

УДК 63.502: 504.57

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.29>

РОСЛИННИЙ БІОАКТИВНИЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ГЕРБИЦИДІВ У ҐРУНТАХ

Хохлов А.В., Хохлова Л.Й.

Інститут сорбції та проблем ендоекології Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 13, 03164, м. Київ
techsorb@gmail.com, khokhlova.lyudmila@gmail.com

Однією з найважливіших проблем сьогодення є погіршення екологічного стану довкілля загалом і ґрунтів зокрема. Основним джерелом забруднення ґрунту є внесення агрохімікатів різного типу. Використання різноманітних отрутохімікатів у сільському господарстві призводить до порушення природних циклів і збалансованих умов навколишнього природного середовища. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Зростання масштабів застосування гербіцидів, в усьому світі ставить перед дослідниками важливе завдання розробки ефективних заходів попередження наслідків інтенсивної хімізації в агропромисловому комплексі. Встановлено, що накопичення та залишкові концентрації гербіцидів в ґрунті можуть впливати на фізіологію культури, особливо під час росту розсади. Створено біосорбційний композит деструктивного типу на основі рослинних матеріалів для знешкодження агрохімікатів різного хімічного складу. Визначено оптимальні умови модифікування спеціалізованих біосорбційних комплексів деструктивної дії щодо гербіцидів. Проведені дослідження показали високу ефективність дії біосорбційного композиту для очищення ґрунтів від накопичення гербіцидів, що вказує на перспективність його застосування в аграрному секторі. Отримані результати, з урахуванням дешевизни та доступності сировинної бази, дозволяють обґрунтовано підходити до вирішення конкретних практичних задач, пов'язаних з розробкою модифікованих біоактивних сорбційних композитів та їх використання для очищення ґрунтів від накопичених гербіцидів різного типу. Біосорбційні композити з рослинної сировини можуть бути використані як ефективний, доступний, екологічно чистий і недорогий сорбційний матеріал для детоксикації накопичення гербіцидів в ґрунтах. *Ключові слова:* біоактивний композит, гербіциди, ґрунти, токсичні ефекти, сільськогосподарське виробництво, бур'яни, детоксикація.

Plant bioactive composite for reducing the toxic effect of herbicides in the soils. Khokhlov A., Khokhlova L.

One of the most important problems of today is the deterioration of the ecological state of the environment in general and soils in particular. The main source of soil pollution is the use of various types of agrochemicals. The use of various pesticides in agriculture leads to disruption of natural cycles and balanced environmental conditions. The increase and uncontrolled use of various brands of herbicides to combat the threat of weeds in agricultural fields is of great concern, given the impact of herbicides on the physiology of agricultural crops and seed germination when they enter the soil. The growth of the use of herbicides worldwide poses an important task for researchers to develop effective measures to prevent the consequences of intensive chemicalization in the agro-industrial complex. It has been established that the accumulation and residual concentrations of herbicides in the soil can affect the physiology of the crop, especially during the growth of seedlings. To neutralize agrochemicals of various chemical composition, a destructive type biosorption composite based on plant materials has been created. Optimal conditions for modification of specialized biosorption complexes of destructive action on herbicides have been determined. The conducted studies have shown high efficiency of biosorption composite for cleaning soils from accumulations of herbicides, which indicates the prospects of its use in the agricultural sector. The results obtained, taking into account the cheapness and availability of raw materials, allow a reasonable approach to solving specific practical problems related to the development of modified bioactive sorption composites and their use for cleaning soils from accumulated herbicides of various types. Biosorption composites from plant materials can be used as an effective, accessible, environmentally friendly and inexpensive sorption material for detoxification of herbicide accumulations in soils. *Key words:* bioactive composite, herbicides, soils, toxic effects, agricultural production, weeds, detoxification.

Постановка проблеми. Зважаючи на інтенсивність ведення господарювання в Україні та наявний рівень забруднення ґрунтів, важливими є розробка та впровадження новітніх технологій очищення й відновлення ґрунтів, забруднених агрохімікатами. Використання різноманітних отрутохімікатів у сільському господарстві призводить до порушення природних циклів і збалансованих умов навколишнього природного середовища. Забруднення ґрунтів хімічними сполуками, які використовуються в землеробстві, є однією з актуальних проблем сучас-

ності. Доведено, що за трофічними ланцюгами ці хімічні сполуки врешті-решт потрапляють в організм людини. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Залучення нових типів біосорбційних матеріалів з відновлюваної рослинної сировини для детоксикації накопичення агрохімікатів в ґрун-

тах актуально як в науковому, так і практичному відношенні.

Актуальність досліджень. Зниження рівня забруднення ґрунту агрохімікатами є однією з важливих проблем захисту навколишнього середовища. Одним зі шляхів вирішення проблеми детоксикації накопичення агрохімікатів у ґрунтах є створення нових типів біосорбційних композитів деструктивної дії з рослинної сировини, в яких мікроорганізми-деструктори закріплюються на сорбційно активних щодо забруднювача носіях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Забруднення довкілля хімічними сполуками, які використовуються в землеробстві, є однією з актуальних проблем сучасності. Гостро постає проблема рекомендацій з очищення ґрунтів від накопичення агрохімікатів та нівелювання їхньої дії на рослини. Існує небагато досліджень щодо впливу залишкового вмісту гербіцидів з важкими металами, що входять до їх складу, та їхнього впливу на проростання та ріст сільськогосподарських культур [1]. Гербіциди – засоби, які використовують для знищення (чи профілактики) небажаної рослинності. Головне завдання таких препаратів у сільськогосподарських посівах – боротьба проти бур'янів. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Показано, що гербіциди негативно впливали на проростання насіння, а також на довжину плодоніжки та корінця, що вказує на їх токсичний вплив на ріст сільськогосподарських культур [2, 3]. Широко застосовується Гліфосат, що вважається найпотужнішим гербіцидом безперервної дії. Це неселективний гербіцид, тобто він вбиває будь-яку рослину, з якою вступає в контакт. Гліфосат дуже ефективний у боротьбі з широким спектром бур'янів, включаючи трави, широколистяні бур'яни та деревні рослини. Методи очищення залежать від рівня забруднення ґрунтів залишковими кількостями гербіцида та для різних регіонів мають специфічні відмінності. На території України найбільш поширені гербіциди: Ураган Форте – неселективний післясходовий гербіцид системної дії для знищення однорічних та багаторічних бур'янів. Діюча речовина – гліфосат/калійна сіль. Препарат містить унікальну поверхнево-активну речовину, яка забезпечує найкращу дію гліфосату; Гербіцид Ватра – системний препарат суцільної дії на основі калійної солі гліфосату, призначений для ефективного знищення однорічних і багаторічних бур'янів, у тому числі чагарників. Використовується як гербіцид для соняшника, кукурудзи, ріпаку, а також для обробки полів перед посівом; Раундап Макс – гербіцид суцільної дії. Діюча речовина – калійна сіль гліфосату. Препарат використовують для обробки територій перед посад-

кою овочевих, квіткових, декоративних рослин, дерев, чагарників, газонів, а також для відновлення земель, які тривалий час не оброблялися.

Для очищення екосистем від накопичення гербіцидів існують різні методи. Очищення ґрунтів має певні складності. З метою відновлення ґрунтів та детоксикації накопичених надлишків гербіцидів на рівнях, що не перевищують 20 мг/кг, перспективним є спосіб компостування ґрунту разом із залишками рослин, опалим листям тощо [4, 5]. Наявність підвищених концентрацій гербіцидів у потоках відходів створює проблеми для відновлення навколишнього середовища. Все більшого поширення набуває застосування біотехнологічних методів, що передбачають інтродукцію в природні екосистеми мікроорганізмів-деструкторів агрохімікатів. Доведено, що практично всі хімічні сполуки, що застосовуються як агрохімікати, утилізуються мікроорганізмами. Виділено значну кількість штамів грибів, бактерій, актинобактерій та водоростей, що перетворюють ці речовини до нетоксичних сполук. Переваги використання біологічних методів дезактивації агрохімікатів над фізико-хімічними обумовлені тим, що мікроорганізми мінералізують агрохімікати в природному циклі кругообігу речовин без негативного впливу на екосистему. Метаболічні можливості природної популяції значно вищі, ніж окремо взятого мікроорганізму [6, 7]. Сукупна діяльність консорціуму мікроорганізмів дає змогу довести до повної мінералізації будь-які хімічні сполуки. тоді як цього не може зробити жодна популяція одного виду мікроорганізмів. Існують відомості про різноманітні біологічні препарати для деструкції агрохімікатів [8-10]. Розроблено та застосовуються рідкі мікробні препарати для знешкодження агрохімікатів у ґрунтах [11, 12]. Здатність одного окремо взятого мікроорганізму розкласти ту чи іншу органічну сполуку лімітується індивідуальним генетичним комплексом. Природна популяція бактерій є генетично гетерогенною та щодо ксенобіотиків проявляється на рівні штаму. Знешкодження агрохімікатів шляхом використання мікроорганізмів-деструкторів, як у вільному стані, так й іммобілізованих на поруватому носії, є найбільш доцільним для зниження рівня забруднення ґрунтів [13, 14]. Для очищення ґрунтів від агрохімікатів застосовується мікробний препарат на основі суміші біологічно активного ґрунту та соломи. Іммобілізація мікробних клітин-деструкторів агрохімікатів на поверхні сорбційного носія підвищує ефективність біотехнологічних процесів. Сорбенти-носії повинні володіти високою хімічною стійкістю, механічною міцністю, біологічною сумісністю та технологічністю. Актуальним для детоксикації ґрунтів, які забруднені агрохімікатами різного хімічного складу, є створення біосорбційних композитів широкого спектру дії на основі матеріалів рослинного походження та природного консорціуму мікроорганізмів-деструкторів. Рослинні відходи – перспектив-

ний відновлюваний природний матеріал для створення біоактивних композитів для знешкодження хімічного забруднення навколишнього середовища. Біосорбційні композити на основі рослинних сорбційних матеріалів та адаптованої природної асоціації мікроорганізмів-деструкторів є ефективними для знешкодження забруднення ґрунтів агрохімікатами. Проведення досліджень з розробки та застосування біосорбційного композиту з рослинної сировини для очищення ґрунту від накопичення гербіцидів є надзвичайно важливим.

Мета роботи. Дослідження фізико-хімічних, сорбційних та деструктивних (щодо гербіцидів) властивостей біологічно модифікованих сорбційних композитів на основі рослинних матеріалів для очищення ґрунтів від забруднення гербіцидами. Детоксикація накопичених гербіцидів у ґрунтах з метою їх відновлення забезпечує підвищення їх продуктивності та подальшого отримання високоякісної та екологічно безпечної аграрної продукції. Дослідження фізико-хімічних, сорбційних та детоксикаційних властивостей біологічно модифікованих сорбційних композитів на основі рослинної сировини для зниження токсичної дії гербіцидів у ґрунтах.

Матеріали та методи досліджень. Пошук оптимальних методів аналізу агрохімікатів – одна з складних проблем аналітичної хімії. До зазначених методів відносять капілярну газову хроматографію (ГХ), високо-ефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ). Ці методи мають високу роздільну здатність, високу чутливість. У дослідженні було застосовано метод високоефективної рідинної хроматографії як найбільш ефективний метод аналізу.

Біодеструктивну спроможність біосорбційного композиту з іммобілізованими мікроорганізмами-деструкторами гербіцидів контролювали за зниженням концентрації забруднюючої речовини (гербіцидів).

Виділення мікроорганізмів, потенційних деструкторів гербіцидів, здійснювали методом накопичувальних культур з ґрунтів (чорноземів), забруднених гербіцидами, із зразків, відібраних з поля діяльності агрофірм, де тривалий час застосовували гербіциди типу гліфосат – (N-(фосфонометил)-гліцин). В присутності забруднювача (гербіциду) у ґрунті шляхом вибіркового пригнічення виживають тільки найбільш стійкі до нього популяції. Експерименти проводили на мінеральному середовищі складу (г/л): K_2HPO_4 – 0,5; $NaNO_3$ – 0,5; $(NH_4)_2SO_4$ – 0,5; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2. Експериментально при видовому аналізі одержаної культури мікроорганізмів (МО) встановлено, що основними видами є *Sporocytophaga myxococcoides*, *Sorangium cellulosum*, *Cellvibrio mixtus genomic*, *Trichoderma viride*, а також супутні їм гетеротрофні бактерії *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*.

Виклад основного матеріалу. Дослідження процесу деструкції гербіцидів вивчали на модельованих зразках забрудненого ґрунту та у водному серед-

овищі при внесенні мікроорганізмів-деструкторів у вигляді культуральної рідини та іммобілізованих на сорбційному композиті. Підбір носія мікроорганізмів-деструкторів здійснювали згідно з вимогами: матеріал повинен мати поглинальну здатність до забруднювача (гербіциду), бути сприятливим середовищем для життєдіяльності мікроорганізмів та являти собою потенційне джерело органічного добрива для ґрунту. Носії на основі рослинної сировини мають спрямовану адсорбційну здатність до гербіциду та є біосумісними. Найвищу біодеструктивну активність щодо гербіцидів виявив рослинний композит на основі подрібненої соломи пшениці, торфу та бурякового жому. Кожна складова композиту має функцію: солома – активний поглинач органічного забруднювача, носій МОД та джерело ферменту – жовта лакказа, яка ініціює процес деструкції забруднювача; торф – консервант МОД та ксеропротектор, джерело органічного постачання; буряковий жом – джерело полісахаридів та ефективний утримувач вологи (1/5). Умови проведення дослідів – температура 30 °С, початкове рН = 8 та стартова кількість МОД – 10^7 кл/г, були однаковими.

Показники розмноження мікроорганізмів-деструкторів при розкладанні гербіциду для вільних бактеріальних культур та іммобілізованих на сорбенті були відмінними. Так, фаза адаптації та початку розмноження була більш тривалою при використанні при обробці забруднювача культуральною рідиною порівняно із іммобілізованою культурою на поверхні сорбенту. Така ж закономірність виявлена для експоненціальної фази росту, де має місце постійне ділення клітин, та для стаціонарної фази, для якої характерне зниження концентрації гербіциду, що споживають МО. В лабораторних умовах досліджено розкладання гербіциду під дією МОД у вільному стані (культуральна рідина) та іммобілізованих (сорбційний – композит). Модифікаційні зміни в структурі наявних у ґрунті гербіциду під дією мікроорганізмів-деструкторів оцінювали за показниками характерних ІЧ-спектрів. Якісні та кількісні зміни в ІЧ-спектрах свідчили про перебудову структури гербіциду. Дослідження зразків (етанольних екстрактів) методом високоефективної рідинної хроматографії виявили зниження початкової концентрації гербіциду в ґрунті до 30 % протягом 30 днів та повну перебудову структури забруднювача за більш тривалий час. Комплекс природних мікроорганізмів, виділених з ґрунтів забруднених гербіцидами, здатен ефективно знешкоджувати гербіциди різного хімічного складу. Деструктивну активність біосорбційного композиту та МОД у вільному стані щодо гербіцидів у водному та ґрунтовому середовищі (модельні системи) наведено у Табл. 1.

При оцінці екотоксикологічних показників ґрунтів щодо ефективності біосорбційного композиту відносно гербіцидів використано фітотестер (фіто-

Таблиця 1

Деструктивна активність біосорбційного композиту та мікроорганізмів-деструкторів у вільному стані щодо гербіцидів (модельні системи)

Показник Внесення через:	Вміст гербіцидів у воді мг/100 г води, у ґрунті мг/100 г ґрунту							
	Варіант внесення мікроорганізмів-деструкторів							
	МОД у вільному стані (культуральна рідина)				МОД, іммобілізовані на сорбційному матеріалі (композиті)			
	Ураган Форте		Раундап Макс		Ураган Форте		Раундап Макс	
	вода	ґрунт	вода	ґрунт	вода	ґрунт	вода	ґрунт
контроль	50,0	50,0	50,0	50	50	50	50	50
10 днів	49,1	44,2	47,1	48,3	42,1	38,2	34,1	31,2
30 днів	46,2	45,1	39,8	40,4	38,1	32,4	31,1	29,8
50 днів	42,3	44,1	37,8	39,2	37,1	31,2	29,8	27,2
80 днів	34,1	38,2	33,2	36,3	29,1	27,2	22,4	21,5
100 днів	31,6	37,3	31,8	34,8	12,1	10,6	9,8	3,2
120 днів	29,8	26,1	29,6	31,2	1,1	0,9	1,2	0,8

індикатор) рослин. Використання фітотестеру вівса переконливо доведено високу ефективність одержаного біосорбційного композиту для детоксикації надлишків гербіцидів у кореновому шарі ґрунту. Дослідження ілюструють токсичний вплив гербіцидів на плодоніжки та корінці рослин. У всіх випадках гербіциди негативно впливали на ріст насіння (пригніченість). Єдиним винятком була найнижча концентрація гербіциду, яка не мала серйозного впливу на зростання рослин. Тим не менш, розвиток коренів та пагонів, навіть після проростання, може зрештою зазнати токсичної дії гербіцидів. Знешкоджуюча дія біосорбційного композиту залежить від спо-

соби його внесення. Основну частину дози вносять у рядки. Доцільно здійснити обов'язковий рясний полив після внесення.

Головні висновки. Проведені дослідження підтверджують ефективність використання біосорбційних композитів деструктивного типу для очищення сільськогосподарських ґрунтів від надлишків агрохімікатів (гербіцидів). Отримані результати, з урахуванням дешевизни та доступності сировинної бази, дозволяють вирішувати практичні задачі, пов'язані з розробкою біоактивних сорбційних композитів та їх використання для очищення ґрунтів від накопичених агрохімікатів (гербіцидів).

Література

- Seeger M., Pieper D.H. 2010. Genetics of biphenyl biodegradation and co-metabolism of PCBs Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, P. 1179–1200.
- Gomes MP, da Silva Cruz FV, Bicalho EM, Borges FV, Fonseca MB, Juneau P, Garcia QS. 2017. Effects of glyphosate acid and the glyphosate-commercial formulation (Roundup) on *Dimorphandra wilsonii* seed germination: Interference of seed respiratory metabolism. *Environ Pollut. Jan*;220(Pt A):452–459. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.087. Epub 2016 Oct 7. PMID: 27726979
- Gomes MP, Rocha DC, Moreira de Brito JC, Tavares DS, Marques RZ, Soffiatti P, Sant'Anna-Santos BF. 2020. Emerging contaminants in water used for maize irrigation: Economic and food safety losses associated with ciprofloxacin and glyphosate. *Ecotoxicol Environ Saf.* Jun 15;196:110549. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110549. Epub 2020 Apr 3. PMID: 32251953
- Gomes MP, Richardi V, Bicalho E, Cristina D, Navarro da Silva MA, Soffiatti P. 2019. Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize. *Sci Total Environ.* 651. P. 2671–2678. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.365
- Yu QQ, Lu FF, Ma LY, Yang H, Song NH. 2021. Residues of reduced herbicides Terbutylazine, Ametryn, and Atrazine and toxicology to maize and the environment through salicylic acid. *ACS Omega.* 6(41). P. 27396–27404. doi:10.1021/acsomega.1c04315
- Wang, Z.-j.; Song, H.; Liu, H.; Ye, J. 2020. Coupling of Solar Energy and Thermal Energy for Carbon Dioxide Reduction: Status and Prospects. *Angew. Chem., Int. Ed.* 59 (21), 8016–8035, DOI: 10.1002/anie.201907443
- Gomes MP, Richardi V, Bicalho E, Cristina D, Navarro da Silva MA, Soffiatti P. 2019. Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize. *Sci Total Environ.* 651. P. 2671–2678. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.365
- Owen MDK. 2016. Diverse Approaches to herbicide-resistant weed management. *Weed Sci.* 64. P. 570–584. doi: 10.1614/4/ws-d-15-00117.1
- Zhou, L.; Martinez, J. M. P.; Finzel, J.; Zhang, C.; Swearer, D. F.; Tian, S.; Robatjazi, H.; Lou, M.; Dong, L.; Henderson, L.; Christopher, P.; Carter, E. A.; Nordlander, P.; Halas, N. J. 2020. Light-driven methane dry reforming with single atomic site antenna-reactor plasmonic photocatalysts. *Nat. Energy.* 5 (1), 61–70, DOI: 10.1038/s41560-019-0517-9
- Rocha DC, da Silva Rocha C, Tavares DS, de Moraes Calado SL, Gomes MP. 2021. Veterinary antibiotics and plant physiology: an overview. *Sci Total Environ* 767: 144902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144902>
- Moore, M. T.; Kröger, R. 2010. Effect of three insecticides and two herbicides on rice (*Oryza sativa*) seedling germination and growth. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 59, 574–581, DOI: 10.1007/s00244-010-9519-0

12. Lu, F. F.; Liu, J. T.; Zhang, N.; Chen, Z. J.; Yang, H. 2020. OsPAL as a key salicylic acid synthetic component is a critical factor involved in mediation of isoproturon degradation in a paddy crop. *J. Cleaner Prod.* 262, 121476, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121476
13. Chen, Z. J.; Lv, Y.; Zhai, X. Y.; Yang, H. 2021. Comprehensive analyses of degradative enzymes associated with mesotrione-degraded process in rice for declining environmental risks. *Sci. Total Environ.*, 758, 143618, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143618
14. Ma L. Y.; Zhang N.; Liu J. T.; Zhai X. Y.; Lv Y.; Lu F. F.; Yang H. 2019. Uptake of atrazine in a paddy crop activates an epigenetic mechanism for degrading the pesticide in plants and environment. *Environ. Int.*, 131, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105014>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025