках, які постраждали від антропогенного порушення ґрунтових горизонтів необхідно використовувати додаткові рекультиваційні прийоми, а саме застосування біогумусу, який

пришвидшує поступове відновлення родючості. За внесення біогумусу збільшився вміст поживних речовин. Вміст легкогідралізованого азоту був більшим на 13–21 мг/кг (9,6–15,6%), рухомого фосфору – на 17–22 мг/кг (14,2–18,3%).

АНОТАЦІЯ

Проведено експериментальне дослідження впливу відстані і напрямку від джерела техногенного надходження важких металів в агроландшафти на вміст різних форм цих елементів в ґрунті. За сумарним показником поліелементного забруднення високобуферні ґрунти в зоні впливу аеротехногенних викидів Курахівської ТЕС на відстані завбільшки 7 км характеризуються як безпечні, на відстані 5 км помірнобезпечні, до 0,5 км – небезпечні. Малобуферні ґрунти на відстані до 15 км є практично небезпечними щодо потенційно рухомих важких металів. Апробовано нові методи хімічної та біологічної ремедіації для мінімізації комплексних негативних впливів мілітарного фактору та хімічного забруднення на систему ґрунт – рослина та для зниження інтенсивності процесів хімічної і біологічної деградації ґрунтів – метод поліпшення екологічного стану системи ґрунт-рослина із використанням нового синтезованого ХГП Смарагд та метод активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої ВМ системи ґрунт – рослина. Методи є придатними до використання на чорноземних ґрунтах порушених земельних ділянок внаслідок обстрілів з установок «Град», польових і самохідних гаубиць; калібр 120 мм та мінометів з 82-мм осколковими снарядами та осколково-фугасними мінами, калібр 82 мм за виявлених діаметрів вирв від 1 м до 4 м. За умов збільшення частоти вирв на одиницю площі рекомендовано збільшення дози добрива у 1,5–2 рази. Розроблений та апробований спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій, дозволяє одержати позитивний результат через 3 роки з одночасним отриманням сільськогосподарської продукції кожного року. З метою екологізації природокористування і підвищення надійності отримання якісного і екологічно безпечного зерна доцільно застосовувати біопрепарати, стимулятори росту рослин, альтернативні органічні добрива.

Література

1. Samokhvalova, V. Innovative methods to remediate polluted soils. *Soils Under Stress* / Dmytruk, Y., Dent, D. (eds). Springer Nature Switzerland AG. 2021. Pp. 227-239. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68394-8_22

2. Sustainable Management of Contaminated Land: An Overview. A report from the Contaminated Land Rehabilitation Network for Environmental Technologies. Vienna, Umweltbundesamt, 2002. Available from: http://www.commonforum.eu/Documents/DOC/Clarinet/rblm_report.pdf
3. TRC, Green and Sustainable Remediation: A Practical Framework. [online], Interstate Technology and Regulatory Council (ITRC) / report GSR-2. Washington, D.C., 2011. Available from: <http://www.itrcweb.org/Guidance/GetDocument?documentID=34>
4. Holland K.S., Lewis R.E., Tipton K. et al. Framework for integrating sustainability into remediation projects. *Remediation*. 2011. 21 (3). Pp. 7–38.
5. Holland K., Karnis S., Kasner D.A., Butler P.B., Hadley P.W., Nathanail P. et al. Integrating Remediation and Reuse to Achieve Whole-System Sustainability Benefits. *Remediation*. 2013. 23 (2). Pp. 5–17.
6. Meuser, H. *Soil Remediation and Rehabilitation: Treatment of Contaminated and Disturbed Land. Environmental Pollution*. Springer Netherlands. 2013. 406 p.
7. US EPA. Remediation technologies for cleaning up contaminated sites. 2019. <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technologies-cleaning-contaminated-sites>
8. US EPA. RE-Powering America's Land Initiative: Tracking Completed Projects on Contaminated Lands, Landfills, and Mine Sites. 2019. https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-10/documents/re_tracking_matrix_final_508_100219.pdf
9. US EPA. CLU-IN technologies: Bioremediation overview. 2020. [https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioremediation/cat/Anaerobic_Bioremediation_\(Direct\)/](https://clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Bioremediation/cat/Anaerobic_Bioremediation_(Direct)/)
10. FAO. Forthcoming. Online Database on Best Management and Remediation Techniques for Polluted Soils. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-pollution/en/>
11. FAO and UNEP. *Global assessment of soil pollution: Report*. Rome. 2021. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>
12. Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., Pennock, D. Soil Pollution: a hidden reality. Rome, FAO. 2018. 142 p.
13. FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC. State of knowledge of soil biodiversity – Status, challenges and potentialities, Report 2020. Rome, FAO. 2020. <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
14. FAO and UNEP. Towards Zero pollution: Launch of the *Global Assessment of Soil Pollution: Report*. Rome. 2021. 846 p. <https://doi.org/10.4060/cb4894en>

15. FAO and UNEP. 2021. *Global assessment of soil pollution. Summary for policy makers*. Rome, FAO. 84 p. <https://doi.org/10.4060/cb4827en>].

16. Baliuk S. A., Kucher A. V., Plisko I. V. (Ed.) (2024). Conceptual approaches to the restoration of soils damaged by the armed aggression: monograph. Kyiv, Agrarna nauka. 216 p. <https://doi.org/10.31073/978-966-540-604-4>

17. Samokhvalova V.L. Monitoring of chemically contaminated soils as a result of military operations in Ukraine. *Current state of the soil cover in Ukraine in the conditions of armed aggression of the Russian Federation*: Abstracts of the International Science and Practice conference [Electronic edition], October 20, 2022. Kharkiv: NSC "ISSAR named after O.N. Sokolovsky", 2022. 174 p. P. 122-127. <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>

18. Samokhvalova V.L. Chemically contaminated soils as a result of military operations: degradation and measures for ecological rehabilitation of ecosystem services. *Current state of the soil cover in Ukraine in the conditions of armed aggression of the Russian Federation*: Abstracts of the International Science and Practice conference [Electronic edition], October 20, 2022. Kharkiv: NSC "ISSAR named after O.N. Sokolovsky", 2022. 174 p. P. 127-131. <http://www.issar.com.ua/uk/vydannya>

19. Сябер М.О. Курахівська теплова електростанція. *Енциклопедія Сучасної України* [Електронний ресурс] / ред. рада: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2016. <https://esu.com.ua/article-51781>

20. Самохвалова В. Л., Фатєєв А. І., Лучникова Є. Еколого-геохімічна оцінка фонового рівня вмісту різних форм мікроелементів ґрунту. Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2011. Вип. 55. С. 125–133.

21. Польовий А. М., Гуцал А. І., Дронова О. О. Ґрунтознавство: навч. посібник для студентів вищ. навч. закладів. *Екологія*. 2013. 668 с.

22. Пат. на корисну модель 135145 UA, МПК (2006): C05B 11/02 (2006.01), G01N 33/24 (2006.01), C05D 11/00 Спосіб одержання хелатно-гуматного препарату Смарагд з удобрювально-стимулюючим ефектом для поліпшення екологічного стану системи ґрунт – рослина / Самохвалова В.Л., Бублик В., Скрильник Є.В. та ін. № u201806925; заявл. 20.06.2018; опубл. 25.06.2019, Бюл.12. 7 с.

23. Пат. на корисну модель 132724 UA, МПК: G01N 33/24 (2006.01) C12R 1/07 (2006.01) C12P 1/04 (2006.01) C05F 11/08 (2006.01) A01C 1/02 (2006.01) A01B 79/02 (2006.01) Спосіб активізації біологічного потенціалу ґрунту за біоремедіації забрудненої важкими металами системи ґрунт – ґрунтова біота – рослина / Самохвалова В.Л.,

Найдьонова О.Є., Погромська Я.А. та ін. № u201809304; заявл. 12.09.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №5. 8 с.

24. Патент на корисну модель 153112 UA, МПК A01B 79/00, A01C 7/00, A01C 21/00 Спосіб прискореного відновлення агроценозу, порушеного внаслідок військових дій / Вінюков О.О., Бондарева О.Б., Удовиченко С.М. № u 202202641; заявл. 22.07.2022 р.; опубл. 24.05.2023 р., Бюл. №21.

Information about the authors:

Vinyukov Oleksandr Oleksandrovych,

Doctor of Agriculture, Professor,

Director of Donetsk state agricultural science station of the NAAS
1, Zakhisnykiv Ukrainy St., Pokrovsk, Donetsk region, 85307, Ukraine

Samokhvalova Valentina Leonidivna,

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher,
Senior Researcher of the Soil Protection Department of NSC "Institute
for Soil Science and Agrochemistry named after O.N. Sokolovsky"
4, Chaykovska St., Kharkiv, 61024, Ukraine

Bondareva Olga Braunivna,

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Scientific Secretary of Donetsk State Agricultural Science Station
of the NAAS
1, Zakhisnykiv Ukrainy St., Pokrovsk, Donetsk region, 85307, Ukraine