

**Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка**

Хіміко-біологічний факультет
Кафедра ботаніки та зоології

Кваліфікаційна робота
БІОТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО МОНІТОРИНГУ ТА
ЗНИЖЕННЯ ЕКОТОКСИЧНОСТІ АГРОХІМІКАТІВ
Спеціальність 162 Біотехнології та біоінженерія
Освітня програма «Екологічна біотехнологія»

Здобувачки вищої освіти освітньо-
кваліфікаційного рівня «бакалавр»
Терези РУМАК

НАУКОВИЙ КЕРІВНИК:
кандидат сільськогосподарських наук,
доцент кафедри ботаніки та зоології
Маргарита КРИЖАНОВСЬКА

РЕЦЕНЗЕНТ:
кандидат економічних наук, доцент
кафедри агробіотехнологій,
Західноукраїнського національного
університету
Галина ПИРІГ

Тернопіль – 2026

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	8
1.1. Сучасні уявлення про екотоксичність агрохімікатів та її вплив на довкілля.....	8
1.2. Біотехнологічні методи оцінювання та моніторингу екологічної безпеки агрохімікатів.....	13
1.3. Зарубіжний і вітчизняний досвід зниження токсичного навантаження агрохімічних речовин.....	17
РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	22
2.1. Характеристика досліджуваних агрохімікатів та об'єктів біотестування.....	22
2.2. Методи біоіндикації та біотестування для оцінки екотоксичності.....	25
2.3. Методичні підходи до застосування біотехнологій для зменшення токсичного впливу.....	28
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	35
3.1. Оцінка рівня екотоксичності досліджуваних агрохімікатів.....	35
3.2. Ефективність застосованих біотехнологічних методів зниження токсичності.....	38
3.3. Оцінка сучасного стану та перспективи використання біологічних препаратів.....	41
3.4. Практичні рекомендації щодо екологічно безпечного використання агрохімікатів.....	53
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60

АНОТАЦІЯ

Румак Т. В.: «Біотехнологічні підходи до моніторингу та зниження екотоксичності агрохімікатів» / Румак Тереза Вікторівна; ТНПУ імені Володимира Гнатюка хім.-біол. ф-т, кафедра ботаніки та зоології; наук. керівник Крижановська М. А. – Тернопіль, 2026 – 64 с.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розробки ефективних і екологічно безпечних методів контролю та зниження екотоксичності агрохімікатів в умовах сучасного інтенсивного землеробства. Особливу увагу у кваліфікаційній роботі приділено біотехнологічним підходам, які дозволяють не лише виявляти рівень забруднення, але й активно впливати на процеси детоксикації та відновлення природних екосистем.

У межах дослідження розглядаються найбільш поширені в Україні агрохімікати, які мають різний механізм дії та різний рівень екологічної небезпеки: гербіциди «Гліфосат» і «Гранстар», інсектицид «Актара», фунгіцид «Топсин-М», а також мінеральні добрива – *аміачна селітра* і *суперфосфат*. Водночас у роботі вивчено принцип дії та різноманіття біопрепаратів, як екологічно безпечних засобів захисту рослин і альтернатива пестицидам та агрохімікатам.

Узагальнення кваліфікаційної роботи підтверджують, що біотехнологічні підходи є перспективним напрямом у вирішенні проблеми екотоксичності агрохімікатів. Їх застосування забезпечує не лише зниження рівня забруднення, а й відновлення екологічної рівноваги агроекосистем.

Ключові слова: агрохімікати, біотехнологічний моніторинг, оцінка екотоксичності, біопрепарати, відновлення агроекосистем.

ABSTRACT

Rumak T.: " Biotechnological approaches to monitoring and reducing the ecotoxicity of agrochemicals" / Rumak Tereza; Volodymyr Hnatyuk TNPU, Department of Chemistry and Biology, Department of Botany and Zoology; Scientific Supervisor Kryzhanovska M. A. - Ternopil, 2026 - 64 p.

The relevance of the research topic is caused by the need to develop effective and environmentally safe methods of controlling and reducing the ecotoxicity of agrochemicals in the conditions of modern intensive agriculture. Particular attention in the qualification work is paid to biotechnological approaches that allow not only detecting the level of pollution, but also to actively influence the processes of detoxification and restoration of natural ecosystems.

The study examines the most common agrochemicals in Ukraine, which have different mechanisms of action and different levels of environmental hazard: herbicides "Glyphosate" and "Granstar", insecticide "Aktara", fungicide "Topsin-M", as well as mineral fertilizers - ammonium nitrate and superphosphate. Simultaneously, this paper shows the principle of action and diversity of biologics as environmentally safe plant protection products and an alternative to pesticides and agrochemicals.

The summary of the qualification work confirms that biotechnological approaches are a promising direction in solving the problem of ecotoxicity of agrochemicals. Their application ensures not only a reduction in the level of pollution, but also the restoration of the ecological balance of agroecosystems.

Key words: agrochemicals, biotechnological monitoring, ecotoxicity assessment, biologics, restoration of agroecosystems.

ВСТУП

Сучасний розвиток сільського господарства характеризується інтенсивним використанням агрохімічних засобів, що дозволяє підвищувати врожайність і забезпечувати стабільність виробництва продовольства. Водночас широке застосування гербіцидів, інсектицидів, фунгіцидів і мінеральних добрив супроводжується зростанням антропогенного навантаження на довкілля. Значна частина діючих речовин агрохімікатів здатна накопичуватися у ґрунті, мігрувати у водні об'єкти та впливати на живі організми, включаючи мікрофлору, рослини, тварин і людину. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема оцінки екотоксичності агрохімікатів та пошуку ефективних способів її зниження.

Традиційні методи контролю забруднення ґрунтів і вод, які базуються переважно на хімічному аналізі, не завжди дозволяють адекватно оцінити реальний екологічний ризик. Це пояснюється тим, що вони не враховують комплексний вплив токсичних речовин на біологічні системи. У цьому контексті біотехнологічні підходи набувають особливого значення, оскільки дозволяють поєднувати моніторинг стану довкілля з активними методами його відновлення. Використання мікроорганізмів, рослин, ферментних систем і біосорбентів відкриває нові можливості для зменшення токсичного впливу агрохімікатів і відновлення екологічної рівноваги агроєкосистем.

Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю розробки ефективних і екологічно безпечних методів контролю та зниження екотоксичності агрохімікатів в умовах сучасного інтенсивного землеробства. Особливу увагу слід приділяти біотехнологічним підходам, які дозволяють не лише виявляти рівень забруднення, але й активно впливати на процеси детоксикації та відновлення природних екосистем. Це є важливим як з точки зору охорони довкілля, так і забезпечення сталого розвитку аграрного сектору.

Мета дослідження полягає у теоретичному обґрунтуванні та практичному аналізі біотехнологічних підходів до моніторингу і зниження

екотоксичності агрохімікатів, а також оцінці їх ефективності в умовах агроєкосистем.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- Дослідити біотехнологічні методи моніторингу екологічного стану довкілля.
- Проаналізувати методичні підходи до застосування біотехнологій для зниження токсичного впливу агрохімікатів.
- Оцінити рівень екотоксичності досліджуваних агрохімікатів на основі біологічних показників.
- Оцінити сучасний стан та перспективи використання біопрепаратів.
- Розробити практичні рекомендації щодо екологічно безпечного використання агрохімікатів.

Об'єктом дослідження є процеси екотоксичного впливу агрохімікатів на агроєкосистеми.

Предметом дослідження є біотехнологічні підходи до моніторингу та зниження екотоксичності агрохімікатів, а також їх ефективність у зменшенні негативного впливу на довкілля.

У роботі використано комплекс **методів дослідження**, зокрема: теоретичні методи (аналіз, узагальнення та систематизація наукових джерел); експериментальні методи (біотестування, біоіндикація); аналітичні методи (оцінка рівня екотоксичності, порівняльний аналіз ефективності);

Теоретичне значення. Матеріали дослідження поглиблюють розуміння екотоксичності агрохімікатів та доповнюють сучасні наукові підходи до екологічного моніторингу, акцентуючи увагу на можливостях використання біотехнологічних методів оцінювання стану довкілля. Зокрема, обґрунтовується доцільність застосування мікроорганізмів, рослинних тест-систем, ферментних комплексів і біосорбентів як ефективних біоіндикаторів та інструментів контролю рівня антропогенного навантаження на екосистеми.

Крім того, результати роботи розширюють теоретичну базу щодо використання біоремедіаційних технологій для зменшення негативного

впливу агрохімікатів. Вони сприяють розвитку концепцій екологічно безпечного ведення сільського господарства, відновлення родючості ґрунтів і підтримання екологічної рівноваги агроєкосистем шляхом застосування природоорієнтованих підходів та біологічних засобів очищення навколишнього середовища.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для вдосконалення систем екологічного моніторингу агроєкосистем, зниження токсичного навантаження агрохімікатів і підвищення екологічної безпеки сільськогосподарського виробництва. Запропоновані підходи можуть бути застосовані при розробці екологічно орієнтованих технологій землеробства, впровадженні біологічних методів очищення ґрунтів і вод, захисту рослин і тварин, а також при формуванні рекомендацій для аграрних підприємств щодо раціонального використання агрохімічних засобів.

Апробація роботи: матеріали кваліфікаційної роботи апробовані на X Міжнародній науково-практичній конференції «Тернопільські біологічні читання – Ternopil bioscience – 2026» (27-28 травня 2026 р., Тернопіль).

Обсяг і структура роботи. Кваліфікаційна робота за структурою відповідає всім вимогам і складається з: змісту, анотації, вступу, 3-х розділів, висновків, списку літературних джерел. Містить 6 таблиць, 3 рисунка. Матеріал викладено на 64 сторінках. Список використаних джерел включає 41 найменування.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Сучасний розвиток сільського господарства характеризується інтенсивним використанням агрохімічних засобів, що дозволяє підвищувати врожайність і забезпечувати стабільність виробництва продовольства. Агрохімікати являють собою хімічні речовини, що використовуються у сільському господарстві, зокрема пестициди, мінеральні добрива та меліоранти, які можуть накопичуватися в компонентах довкілля — ґрунті, водних ресурсах і атмосфері. Їх надмірне або тривале застосування спричиняє негативний вплив на екологічний стан територій, знижує біорізноманіття та створює потенційні ризики для здоров'я людини. Особливу екологічну загрозу становлять стійкі органічні забруднювачі, сполуки важких металів, а також окремі агрохімічні препарати, такі як атразин і гліфосат, які здатні порушувати природні процеси функціонування екосистем та погіршувати їхню екологічну стійкість [6, 14].

1.1. Сучасні уявлення про екотоксичність агрохімікатів та її вплив на довкілля

У сучасних умовах інтенсивного розвитку сільського господарства застосування агрохімікатів стало звичною практикою для підвищення врожайності та боротьби зі шкідниками. Проте разом із очевидною користю зростає і ризик їхнього негативного впливу на довкілля. Саме тому поняття екотоксичності сьогодні розглядається значно ширше, ніж раніше. Якщо ще кілька десятиліть тому основну увагу приділяли лише гострій токсичності речовин, тобто їх здатності викликати швидку загибель організмів, то зараз підхід змінився на комплексний і системний [13, 24].

Екотоксичність агрохімікатів визначається не лише їх прямою отруйною дією, а й здатністю довгий час зберігатися в навколишньому середовищі, накопичуватися в живих організмах і передаватися через харчові ланцюги. Це означає, що навіть речовини з відносно низькою миттєвою токсичністю

можуть становити серйозну небезпеку, якщо вони повільно розкладаються або активно акумулюються у ґрунті, воді чи біоті [2, 6].

Однією з ключових характеристик сучасного підходу є врахування тривалості існування агрохімікатів у довкіллі. Багато сполук після внесення в ґрунт не зникають одразу, а проходять складні процеси трансформації. Вони можуть розкладатися на інші речовини, частина з яких інколи є ще більш токсичною, ніж вихідна сполука. Крім того, значна частина агрохімікатів здатна мігрувати – переходити з ґрунту у воду, випаровуватися в атмосферу або переноситися з пилом. У результаті забруднення перестає бути локальним і набуває регіонального або навіть глобального характеру (рис. 1.1.) [5].

Вплив на ґрунт (зниження родючості, порушення мікрофлори)
Забруднення води (змивання, токсичність для водних організмів)
Забруднення повітря (випаровування, перенесення аерозолів)
Негативний вплив на біорізноманіття (загибель нецільових видів)
Зменшення чисельності запилювачів
Порушення трофічних ланцюгів
Біоаккумуляція токсичних речовин
Накопичення в продуктах харчування
Пригнічення росту рослин
Хронічний вплив на організми (навіть у малих дозах)
Комбінована (синергетична) дія речовин
Загальна деградація екосистем

Рис.1.1. Вплив агрохімікатів на навколишнє середовище

Особливої уваги заслуговує вплив агрохімікатів на ґрунтові екосистеми. Ґрунт є складною живою системою, в якій взаємодіють мікроорганізми, гриби, безхребетні тварини та корені рослин. Ці компоненти забезпечують кругообіг поживних речовин, формування структури ґрунту та його родючості. Потрапляння токсичних речовин порушує цю рівновагу. Наприклад, зменшується чисельність корисних мікроорганізмів, що відповідають за

розкладання органічних решток і фіксацію азоту. У довгостроковій перспективі це може призвести до виснаження ґрунтів і зниження їх продуктивності [24].

Не менш важливим є вплив на водні ресурси. Агрохімікати часто змиваються з полів дощовими водами та потрапляють у річки, озера і підземні води. Навіть у невеликих концентраціях вони здатні негативно впливати на водні організми – від мікроскопічних водоростей до риб. Порушення рівноваги у водних екосистемах може проявлятися у зменшенні біорізноманіття, зміні видового складу та появі так званих «цвітінь» води, що пов'язані з надмірним розвитком окремих груп організмів [12].

Сучасні дослідження також показують, що агрохімікати можуть впливати не лише на окремі організми, а й на цілі екосистеми. Це відбувається через складні взаємозв'язки між видами. Наприклад, зниження чисельності комах-запилювачів під дією пестицидів призводить до погіршення запилення рослин, що, у свою чергу, впливає на врожайність і структуру рослинних угруповань. Подібні ефекти часто мають прихований характер і проявляються лише через певний час [6].

Ще одним важливим аспектом є біоаккумуляція – процес накопичення токсичних речовин у живих організмах. Агрохімікати можуть накопичуватися в тканинах рослин, тварин і людини. При цьому концентрація речовини зростає з кожним наступним рівнем харчового ланцюга. Наприклад, речовини, що потрапили у воду, можуть накопичуватися у водоростях, далі – у дрібних водних організмах, потім – у рибах і, зрештою, у людини. Це явище створює додаткові ризики, оскільки навіть низькі концентрації в середовищі можуть призводити до значного накопичення в організмах [14].

У сучасному розумінні екотоксичність також пов'язана з поняттям ризику. Йдеться не лише про властивості самої речовини, а й про умови її використання: дозу, частоту внесення, спосіб застосування, тип ґрунту, кліматичні умови. Одна й та сама речовина може бути відносно безпечною за

одних умов і небезпечною за інших. Саме тому оцінка екотоксичності сьогодні базується на інтегральному підході, який враховує всі ці фактори [23].

Сучасне розуміння екотоксичності агрохімікатів неможливе без аналізу механізмів їх дії на живі організми. На відміну від спрощеного уявлення про «отруєння», ці речовини впливають на біологічні системи значно складніше. Вони можуть порушувати ферментативні процеси, блокувати передачу нервових імпульсів, змінювати гормональний баланс або впливати на клітинні структури. При цьому ефект часто залежить не лише від концентрації, а й від тривалості впливу [3, 6].

Однією з характерних рис є наявність хронічної токсичності. Це означає, що навіть дуже малі дози, які не викликають миттєвих видимих змін, здатні поступово призводити до порушень у функціонуванні організмів. Наприклад, у рослин це може проявлятися у зниженні темпів росту, порушенні фотосинтезу або зменшенні стійкості до стресових факторів. У тварин – у змінах поведінки, репродуктивних порушеннях або зниженні імунітету [29].

Особливо чутливими до агрохімікатів є безхребетні організми, зокрема комахи. Практика показує, що навіть ті препарати, які спрямовані проти шкідників, можуть негативно впливати на корисних видів. Одним із найвідоміших прикладів є зменшення чисельності запилювачів. Порушення їх орієнтації, здатності знаходити їжу або повертатися до місця існування призводить до поступового скорочення популяцій. Це, у свою чергу, має прямі наслідки для рослинництва, адже значна частина культур залежить від запилення [25].

У водному середовищі агрохімікати діють інакше, але не менш небезпечно. Потрапляючи у водойми, вони впливають на найпростіші організми, які є основою харчових ланцюгів. Зміни на цьому рівні швидко передаються вгору – до безхребетних, риб та інших водних мешканців. Часто спостерігається зниження різноманіття видів і домінування окремих, більш стійких до забруднення організмів. Це свідчить про деградацію екосистеми, навіть якщо зовні водойма виглядає нормально [27].

Окремої уваги потребує процес накопичення агрохімікатів у продуктах харчування. Рослини здатні поглинати ці речовини з ґрунту та води, після чого вони потрапляють у харчовий ланцюг. При цьому концентрація може зростати на кожному наступному рівні. Наприклад, якщо певна речовина присутня у ґрунті в невеликій кількості, то в рослині її вже більше, а в організмі тварини, яка споживає цю рослину, – ще більше. У результаті навіть незначне забруднення може мати відчутні наслідки для людини [15].

Сучасні дослідження також звертають увагу на комбіновану дію агрохімікатів. У реальних умовах у довкіллі рідко присутня лише одна речовина. Зазвичай це суміш різних сполук, які можуть взаємодіяти між собою. Така взаємодія інколи призводить до посилення токсичного ефекту, навіть якщо кожна речовина окремо не є надто небезпечною. Це значно ускладнює оцінку ризиків і потребує нових підходів до їх аналізу.

З огляду на ці фактори, сучасна система оцінки екотоксичності базується на принципі комплексності. Враховуються не лише лабораторні показники, а й поведінка речовин у природних умовах. Оцінюється їх здатність до міграції, трансформації, накопичення та впливу на різні компоненти екосистеми. Важливу роль відіграють польові дослідження, які дозволяють виявити довгострокові наслідки застосування агрохімікатів.

Паралельно розвиваються підходи до зменшення екотоксичного навантаження. Одним із напрямів є вдосконалення самих препаратів. Сучасні агрохімікати розробляються з урахуванням вимог до швидкого розкладання та меншої здатності до накопичення. Це дозволяє зменшити їхній вплив на довкілля без втрати ефективності [22].

Іншим важливим підходом є оптимізація способів застосування. Йдеться про точне дозування, вибір часу внесення та використання технологій, які зменшують втрати речовин. Наприклад, застосування препаратів у безвітряну погоду знижує їх поширення за межі оброблюваної ділянки. Також важливо враховувати особливості ґрунту та клімату, оскільки вони впливають на поведінку агрохімікатів у середовищі.

Значну роль відіграє перехід до більш екологічно орієнтованих систем землеробства. Це включає використання біологічних методів захисту рослин, сівоzmіни, підвищення біорізноманіття агроландшафтів. Такі підходи дозволяють зменшити залежність від хімічних засобів і, відповідно, знизити екотоксичне навантаження.

Важливим елементом є також контроль і нормування використання агрохімікатів. Встановлюються гранично допустимі концентрації у ґрунті, воді та продуктах харчування. Проте сучасні уявлення показують, що навіть дотримання цих норм не завжди гарантує повну безпеку, оскільки вони часто не враховують комбіновану та довготривалу дію речовин. Тому система регулювання поступово вдосконалюється, включаючи нові критерії оцінки [26].

Відповідно до вищенаведеного, сучасний підхід до екотоксичності агрохімікатів базується на розумінні їх багатофакторного впливу. Враховуються як прямі токсичні ефекти, так і складні екологічні взаємодії, що виникають у природних системах. Це дозволяє більш обґрунтовано оцінювати ризики та формувати стратегії, спрямовані на збереження довкілля при одночасному забезпеченні потреб сільського господарства.

1.2. Біотехнологічні методи оцінювання та моніторингу екологічної безпеки агрохімікатів

У сучасному сільському господарстві проблема екологічної безпеки агрохімікатів набуває дедалі більшого значення. Традиційні підходи до контролю, які базуються переважно на хімічному аналізі, дозволяють визначити концентрацію речовин у ґрунті, воді чи продукції, але не дають повного уявлення про їх реальний вплив на живі організми. Саме тому дедалі ширше застосовуються біотехнологічні методи, які враховують реакцію біологічних систем і дозволяють оцінити не лише наявність токсикантів, а й їхню біологічну активність (табл. 1.1.) [21].

Однією з ключових переваг біотехнологічного підходу є його чутливість до низьких концентрацій агрохімікатів. Багато сучасних препаратів застосовуються у малих дозах, однак навіть такі кількості можуть викликати суттєві зміни у функціонуванні клітин або організмів. Біологічні тест-системи здатні фіксувати ці зміни на ранніх етапах, коли традиційні методи ще не виявляють перевищення допустимих норм. Це робить їх важливим інструментом для превентивного контролю [8].

Серед біотехнологічних методів особливе місце займає *біотестування*. Воно базується на використанні живих організмів або їх окремих структур для оцінки токсичності середовища. У практиці застосовуються різні тест-об'єкти: рослини, мікроорганізми, безхребетні тварини [34]. Наприклад, фітотести дозволяють оцінити вплив агрохімікатів на проростання насіння, довжину коренів і пагонів, інтенсивність фотосинтезу. Зниження цих показників свідчить про наявність токсичного навантаження. Важливо, що такі методи відображають сумарний ефект усіх речовин, присутніх у середовищі, а не лише окремих компонентів [17].

Іншим напрямом є використання чутливих організмів (грунтових мікроорганізмів, комах та рослин на кшталт елодеї) як *біоіндикаторів* стану довкілля. Мікробні спільноти швидко реагують на зміни умов середовища, тому їх активність може слугувати показником забруднення. Наприклад, зниження ферментативної активності ґрунту або зміна співвідношення між різними групами мікроорганізмів свідчить про негативний вплив агрохімікатів. Такі зміни часто передують видимим порушенням у функціонуванні екосистем, що дозволяє використовувати їх для ранньої діагностики [16].

Важливу роль у сучасному моніторингу відіграють *біосенсорні технології*. Біосенсиори – це пристрої, які поєднують біологічний елемент (наприклад, фермент або клітину) з фізичним перетворювачем сигналу. При контакті з токсичною речовиною біологічний компонент змінює свої властивості, що реєструється у вигляді електричного, оптичного або іншого

сигналу. Такі системи дозволяють швидко визначати наявність агрохімікатів у воді чи продуктах харчування без складної підготовки зразків. Крім того, вони можуть використовуватися безпосередньо в польових умовах, що значно розширює можливості моніторингу [3].

Сучасні біосенсиори здатні визначати навіть слідові кількості пестицидів. Це особливо важливо з огляду на те, що багато речовин проявляють токсичність при дуже низьких концентраціях. Використання ферментів як чутливих елементів дозволяє виявляти специфічні групи сполук, наприклад інгібітори певних біохімічних процесів. Водночас клітинні сенсори дають змогу оцінити загальний токсичний ефект, що наближує результати до реальних умов впливу на живі організми [18].

Особливого значення набувають методи, що дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі. Використання автоматизованих сенсорних систем дає змогу постійно контролювати стан води або ґрунту без необхідності регулярного відбору проб. Це дозволяє швидко реагувати на зміни та запобігати поширенню забруднення. У поєднанні з сучасними інформаційними технологіями такі системи можуть формувати бази даних і прогнозувати розвиток ситуації.

Окрему групу становлять *молекулярно-біологічні методи*. Вони спрямовані на виявлення змін на рівні генетичного матеріалу та клітинних структур. Наприклад, пошкодження ДНК може свідчити про генотоксичну дію агрохімікатів. Такі ефекти є особливо небезпечними, оскільки можуть призводити до мутацій і передаватися наступним поколінням. Використання спеціальних тестів дозволяє оцінити ступінь ушкодження клітин навіть за відсутності видимих ознак токсичності [20].

Сучасний *біомоніторинг* дедалі частіше базується на поєднанні різних методів. Це дозволяє отримати більш повну картину стану довкілля. Наприклад, результати біотестування можуть доповнюватися даними молекулярного аналізу та показниками активності мікроорганізмів. Такий

інтегрований підхід забезпечує високу точність оцінки та дозволяє враховувати як короткострокові, так і довгострокові ефекти [7].

Таблиця 1.1

**Основні біотехнологічні методи оцінювання
екологічної безпеки агрохімікатів**

<i>Метод</i>	<i>Суть підходу</i>	<i>Що оцінюється</i>	<i>Переваги</i>
<i>Біотестування</i>	Використання живих організмів	Загальна токсичність	Відображає сумарний ефект
<i>Біоіндикація</i>	Аналіз стану біоти	Зміни в екосистемі	Раннє виявлення порушень
<i>Біосенсиори</i>	Біологічні елементи + сенсори	Наявність токсикантів	Швидкість, висока чутливість
<i>Молекулярні методи</i>	Аналіз ДНК, клітин	Генотоксичність	Висока точність
<i>Мікробіологічні методи</i>	Оцінка активності мікроорганізмів	Стан ґрунту	Чутливість до змін
<i>Біомоніторинг</i>	Поєднання методів	Комплексний вплив	Повна оцінка ризиків

Важливим напрямом розвитку є оцінка нових форм агрохімікатів, зокрема тих, що створюються з використанням нанотехнологій. Такі речовини мають специфічні властивості, які можуть впливати на їхню токсичність. Наприклад, зменшення розміру частинок збільшує їхню реакційну здатність і проникність у клітини. Це вимагає використання більш чутливих методів оцінки, здатних виявляти ефекти на клітинному та молекулярному рівнях.

Не менш важливим є врахування комбінованої дії агрохімікатів. У природних умовах організми зазнають впливу не однієї, а багатьох речовин одночасно. Біотехнологічні методи дозволяють оцінити саме цей сумарний ефект, що є їхньою суттєвою перевагою порівняно з класичними підходами.

Це особливо актуально для агроландшафтів, де застосовується широкий спектр препаратів [4].

Загалом біотехнологічні методи оцінювання та моніторингу екологічної безпеки агрохімікатів формують новий рівень контролю за станом довкілля. Вони дозволяють перейти від фіксації факту забруднення до розуміння його біологічних наслідків. Такий підхід є більш ефективним для попередження екологічних ризиків і забезпечення сталого розвитку сільського господарства.

1.3. Зарубіжний і вітчизняний досвід зниження токсичного навантаження агрохімічних речовин

У сучасному агровиробництві проблема зниження токсичного навантаження агрохімікатів розглядається як один із ключових напрямів забезпечення екологічної безпеки. Інтенсивне використання мінеральних добрив і пестицидів упродовж тривалого часу призвело до накопичення токсичних речовин у ґрунтах, воді та біоті. У відповідь на це в різних країнах сформувалися підходи, які поєднують технологічні, екологічні та управлінські рішення. Їхня спільна мета – зменшити кількість внесених хімічних речовин і водночас зберегти ефективність сільського господарства [33].

В Україні одним із основних напрямів є впровадження точного землеробства. Суть цього підходу полягає у використанні цифрових технологій для аналізу стану ґрунту, рослин і погодних умов. Завдяки цьому агрохімікати вносяться не рівномірно по всьому полю, а диференційовано – лише в тих зонах, де це дійсно необхідно [38]. Наприклад, ділянки з достатнім рівнем поживних речовин не потребують додаткового внесення добрив, що дозволяє уникнути їх надлишку. Практичні результати показують, що такий підхід може зменшити використання пестицидів і добрив на 20–40% без зниження врожайності. Крім того, зменшується ризик їх потрапляння у водні об'єкти та накопичення у ґрунті [40].

Іншим важливим напрямом є відновлення забруднених ґрунтів. В українській практиці широко застосовуються природні матеріали, здатні

зв'язувати токсичні речовини. До них належать цеоліти та біовугілля. Цеоліти мають пористу структуру і здатні адсорбувати важкі метали та залишки пестицидів, зменшуючи їх доступність для рослин [32]. Біовугілля, отримане шляхом термічної обробки органічної сировини, покращує структуру ґрунту, підвищує його водоутримуючу здатність і одночасно фіксує токсиканти. У результаті знижується їх міграція в рослини та ґрунтові води. Такі технології особливо ефективні на деградованих землях, де накопичення забруднювачів є найбільш вираженим [30].

Паралельно розвивається напрям біологізації землеробства. Йдеться про поступове зменшення використання синтетичних препаратів і заміну їх біологічними аналогами. Наприклад, замість хімічних засобів захисту рослин застосовуються біопрепарати на основі мікроорганізмів, які пригнічують розвиток шкідників або збудників хвороб. Такі засоби мають нижчу токсичність і швидше розкладаються у довкіллі. Крім того, впровадження сівозміни, використання сидератів і підвищення біорізноманіття агроландшафтів сприяють природному регулюванню чисельності шкідників, що зменшує потребу в пестицидах [36].

Важливим елементом вітчизняного досвіду є також система контролю та моніторингу використання агрохімікатів. Вона включає регулярне визначення їх вмісту у ґрунті, воді та продукції. На основі цих даних встановлюються гранично допустимі норми та розробляються рекомендації щодо безпечного використання препаратів. Однак сучасний підхід передбачає не лише фіксацію перевищень, а й оцінку ризиків. Це означає, що враховуються умови застосування, тип ґрунту, кліматичні фактори та інші параметри, які впливають на поведінку речовин у довкіллі [10].

Окрему проблему становлять непридатні та заборонені пестициди, які накопичилися в Україні за попередні десятиліття. Для їх знешкодження впроваджуються технології утилізації та переробки. Частина відходів піддається високотемпературному спалюванню з дотриманням екологічних вимог, інша – переробляється з можливістю повторного використання

окремих компонентів. Це дозволяє зменшити ризик потрапляння токсичних речовин у довкілля та знизити загальне навантаження [32].

Зарубіжний досвід демонструє ще більш комплексний підхід до вирішення цієї проблеми. У країнах Європейського Союзу активно впроваджується концепція інтегрованого управління агрохімікатами. Вона передбачає поєднання технологій точного землеробства, біологічних методів захисту рослин і жорсткого регулювання використання хімічних препаратів. Наприклад, у багатьох країнах діють обмеження на використання найбільш токсичних речовин, а також стимулюється застосування альтернативних методів [37].

Важливим інструментом є інтегрований екологічний моніторинг. Він базується на постійному спостереженні за станом ґрунтів, вод і біоти з використанням сучасних аналітичних технологій. Зокрема, застосовуються методи, які дозволяють визначати джерела забруднення та відстежувати шляхи поширення агрохімікатів. Це дає змогу оперативно реагувати на негативні зміни та запобігати їх поширенню [39].

У зарубіжній практиці також широко використовуються інноваційні методи очищення довкілля. Одним із перспективних напрямів є застосування окиснювальних процесів для руйнування стійких органічних сполук. Такі технології дозволяють перетворювати токсичні речовини на менш небезпечні або повністю їх нейтралізувати. Вони застосовуються для очищення води, особливо в регіонах із високим рівнем аграрного навантаження [41].

Ще одним прикладом є використання природних механізмів самоочищення. У багатьох країнах створюються буферні зони між сільськогосподарськими угіддями та водними об'єктами. Це можуть бути смуги рослинності, які затримують агрохімікати та запобігають їх потраплянню у воду. Такі прості, але ефективні рішення дозволяють значно знизити рівень забруднення без значних фінансових витрат [35].

Порівняння вітчизняного та зарубіжного досвіду показує, що, незважаючи на різні умови, основні напрями є спільними. До них належать

зменшення обсягів використання агрохімікатів, пестицидів зокрема (табл. 1.2.) підвищення точності їх застосування, розвиток альтернативних методів і вдосконалення системи контролю. Водночас у зарубіжній практиці більшою мірою реалізується комплексний підхід, який охоплює всі етапи – від виробництва препаратів до їх утилізації [19, 31, 38].

Таблиця 1.2.

Показники використання та токсичного навантаження агрохімікатів

Показник	Україна	Країни ЄС	США	Китай
<i>Використання пестицидів, кг/га</i>	2,3	3,5–4,0	2,5	13,1
<i>Загальний обсяг пестицидів, т/рік</i>	19000 – 78000	>350000	400000	>1700000
<i>Частка оброблених земель, %</i>	90–95%	80–90%	85–95%	>95%
<i>Частка небезпечних препаратів (I–II клас), %</i>	27%	<15%	10–15%	20–25%
<i>Наявність застарілих пестицидів, т</i>	15000 – 25000	<5 000	поодинокі випадки	значні локальні обсяги
<i>Рівень впровадження біологічних методів, % площ</i>	<10%	20–35%	15–25%	<10%
<i>Використання точного землеробства, % господарств</i>	15–20%	40–60%	50–70%	30–40%
<i>Зменшення використання пестицидів за останні роки, %</i>	≈30%	10–20%	стабільне	зростання або стабільне

Наведені статистичні дані свідчать, що Україна має відносно помірний рівень використання агрохімікатів у розрахунку на одиницю площі, однак

через значні площі сільськогосподарських угідь загальне екологічне навантаження залишається високим. Водночас частка небезпечних препаратів і наявність значних обсягів застарілих пестицидів формують додаткові ризики для довкілля [6].

У порівнянні з країнами ЄС і США, в Україні спостерігається нижчий рівень впровадження біологічних методів і технологій точного землеробства, що обмежує можливості зниження токсичного навантаження. Зарубіжний досвід показує, що саме поєднання скорочення хімічного впливу з біотехнологічними підходами є найбільш ефективним шляхом екологізації агровиробництва[14] .

Таким чином, сучасний досвід зниження токсичного навантаження агрохімічних речовин базується на інтеграції різних підходів. Ефективність досягається не за рахунок одного рішення, а шляхом поєднання технологічних інновацій, екологічних заходів і системного управління. Це дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити сталий розвиток аграрного сектору.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У межах дослідження біотехнологічних підходів до моніторингу та зниження екотоксичності агрохімікатів ключове значення має правильний вибір як самих агрохімічних речовин, так і біологічних об'єктів, на яких оцінюється їхній вплив. Це дозволяє отримати об'єктивні дані щодо токсичності, біодоступності та потенційного ризику для екосистем [35].

2.1. Характеристика досліджуваних агрохімікатів та об'єктів біотестування.

Досліджувані агрохімікати умовно поділяються на кілька основних груп залежно від їх призначення та хімічної природи: гербіциди, інсектициди, фунгіциди, а також мінеральні добрива з високим вмістом азоту та фосфору. Такий поділ є важливим, оскільки кожна група має специфічний механізм дії та різний рівень екологічної небезпеки [21].

Гербіциди становлять одну з найбільш поширених груп агрохімікатів, які застосовуються для контролю бур'янів у сільському господарстві. Вони можуть впливати на фотосинтетичні процеси рослин, блокуючи синтез важливих ферментів або порушуючи обмін речовин. У ґрунтовому середовищі деякі гербіциди здатні зберігатися тривалий час, що підвищує ризик їх накопичення та міграції у водні системи. Особливістю цієї групи є те, що навіть при низьких концентраціях можливий вплив на нецільові рослини та ґрунтову біоту [14].

Інсектициди використовуються для боротьби зі шкідливими комахами, однак їх дія часто не є вибірковою. Вони можуть впливати не лише на шкідників, але й на корисних комах, зокрема запилювачів. Частина інсектицидів має нейротоксичний механізм дії, що проявляється у порушенні передачі нервових імпульсів у комах. У природних умовах це може призводити до зниження чисельності популяцій і порушення екологічної рівноваги [14].

Фунгіциди застосовуються для контролю грибкових захворювань рослин. Їх дія спрямована на пригнічення розвитку патогенних грибів, однак вони також можуть впливати на корисні мікроорганізми ґрунту. Зміна мікробного складу ґрунту є одним із важливих індикаторів екотоксичності, оскільки мікроорганізми відіграють ключову роль у процесах розкладання органічної речовини та кругообігу елементів [14].

Окрему групу становлять *мінеральні добрива*, зокрема азотні та фосфорні сполуки. Хоча вони не завжди розглядаються як токсиканти у традиційному розумінні, їх надлишкове використання може призводити до серйозних екологічних наслідків. Зокрема, вимивання нітратів у підземні води або потрапляння фосфатів у поверхневі водойми спричиняє евтрофікацію, що порушує баланс водних екосистем [12, 18].

Для оцінки екотоксичності зазначених агрохімікатів використовуються різні об'єкти біотестування, які відрізняються чутливістю, екологічною роллю та рівнем організації. Основними групами тест-організмів є рослини, ґрунтові мікроорганізми, водні організми та безхребетні тварини (табл. 2.1.).

Рослини є одним із найпоширеніших об'єктів біотестування, оскільки вони безпосередньо контактують із ґрунтом і водою, у яких можуть міститися агрохімікати. У дослідженнях зазвичай використовуються швидкорослі види з високою чутливістю до змін умов середовища [29]. Основними показниками є схожість насіння, довжина коренів і пагонів, маса біомаси, а також інтенсивність фотосинтезу. Зниження цих показників свідчить про наявність токсичного впливу. Особливо інформативним є аналіз кореневої системи, оскільки вона першою контактує з забрудненим середовищем [38].

Ґрунтові мікроорганізми є важливим індикатором стану екосистеми, оскільки вони швидко реагують на зміни хімічного складу середовища. У дослідженнях оцінюється чисельність мікроорганізмів, їх видове різноманіття та ферментативна активність. Зниження активності мікробних процесів свідчить про пригнічення біологічної функції ґрунту. Особливо чутливими є

азотфіксуючі та целюлозоруйнівні бактерії, які відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин [40].

Водні організми використовуються для оцінки токсичності агрохімікатів у водному середовищі. Це можуть бути мікроскопічні водорості, ракоподібні або риби ранніх стадій розвитку. Основними показниками є виживаність, швидкість росту, поведінкові реакції та репродуктивна здатність. Особливу увагу приділяють організмам, які займають нижні рівні трофічних ланцюгів, оскільки вони найбільш чутливі до змін хімічного складу води [17].

Безхребетні організми, зокрема ґрунтові черви та комахи, також широко використовуються як тест-об'єкти. Вони відіграють важливу роль у підтриманні структури ґрунту та процесів розкладання органічних решток. Показниками токсичного впливу є смертність, зміни поведінки, зниження репродуктивної здатності та порушення фізіологічних функцій.

Таблиця 2.1.

Характеристика агрохімікатів та об'єктів біотестування

Група	Приклади впливу	Основний об'єкт біотестування	Ключові показники оцінки
<i>Гербіциди</i>	пригнічення фотосинтезу, вплив на бур'яни і нецільові рослини	рослини, ґрунтові мікроорганізми	схожість, ріст, ферментативна активність
<i>Інсектициди</i>	нейротоксична дія на комах	комахи, безхребетні	виживаність, поведінка, репродукція
<i>Фунгіциди</i>	вплив на гриби і мікрофлору ґрунту	мікроорганізми	видове різноманіття, активність ферментів
<i>Мінеральні добрива</i>	евтрофікація, зміна складу води і ґрунту	водні організми, рослини	ріст, концентрація нітратів, біомаса

Відповідно, характеристика досліджуваних агрохімікатів та об'єктів біотестування базується на поєднанні хімічних властивостей речовин і біологічної чутливості тест-систем. Такий підхід дозволяє отримати комплексну оцінку екотоксичності та створює основу для подальшого застосування біотехнологічних методів моніторингу та зниження негативного впливу агрохімікатів на довкілля [13].

2.2. Методи біоіндикації та біотестування для оцінки екотоксичності

Оцінювання екотоксичності агрохімікатів у сучасних умовах неможливе лише на основі хімічного аналізу. Визначення концентрації речовин у ґрунті чи воді не відображає їх реального впливу на живі системи. Саме тому широко застосовуються біоіндикаційні та біотестові методи, які дозволяють оцінити інтегральну реакцію біологічних об'єктів на забруднення. Їхня ключова особливість полягає в тому, що вони фіксують не лише наявність токсиканту, а й його біологічну дію [10].

Біоіндикація ґрунтується на використанні живих організмів або біоценозів як природних індикаторів стану середовища. Зміни в їх структурі, чисельності або функціонуванні відображають рівень антропогенного навантаження. На практиці біоіндикація застосовується для оцінки довготривалого впливу агрохімікатів, оскільки вона дозволяє виявити поступові зміни в екосистемах [9, 23].

Одним із найпоширеніших підходів є рослинна біоіндикація. Вона базується на здатності рослин реагувати на зміну хімічного складу ґрунту і повітря. У якості індикаторів використовуються види, чутливі до токсичних речовин. Основними показниками є зміна забарвлення листя, уповільнення росту, деформації органів, зниження інтенсивності фотосинтезу. Наприклад, при наявності залишків гербіцидів у ґрунті спостерігається пригнічення розвитку кореневої системи та зменшення маси рослинної біомаси [21, 27].

Особливе значення має мікробіологічна біоіндикація. Ґрунтові мікроорганізми дуже чутливі до змін хімічного складу середовища, тому їх

реакція є одним із перших сигналів забруднення. Оцінюється загальна чисельність мікрофлори, співвідношення між різними групами бактерій, а також активність ферментів, таких як дегідрогенази, каталази та уреаз. Зниження ферментативної активності свідчить про порушення біохімічних процесів у ґрунті, що може бути наслідком дії агрохімікатів [35].

Окремо виділяється водна біоіндикація, яка використовується для оцінки стану поверхневих вод. У цьому випадку індикаторами є безхребетні тварини, планктонні організми та водорості. Зміна їх видового складу дозволяє визначити рівень забруднення. Наприклад, зменшення різноманіття чутливих видів і домінування стійких форм часто свідчить про хімічне навантаження. Такі зміни можуть відбуватися навіть при низьких концентраціях агрохімікатів [34].

Біотестування, на відміну від біоіндикації, є більш стандартизованим лабораторним методом. Воно передбачає контрольоване експериментальне дослідження впливу певних концентрацій агрохімікатів на тест-організми. Це дозволяє отримати кількісні показники токсичності, такі як смертельні дози, інгібування росту або зміни фізіологічних параметрів [9, 16].

Одним із базових підходів є фітотестування. Воно полягає у вирощуванні рослин у середовищі з різними концентраціями агрохімікатів. Найчастіше аналізуються такі параметри, як відсоток проростання насіння, довжина кореня, висота пагонів і загальна біомаса. Зменшення цих показників у порівнянні з контролем свідчить про токсичний вплив. Фітотестування є простим у виконанні та дозволяє швидко оцінити загальний рівень забруднення [26].

Ще одним важливим напрямом є біотестування на безхребетних організмах. Найчастіше використовуються ґрунтові черви, дрібні ракоподібні та личинки комах. Ці організми відіграють ключову роль у функціонуванні екосистем, тому їх реакція є показовою. У процесі тестування оцінюють смертність, зміни поведінки, активність руху та здатність до розмноження.

Навіть незначні порушення цих параметрів можуть свідчити про наявність токсичного впливу [11].

Важливою перевагою біотестування є можливість оцінки сумарного ефекту різних речовин. У природних умовах агрохімікати зазвичай діють у суміші, тому їх комбінований вплив може відрізнятися від дії окремих компонентів. Біотестові системи дозволяють врахувати цей фактор і отримати більш реалістичну оцінку екологічного ризику.

Подальшим розвитком біотестових методів є використання багаторівневих тест-систем, які поєднують організмовий, клітинний та біохімічний рівні аналізу. Такий підхід дозволяє більш детально оцінити механізми токсичної дії агрохімікатів [13].

На клітинному рівні широко застосовуються тести на мембранну проникність і стабільність клітинних структур. Порушення цілісності клітинних мембран є одним із ранніх проявів токсичної дії. У рослин це може проявлятися у витіканні клітинного соку, а у мікроорганізмів – у зниженні життєздатності. Такі методи дозволяють виявити токсичний вплив ще до появи макроскопічних змін [20].

Окреме місце займають біотести з використанням водоростей. Вони є високочутливими до змін хімічного складу середовища, особливо до наявності гербіцидів. Основним показником є швидкість росту популяції та інтенсивність фотосинтезу. Зниження цих параметрів дозволяє швидко визначити наявність токсичного впливу у водному середовищі [21].

Для оцінки екотоксичності також застосовуються так звані комбіновані біотестові системи. Вони включають кілька тест-організмів різних трофічних рівнів. Наприклад, одночасно можуть використовуватися рослини, безхребетні та мікроорганізми. Це дозволяє отримати комплексну картину впливу агрохімікатів на екосистему в цілому. Результати таких тестів є більш інформативними, оскільки враховують різні біологічні реакції [23, 35].

Важливим аспектом є також стандартизація біотестових методів. Для отримання порівнянних результатів необхідно дотримуватися однакових умов

проведення експериментів: температури, освітлення, складу середовища та тривалості експозиції. Це дозволяє зменшити вплив зовнішніх факторів і забезпечити точність оцінки [36, 37].

Окремо слід відзначити використання біотестування для визначення порогових концентрацій агрохімікатів. Це дозволяє встановити рівні, при яких починаються негативні зміни у біологічних системах. Такі дані є основою для розробки екологічних нормативів і регулювання використання хімічних речовин у сільському господарстві [7].

Сучасні тенденції розвитку біоіндикаційних і біотестових методів спрямовані на їх автоматизацію та інтеграцію з цифровими технологіями [3]. Використання сенсорних систем і комп'ютерного аналізу дозволяє швидко обробляти великі масиви даних і виявляти тенденції змін у стані довкілля. Це значно підвищує ефективність екологічного моніторингу [11].

На основі вищенаведеного можна стверджувати, що біоіндикація та біотестування є ключовими інструментами оцінки екотоксичності агрохімікатів. Вони дозволяють не лише фіксувати наявність забруднення, а й аналізувати його біологічні наслідки на різних рівнях організації живої матерії – від клітинного до екосистемного.

2.3. Методичні підходи до застосування біотехнологій для зменшення токсичного впливу.

Зниження токсичного навантаження агрохімікатів у сучасних агроєкосистемах розглядається як комплексне завдання, яке поєднує екологічні, біологічні та технологічні рішення. Біотехнологічні підходи в цьому контексті спрямовані на використання природних механізмів самоочищення середовища, здатності живих організмів трансформувати або акумулювати токсичні сполуки, а також на штучне посилення цих процесів у контрольованих умовах [21].

Одним із базових методичних напрямів є *біоремедіація* ґрунтів і водних систем. Її суть полягає у використанні мікроорганізмів, які здатні розкласти

агрохімікати до менш токсичних або повністю нетоксичних продуктів. У природних умовах цей процес відбувається повільно, однак його можна суттєво прискорити шляхом створення сприятливих умов. До них належать оптимізація вологості, аерації, температури та забезпечення поживними речовинами для мікробних угруповань [41].

У межах біоремедіації виділяють кілька методичних підходів. Перший – природна біодеградація, коли процеси руйнування забруднювачів відбуваються без втручання людини. Він застосовується у випадках низького рівня забруднення або при наявності активної природної мікрофлори. Другий – стимульована біоремедіація, яка передбачає внесення в середовище додаткових компонентів (наприклад, джерел азоту, фосфору або кисню) для активізації мікроорганізмів. Третій – біоаугментація, що базується на введенні спеціально підібраних мікробних культур, здатних ефективно розкласти конкретні типи агрохімікатів [35].

Важливим елементом біотехнологічного підходу є фіторемедіація, тобто використання рослин для зменшення токсичного впливу. Рослини можуть виконувати різні функції: накопичувати забруднювачі, трансформувати їх або стабілізувати у ґрунті. Залежно від механізму дії виділяють фітоекстракцію (накопичення токсикантів у біомасі), фітодеградацію (розклад речовин у тканинах рослин) та фітостабілізацію (зменшення рухливості забруднювачів у ґрунті) [28].

Методично фіторемедіація передбачає ретельний підбір рослинних видів. Використовуються культури з високою швидкістю росту, розвиненою кореневою системою та здатністю витримувати токсичні умови. Також враховується здатність рослин до накопичення певних сполук без суттєвого пригнічення їх розвитку. У практиці часто застосовуються як сільськогосподарські культури, так і дикорослі види, адаптовані до конкретних умов середовища [28].

Ще одним важливим напрямом є застосування біосорбційних матеріалів. Біосорбенти – це природні або модифіковані речовини

біологічного походження, які здатні зв'язувати агрохімікати та зменшувати їх біодоступність. До них належать торф, деревне вугілля, лігнінвмісні матеріали, а також продукти переробки рослинної сировини. Їх дія базується на процесах адсорбції та іонного обміну [32].

У ґрунтових системах біосорбенти зменшують рухливість токсичних речовин, запобігаючи їх потраплянню у рослини та підземні води. У водних середовищах вони сприяють осадженню забруднювачів і покращенню якості води. Ефективність цього підходу залежить від фізико-хімічних властивостей матеріалу, зокрема пористості та площі поверхні.

Перспективним є також використання біополімерних і природних сорбентів у поєднанні з біологічними методами. Такі матеріали не лише зв'язують агрохімікати, але й створюють сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів. Наприклад, біовугілля може виконувати подвійну функцію: зменшувати доступність токсичних речовин і слугувати носієм для мікробних колоній. Це значно підвищує стабільність процесу очищення [18].

Окрему групу біотехнологічних методів становлять *ферментні підходи* до детоксикації. Деякі ферменти здатні каталізувати розклад агрохімкатів шляхом гідролізу або окиснення. У природних умовах такі процеси відбуваються у складі мікробних угруповань, однак їх можна інтенсифікувати шляхом використання біопрепаратів або ферментних комплексів. Це дозволяє прискорити трансформацію токсичних речовин у менш небезпечні форми [28].

Окремий напрям становить *використання мікробних консорціумів*, тобто сумішей різних видів мікроорганізмів. На відміну від монокультур, такі системи мають ширший спектр метаболічної активності. Це дозволяє одночасно розкладати різні типи агрохімкатів, включаючи стійкі органічні сполуки. Крім того, між мікроорганізмами часто виникають синергетичні взаємодії, які підвищують швидкість деградації токсикантів [9].

Окрему роль відіграє моніторинг ефективності біотехнологічних заходів. Для цього використовуються біоіндикаційні та біотестові методи, які дозволяють оцінити відновлення екосистеми після впливу агрохімкатів.

Основними показниками є відновлення мікробіологічної активності ґрунту, збільшення біорізноманіття, покращення ростових показників рослин та зниження загальної токсичності середовища [1, 28].

Загальним розвитком біотехнологічних рішень є комплексні системи очищення, у яких поєднуються різні біологічні механізми. На практиці це означає, що замість одного методу (наприклад, лише мікробного розкладу) застосовується комбінація підходів – мікроорганізми, рослини та сорбційні матеріали працюють одночасно. Така інтеграція підвищує ефективність зниження токсичності, оскільки різні компоненти агрохімікатів можуть елімінуватися різними шляхами [35].

Одним із прикладів є поєднання мікробної активності та рослинного покриву. Рослини створюють у ризосфері (прикореневій зоні) умови, які стимулюють розвиток мікроорганізмів. Кореневі виділення містять органічні сполуки, що слугують субстратом для бактерій. У результаті формується активна мікробна зона, де відбувається інтенсивний розклад агрохімікатів. Такий ефект особливо важливий для ґрунтів, забруднених гербіцидами та інсектицидами, які повільно розкладаються у природних умовах [7].

Важливим методичним аспектом є контроль умов середовища під час біотехнологічного очищення. Ефективність процесів значною мірою залежить від температури, кислотності (pH), вологості та доступності кисню. Наприклад, аеробні бактерії активніше розкладають органічні сполуки за наявності достатньої кількості кисню, тоді як анаеробні процеси домінують у щільних або перезволожених ґрунтах. Тому перед впровадженням біотехнологій обов'язково проводиться оцінка екологічних умов ділянки [26].

Важливим методичним елементом є поетапність застосування біотехнологій. На першому етапі проводиться діагностика рівня забруднення та визначення типу агрохімікатів. На другому – підбір відповідних біологічних агентів (мікроорганізмів, рослин або сорбентів). На третьому – безпосереднє впровадження технології очищення. Завершальний етап передбачає контроль відновлення екосистеми та оцінку залишкових концентрацій токсикантів.

Окремої уваги потребує використання біотехнологій у водних системах. Тут застосовуються як мікроорганізми, так і водні рослини, здатні поглинати або трансформувати агрохімікати. Наприклад, деякі водорості можуть акумулювати залишки пестицидів, зменшуючи їх концентрацію у воді. У поєднанні з біофільтраційними системами це дозволяє ефективно очищати невеликі водойми або стоки сільськогосподарського походження [24, 26].

Сучасні методичні підходи також включають елементи математичного моделювання та прогнозування. За допомогою моделей можна оцінити швидкість розкладу агрохімікатів, ступінь їх міграції та потенційний вплив на екосистеми. Це дозволяє оптимізувати біотехнологічні процеси ще на етапі планування, зменшуючи витрати ресурсів і підвищуючи ефективність заходів.

У практиці застосовуються комплексні системи оцінки, які включають аналіз стану ґрунтової мікрофлори, показників росту рослин, біорізноманіття та хімічного складу середовища. Особливу увагу приділяють відновленню мікробіологічної активності ґрунту, оскільки саме вона є ключовим індикатором функціональної стабільності екосистеми. Повернення ферментативної активності до природного рівня свідчить про успішність біотехнологічного впливу [37].

Важливим аспектом є довготривала дія біотехнологічних систем. На відміну від фізико-хімічних методів очищення, біологічні підходи не завжди дають миттєвий результат, але забезпечують поступове та стійке зниження токсичності. Це пов'язано з тим, що процеси деградації, акумуляції та трансформації речовин залежать від життєвих циклів організмів і екологічних умов [8, 22].

У сучасній практиці також застосовується принцип екологічного балансування, який передбачає не лише усунення забруднення, а й відновлення природних функцій екосистеми. Це включає формування стійких рослинних угруповань, відновлення ґрунтової структури та повернення природних трофічних зв'язків. Біотехнологічні методи в цьому випадку виступають інструментом екологічної реставрації [3, 7].

Окрему роль відіграє адаптивне управління біотехнологічними процесами. Воно передбачає постійне коригування методів залежно від отриманих результатів моніторингу. Наприклад, у разі недостатньої ефективності мікробної деградації може бути змінений склад мікробних консорціумів або додані додаткові поживні речовини. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність очищення навіть у складних умовах забруднення [3].

Таблиця 2.2

Методичні підходи до біотехнологічного зниження токсичного впливу агрохімікатів

<i>Підхід</i>	<i>Основний механізм дії</i>	<i>Об'єкт застосування</i>	<i>Очікуваний результат</i>
<i>Біоремедіація</i>	Мікробний розклад агрохімікатів	грунт, вода	зниження концентрації токсикантів
<i>Фіторемедіація</i>	Поглинання та трансформація речовин рослинами	грунт, забруднені ділянки	вилучення або стабілізація забруднювачів
<i>Біосорбція</i>	Адсорбція токсикантів природними матеріалами	грунт, вода	зменшення біодоступності
<i>Мікробні консорціуми</i>	Сумісна дія різних мікроорганізмів	грунт, ризосфера	прискорена деградація сполук
<i>Ферментні технології</i>	Біохімічне розщеплення речовин	локальні забруднення	трансформація токсикантів у менш небезпечні форми
<i>Інтегровані системи</i>	Поєднання кількох біопроцесів	агроекосистеми	комплексне зниження токсичного навантаження

Узагальнюючи, слід зазначити, що сучасні методичні підходи до застосування біотехнологій для зменшення токсичного впливу агрохімікатів

формують багаторівневу систему екологічного управління. Вони охоплюють не лише безпосереднє очищення середовища, але й довгострокове відновлення його функціональної стабільності.

Ефективність таких підходів визначається поєднанням кількох ключових факторів: правильного підбору біологічних агентів, оптимізації умов їх діяльності, використання комбінованих технологій та постійного екологічного моніторингу. Саме така інтегрована модель дозволяє забезпечити реальне зниження токсичного навантаження агрохімікатів і підтримувати екологічну рівновагу агроєкосистем.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Оцінка рівня екотоксичності досліджуваних агрохімікатів

Одним із найважливіших напрямів інтенсифікації сільського господарства є збалансована хімізація землеробства. Вона передбачає раціональне застосування мінеральних добрив, мінеральної підкормки для тварин, засобів захисту рослин та інших агрохімічних ресурсів з урахуванням біологічних потреб культур, властивостей ґрунту та екологічних вимог. Збалансована хімізація сприяє підвищенню врожайності сільськогосподарських культур, покращенню якості продукції, відтворенню родючості ґрунтів і забезпеченню стабільності агроєкосистем. Водночас ефективність цього напрямку залежить від дотримання науково обґрунтованих норм внесення добрив та впровадження сучасних технологій агрохімічного моніторингу [1, 14, 38]. Оцінка екотоксичності агрохімікатів у сучасних умовах передбачає комплексний аналіз їх впливу на різні компоненти агроєкосистеми, включаючи ґрунт, воду, рослини та мікроорганізми. Такий підхід є більш інформативним порівняно з традиційним хімічним контролем, оскільки дозволяє врахувати не лише концентрацію діючих речовин, а й їх біологічні ефекти, які можуть проявлятися навіть при низьких дозах [5].

У межах дослідження проаналізовано найбільш поширені в Україні агрохімікати, які мають різний механізм дії та різний рівень екологічної небезпеки: гербіциди «Раундап» і «Гранстар», інсектицид «Актара», фунгіцид «Топсин-М», а також мінеральні добрива – аміачна селітра і суперфосфат.

Гербіцид «Раундап» (гліфосат) є одним із найбільш широко використовуваних препаратів у сільському господарстві для знищення бур'янів. Його дія базується на блокуванні синтезу амінокислот у рослинах, що призводить до поступового припинення їх росту. Екологічна особливість цього препарату полягає в його здатності зв'язуватися з частинками ґрунту, що зумовлює його відносно тривале збереження у верхньому шарі ґрунту. Це створює ризик впливу не лише на бур'яни, а й на ґрунтову мікрофлору. У

результаті спостерігається зниження активності мікроорганізмів, які беруть участь у процесах розкладання органічної речовини, що може призводити до поступового погіршення ґрунтової родючості.

Частота використання «*Раундапу*» становить понад 25% від загального обсягу серед всіх гербіцидів світу з щорічним застосовується близько 800–900 тис. тон.

Гербіцид «*Гранстар*», діючою речовиною якого є трибенурон-метил, характеризується селективною дією і використовується переважно для захисту зернових культур. Незважаючи на відносно меншу токсичність порівняно з неселективними гербіцидами, його регулярне застосування може викликати зміни у видовому складі рослинного покриву. Біотестування показує, що навіть низькі концентрації можуть пригнічувати розвиток чутливих рослинних видів, що призводить до зменшення біорізноманіття агроценозів і зміни їхньої структури.

Інсектицид «*Актара*» на основі тіаметоксаму належить до системних препаратів, які проникають у тканини рослин і забезпечують захист від комах-шкідників. Однак така системність одночасно створює ризик впливу на нецільові організми. У водному середовищі та ґрунті цей препарат може негативно впливати на безхребетних організмів, включаючи корисних комах і водних ракоподібних. Особливу небезпеку становить його вплив на організми, що знаходяться на нижчих рівнях трофічних ланцюгів, оскільки це може призводити до каскадних змін у всій екосистемі. Додатковим фактором ризику є можливість накопичення залишків речовини у рослинній продукції та їх подальше потрапляння в харчові ланцюги.

Фунгіцид «*Топсин-М*», діючою речовиною якого є тіофанат-метил, використовується для боротьби з грибковими захворюваннями рослин. Його дія спрямована на порушення процесів клітинного поділу грибів, однак у ґрунтовому середовищі він може впливати і на корисні мікроорганізми. Зокрема, спостерігається зниження чисельності бактерій, які беруть участь у кругообігу азоту, а також грибів-симбіонтів, що негативно позначається на

загальній біологічній активності ґрунту. Це може призводити до уповільнення процесів мінералізації органічних залишків і зниження родючості ґрунтів.

Мінеральні добрива, зокрема аміачна селітра та суперфосфат, не є токсичними у прямому сенсі, однак їх надмірне використання має значний екологічний вплив. Високі дози *азотних сполук* сприяють накопиченню нітратів у ґрунтових водах, що може призводити до погіршення якості питної води. *Фосфорні добрива*, у свою чергу, при вимиванні у водойми сприяють розвитку процесів евтрофікації, які супроводжуються надмірним ростом водоростей, зниженням концентрації кисню та загибеллю гідробіонтів. Крім того, надлишок мінеральних добрив змінює кислотно-лужний баланс ґрунту, що опосередковано впливає на доступність поживних елементів і життєдіяльність мікроорганізмів [2, 22-25, 29,].

Таблиця 3.1.

Порівняльна оцінка екотоксичності агрохімікатів

Агрохімікат Тип	Основний механізм дії	Рівень екотоксичності	Основний екологічний вплив
гербіцид <i>Гліфосат</i>	пригнічення синтезу амінокислот	середній– високий	вплив на ґрунтову мікрофлору, накопичення в ґрунті
гербіцид <i>Гранстар</i> (трибенурон- метил)	блокування ростових процесів рослин	середній	зміна структури рослинних угруповань
інсектицид <i>Актара</i> (тіаметоксам)	нейротоксична дія на комах	високий	вплив на безхребетних, ризик біоаккумуляції
фунгіцид <i>Топсин-М</i> (тіофанат- метил)	порушення клітинного поділу грибів	середній	пригнічення ґрунтових мікроорганізмів
добриво <i>Аміачна селітра</i>	надлишок азоту в системі	середній– високий	забруднення вод нітратами
добриво <i>Суперфосфат</i>	накопичення фосфатів	середній	евтрофікація водойм

Отже, оцінка рівня екотоксичності досліджуваних агрохімікатів показує, що найбільший екологічний ризик пов'язаний із препаратами системної дії, зокрема інсектицидами, а також із гербіцидами, що мають високу стійкість у ґрунтовому середовищі. Водночас навіть традиційно «безпечні» мінеральні добрива при порушенні норм внесення можуть спричиняти значні екологічні наслідки. Це підтверджує необхідність комплексного підходу до оцінки екотоксичності, який поєднує хімічні, біологічні та екологічні методи аналізу.

3.2. Ефективність застосованих біотехнологічних методів зниження токсичності

Оцінка ефективності біотехнологічних методів зниження токсичного впливу агрохімікатів передбачає аналіз того, наскільки застосовані підходи здатні змінювати стан екосистеми в бік її відновлення. У межах дослідження ефективність розглядається не лише як зменшення залишкових концентрацій агрохімікатів у ґрунті чи воді, а як комплексний показник, що включає відновлення біологічної активності, стабілізацію мікробіоценозів, покращення стану рослин та зниження токсичного навантаження на живі організми [3, 11].

Одним із найбільш результативних підходів є застосування мікробних біотехнологій, зокрема біоремедіації. У забруднених агрохімікатами ґрунтах спостерігається природне пригнічення мікрофлори, зменшення ферментативної активності та уповільнення процесів розкладу органічної речовини. Після внесення мікробних препаратів або стимуляції природних мікроорганізмів відбувається поступове відновлення цих процесів. Найбільш виражений ефект спостерігається щодо таких агрохімікатів, як гліфосат і тіофанат-метил, де мікроорганізми здатні включати їх у метаболічні шляхи та трансформувати у менш токсичні сполуки. Ефективність цього процесу підтверджується зниженням залишкових концентрацій діючих речовин і підвищенням активності ґрунтових ферментів [25].

Важливим показником ефективності біоремедіації є також відновлення функціональної структури ґрунту. Після біологічної обробки поступово

збільшується чисельність бактерій, грибів і актиноміцетів, що свідчить про відновлення екологічної рівноваги. Особливо важливим є повернення до нормального рівня таких процесів, як азотфіксація та мінералізація органічних решток, які безпосередньо впливають на родючість ґрунтів [34].

Фіторе mediaційні методи також демонструють помітну ефективність, особливо у випадках локального або помірного забруднення. Рослини, що використовуються як фітоаккумулятори або фітостабілізатори, здатні зменшувати рухливість агрохімікатів у ґрунті або частково поглинати їх у свої тканини. Наприклад, при наявності залишків гліфосату або трибенурон-метилу у ґрунті спостерігається поступове зниження їх доступності для інших організмів завдяки активності кореневої системи. Одночасно відбувається покращення структури ґрунту, що сприяє зменшенню міграції токсичних речовин у глибші горизонти [20, 28].

Ефективність біосорбційних матеріалів проявляється у швидкому зменшенні біодоступної частини агрохімікатів. Біовугілля, торф та інші органічні сорбенти здатні зв'язувати значну частину пестицидів у ґрунтового розчині, знижуючи їх токсичний вплив на рослини та мікроорганізми. Особливо ефективним цей підхід є у випадках інсектицидів системної дії, таких як тіаметоксам, де зменшення рухливості речовини суттєво знижує її екологічну небезпеку [10].

Подальший аналіз ефективності біотехнологічних підходів дозволяє оцінити не лише первинне зменшення концентрацій агрохімікатів, а й довготривалі зміни у функціонуванні агроєкосистем. У цьому контексті ключовим є відновлення біологічної рівноваги, яка порушується внаслідок тривалого хімічного навантаження. Особливу увагу приділяють стабільності ефекту після завершення активного внесення біопрепаратів або припинення фітоочищення [3, 37].

Показовим є те, що після застосування мікробних біотехнологій спостерігається не лише зменшення залишкових концентрацій таких речовин, як гліфосат, «Актара» (тіаметоксам) та «Топсин-М» (тіофанат-метил), але й

поступове відновлення природної структури ґрунтових угруповань. Це проявляється у збільшенні різноманіття мікроорганізмів та відновленні їх функціональної активності. Зокрема, підвищується інтенсивність процесів азотного циклу, що є важливим показником відновлення родючості ґрунту [7].

Фіторе mediaційні системи демонструють ефективність у довготривалому зниженні токсичного навантаження, однак їх результативність значною мірою залежить від типу забруднення та властивостей ґрунту. У випадку гербіцидів спостерігається поступове зниження їх біодоступності завдяки стабілізуючій дії кореневої системи рослин. При цьому ефект накопичується поступово, що робить цей метод більш придатним для довгострокового екологічного відновлення, ніж для швидкого очищення [28].

Окремо слід відзначити ефективність комбінованих біотехнологічних систем, які поєднують мікробні, рослинні та сорбційні механізми. Такі системи забезпечують багаторівневий вплив на забруднення, що дозволяє досягати більш стійкого результату. Наприклад, біовугілля не лише зменшує рухливість агрохімікатів у ґрунті, але й створює сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів. У свою чергу, рослини стабілізують ґрунтову структуру та зменшують ризик міграції токсикантів у водні системи [10, 13].

Ефективність біотехнологічних методів також оцінюється через біоіндикаційні показники. Після застосування біологічних підходів спостерігається покращення стану тест-організмів, зокрема рослин і ґрунтових безхребетних. Зростає відсоток схожості насіння, збільшується довжина кореневої системи та зменшується рівень фізіологічного стресу. Це свідчить про зниження токсичного навантаження навіть у випадках, коли хімічний аналіз ще фіксує залишкові концентрації агрохімікатів [21].

Важливим аспектом є також ефективність біотехнологій у водних екосистемах. Після застосування біофільтраційних систем та водних рослин спостерігається зменшення концентрації інсектицидів та добрив, що потрапляють у водойми з аграрних територій. Це супроводжується

відновленням кисневого режиму та покращенням умов існування гідробіонтів. У довгостроковій перспективі це сприяє зменшенню явищ евтрофікації [19].

Оцінка ефективності дозволяє також виділити важливу закономірність: біотехнологічні методи найбільш результативні у випадку поєднання кількох механізмів одночасно. Самостійне застосування одного підходу часто дає обмежений ефект, тоді як інтегровані системи забезпечують стабільне зниження токсичності та відновлення екосистеми [34].

Відповідно, результати аналізу свідчать, що біотехнологічні методи мають високу екологічну ефективність, особливо при їх комплексному застосуванні. Вони забезпечують не лише зменшення концентрації агрохімікатів, а й поступове відновлення функціональної стабільності агроекосистем, що є ключовою умовою екологічної безпеки сучасного сільського господарства.

3.3. безпечність.

Незважаючи на значні обсяги застосування пестицидів у сучасному землеробстві, проблема втрат урожаю залишається актуальною. За наявними даними, втрати сільськогосподарської продукції до збирання врожаю можуть сягати 40 %, а після збирання — до 10 % [5]. Це зумовлено, зокрема, обмеженою тривалістю дії хімічних препаратів та здатністю шкідливих організмів адаптуватися до них. Підвищення норм і кратності внесення засобів захисту рослин часто призводить до розвитку резистентності у фітопатогенів і комах-шкідників, що знижує ефективність хімічного захисту та негативно впливає на екологічний стан агроекосистем [38].

В умовах подорожчання агрохімікатів та їхнього дефіциту все більшого поширення набувають біопрепарати як складова екологічно орієнтованих технологій вирощування сільськогосподарських культур. Їх використання сприяє активізації ґрунтової мікробіоти, підвищенню родючості ґрунту та покращенню умов живлення рослин. Завдяки заселенню ризосфери корисними мікроорганізмами посилюються фізіолого-біохімічні процеси в рослинах, що позитивно впливає на їх ріст і розвиток. За даними наукових

досліджень, застосування біопрепаратів для передпосівної обробки насіння стимулює проростання, прискорює проходження фенологічних фаз і сприяє формуванню вищої врожайності, приріст якої може становити в середньому близько 30 % [4].

Біопрепарати являють собою засоби біологічного походження, створені на основі живих мікроорганізмів або продуктів їхньої життєдіяльності. До таких організмів належать бактерії, гриби, віруси та окремі види рослинних організмів. Їх застосування сприяє стимуляції росту і розвитку рослин, підвищенню їхньої імунної стійкості, покращенню засвоєння елементів живлення та посиленню захисту від шкідливих організмів. Крім того, біопрепарати позитивно впливають на стан ґрунту, активізуючи корисну мікрофлору та сприяючи відновленню його родючості.

Використання біологічних препаратів є важливою складовою екологізації сучасного землеробства, оскільки дозволяє отримувати безпечну для людини та довкілля сільськогосподарську продукцію. Актуальність їх застосування зростає також у зв'язку з посиленням екологічних вимог у країнах Європейського Союзу щодо обмеження використання окремих хімічних засобів захисту рослин. Зокрема, під заборону або суттєві обмеження потрапили деякі інсектициди групи неонікотиноїдів, серед яких імідаклоприд та інші діючі речовини. Відповідно до сучасної екологічної політики ЄС, до 2030 року передбачається скорочення використання та ризиків від застосування хімічних пестицидів на 50 %, що зумовлює необхідність ширшого впровадження біологічних методів захисту рослин та підвищення родючості ґрунтів [4, 16].

Світовий ринок засобів біологічного контролю, незалежно від їхньої біологічної основи (бактерії, мікроміцети, віруси, ентомофаги чи акарифаги), характеризується високими темпами розвитку. За експертними оцінками, його обсяг зріс з 3,24 млрд дол. США у 2022 році до 5,23 млрд дол. США у 2023 році. Подальші прогнози свідчать про збереження тенденції до активного

зростання, оскільки в період 2024–2032 років середньорічний приріст ринку очікується на рівні 14,9–16,4 % [4].

В Україні розвиток ринку біопрепаратів також відзначається позитивною динамікою. Так, у 2016 році темпи його зростання становили понад 13 %, а у 2018 році перевищили 38 %. Однак повномасштабна війна, розпочата у 2022 році, призвела до зниження обсягів ринку на 20–30 %. Попри складні економічні умови, уже в 2023 році спостерігалось суттєве відновлення галузі, що супроводжувалося зростанням ринку біологічних препаратів приблизно на 50 % порівняно з попереднім роком [30].

Виробництво біопрепаратів у світовому масштабі подано на діаграмі 3.1. [13]. На Україну припадає 10,3%

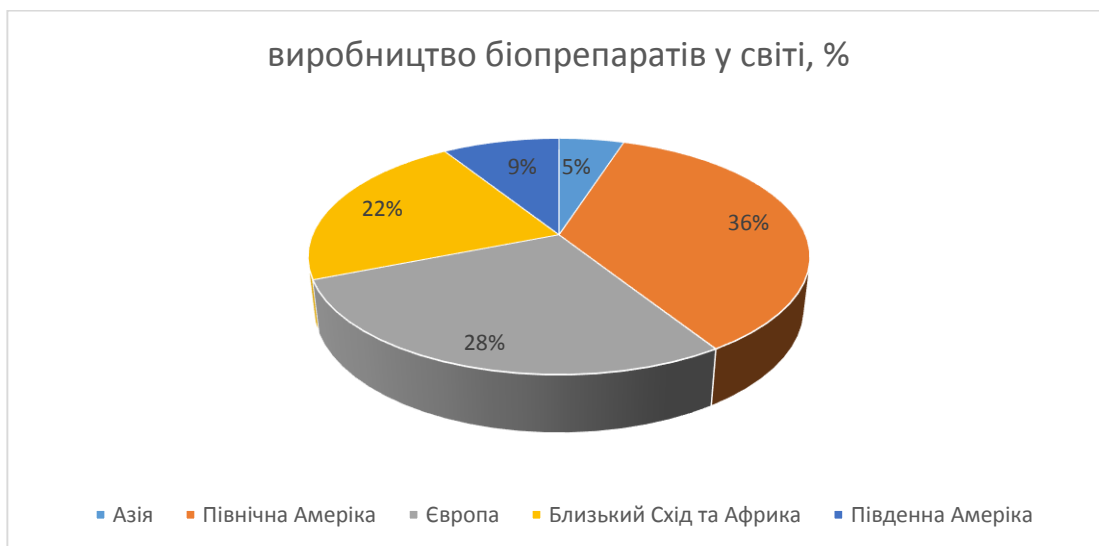


Рис. 3.1. Співвідношення виробництва біологічних препаратів у світі, %

Світовий ринок виробників сягає понад 500 компаній. Серед яких лідерами є BASF SE (Німеччина), Syngenta AG (Швейцарія), Bayer AG (Німеччина), UPL (Індія), Corteva Agriscience (США), The Mosaic Company (США), Pro Farm Group Inc. (США), Gowan Company (США), Vegalab SA (Швейцарія), Lallemand Inc. (Канада), Valent BioSciences LLC (США) [4; 14].

До 1990 року на території України функціонувало понад 268 біофабрик, біопереробних підприємств і біолабораторій, які забезпечували виробництво та впровадження засобів біологічного захисту рослин. У цей період частка застосування біологічного методу захисту сільськогосподарських культур

досягала 27 %. Проте після 1991 року внаслідок економічних і структурних змін у аграрному секторі значна частина таких підприємств припинила свою діяльність. За різними оцінками, було ліквідовано або законсервовано близько 160 біопідприємств.

Станом на 2019 рік в Україні продовжували функціонувати лише 24 біофабрики та біолабораторії, що свідчить про суттєве скорочення виробничої бази галузі. Водночас розвиток екологічно безпечних технологій вирощування сільськогосподарських культур та зростання попиту на біопрепарати сприяли поступовому відновленню вітчизняного біотехнологічного сектору. Серед провідних українських виробників біологічних засобів захисту рослин і мікробіологічних препаратів варто відзначити ПП «БТУ-Центр», ДП «Ензим», ТОВ «БІОНА СЕРВІС ПЛЮС», ТОВ «БІОНОРМА», Черкаський НВПБК, ДУ «Волинська обласна фітосанітарна лабораторія», «Кіровоградська обласна фітосанітарна лабораторія », «Львівська обласна фітосанітарна лабораторія», «Полтавська обласна фітосанітарна лабораторія», «Харківська обласна фітосанітарна лабораторія». Серед наукових установ — Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН, Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, Інститут агроєкології і природокористування НААН, Інститут фізіології рослин і генетики НАН України [4].

Всі існуючі біопрепарати для рослинництва як у світі, так і в Україні можна розділити на 5 основних категорій (рис. 3.2).

Аналіз сучасного стану ринку біопрепаратів в Україні свідчить про істотні структурні зміни в сегменті біологічних засобів захисту рослин. За останні роки частка інокулянтів, основу яких становлять азотфіксувальні мікроорганізми, знизилася з 65 до 27,2 %, тоді як частка біофунгіцидів зросла з 27 до 63,5 % [16]. Така тенденція відображає зростання зацікавленості аграріїв у біологічних методах контролю фітопатогенів та прагнення до зменшення використання хімічних фунгіцидів.

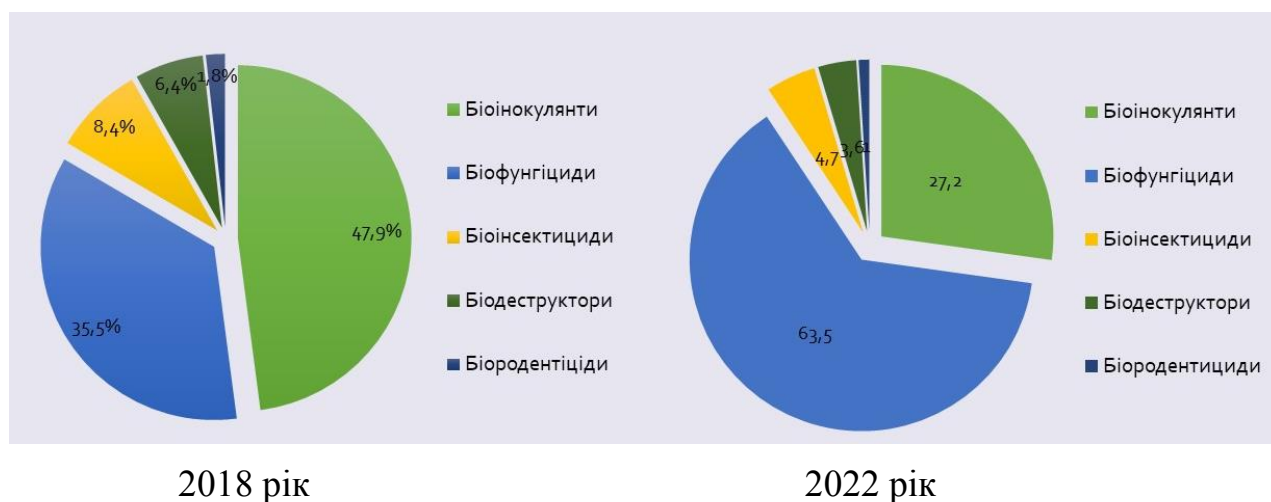


Рис. 3.2. Основні класи біопрепаратів за дією

За даними Державного реєстру пестицидів і агрохімікатів, станом на 2024 рік в Україні дозволено до застосування близько 252 біологічних засобів захисту рослин, серед яких 135 препаратів виробляються 38 вітчизняними підприємствами, а 117 препаратів імпортуються від виробників із 28 країн світу [30]. Це свідчить про активний розвиток ринку біопрепаратів та розширення можливостей їх використання у сучасних системах землеробства.

Біоінокулянти належать до групи мікробіологічних препаратів, дія яких спрямована на покращення азотного живлення рослин завдяки симбіотичній або асоціативній азотфіксації. До їх складу входять штами азотфіксувальних мікроорганізмів, здатних зв'язувати молекулярний азот атмосфери та забезпечувати ним рослини. Технологія застосування інокулянтів передбачає переважно передпосівну обробку насіння, що створює умови для ефективної колонізації кореневої системи та формування взаємовигідних зв'язків між рослиною і мікроорганізмами. Поштовхом до широкого впровадження інокулянтів стало відкриття механізмів симбіотичної азотфіксації у бобових культурах, що дало змогу значно зменшити потребу в мінеральних азотних добривах і підвищити екологічну безпеку агротехнологій.

Діючою основою біоінокулянтів є спеціалізовані штами азотфіксувальних бактерій, здатних вступати у симбіотичні взаємовідносини з рослинами-господарями. Для інокуляції сої найчастіше використовують бактерії роду *Bradyrhizobium japonicum*, які забезпечують формування

ефективних бульбочок на коренях рослин та активну фіксацію атмосферного азоту. Для інших бобових культур застосовують специфічні види ризобіальних бактерій, зокрема *Rhizobium leguminosarum* для гороху, *Rhizobium phaseoli* для квасолі, *Sinorhizobium meliloti* для люцерни, *Rhizobium ciceri* для нуту, *Bradyrhizobium lupini* для люпину та *Rhizobium galegae* для козлятнику. Використання відповідних штамів мікроорганізмів забезпечує високу ефективність симбіотичної азотфіксації, покращує азотне живлення рослин і сприяє підвищенню продуктивності бобових культур. Численними багаторічними дослідженнями доведено високу ефективність передпосівної бактеризації насіння бобових культур. Інокуляція насіння азотфіксувальними мікроорганізмами сприяє посиленню фотосинтетичної активності рослин, оптимізації процесів азотного живлення та формуванню більш продуктивних агроценозів. За даними наукових досліджень, використання інокулянтів забезпечує підвищення врожайності бобових культур у середньому на 20–35 %, а також покращення якісних показників урожаю, зокрема збільшення вмісту протеїну на 5–6 % [30].

На сучасному етапі розвитку агробіотехнологій сфера застосування інокулянтів значно розширилася і не обмежується лише бобовими культурами. Нині мікробіологічні препарати широко використовуються для передпосівної обробки насіння різних груп сільськогосподарських культур, зокрема зернових колосових, технічних, просапних культур, а також кукурудзи та соняшнику [4, 30]. Така практика спрямована на покращення мінерального живлення рослин, стимулювання їх росту та підвищення продуктивності агроценозів.

Для інокуляції насіння соняшнику застосовують препарати на основі мікроміцету *Cladosporium tenuissimum*, зокрема «Біотрінсік» та «180 ПС». У технологіях вирощування кукурудзи й ріпаку використовуються препарати BINOC та BioStim, створені на основі бактерій родів *Bacillus* і *Azotobacter*. Серед вітчизняних біопрепаратів поширення набули «Діазофіт», «Діазобактерин» та «Ризоентерин», застосування яких сприяє забезпеченню

зернових культур біологічним азотом і дає можливість зменшити норми внесення мінеральних азотних добрив на 25–30 % без істотного зниження продуктивності посівів.

Для овочевих культур, зокрема томатів, капусти та цукрових буряків, рекомендовано використання препаратів «Азотобактерин», «Біоплант-К» та «Клепс». Їх застосування сприяє активізації корисної ґрунтової мікрофлори, покращенню засвоєння елементів живлення, підвищенню стійкості рослин до несприятливих чинників навколишнього середовища та формуванню вищої врожайності. Загалом розширення спектра культур, для яких використовуються інокулянти, свідчить про зростання ролі біологічних препаратів у сучасних системах сталого та екологічно орієнтованого землеробства.

Біодеструктори є відносно новою групою біологічних препаратів, дія яких характеризується пролонгованим ефектом. Їх основне призначення полягає у прискоренні розкладання рослинних решток в агроєкосистемах, пригніченні розвитку фітопатогенних мікроорганізмів та покращенні стану ґрунту шляхом оптимізації його агрохімічних і агрофізичних властивостей. Завдяки активізації процесів мінералізації органічної речовини біодеструктори сприяють поверненню поживних елементів у ґрунтовий кругообіг та підвищенню його родючості.

Залежно від складу діючих агентів біодеструктори поділяють на однокомпонентні, багатокомпонентні та ферментативні. Однокомпонентні препарати містять один штам бактерій або мікроскопічних грибів, який забезпечує реалізацію біодеструктивних процесів. Багатокомпонентні препарати включають декілька штамів мікроорганізмів із різними функціональними властивостями, що дає змогу комплексно впливати на процеси трансформації органічної речовини. Ферментативні біодеструктори створюються на основі продуктів метаболізму мікроорганізмів, зокрема культуральних рідин, ферментів, полісахаридів, вітамінів і фітогормонів, однак не містять життєздатних клітин мікроорганізмів.

Результати сучасних досліджень свідчать, що застосування комплексних біодеструкторів для переробки рослинних решток сприяє так званому мікробіологічному вирівнюванню ґрунтового середовища. Передбачається, що внесення таких препаратів стимулює формування та розвиток ефективних мікробних угруповань, які забезпечують більш раціональне використання енергетичних ресурсів і поживних речовин у ґрунті. Це сприяє їх рівномірному розподілу в кореневмісному шарі та створює сприятливі умови для росту й розвитку сільськогосподарських культур.

З огляду на перспективність цього напрямку, значна увага науковців приділяється пошуку нових високоефективних штамів мікроорганізмів-продуцентів, здатних забезпечувати інтенсивніші процеси деструкції органічних решток і покращувати функціонування ґрунтових екосистем. Удосконалення складу біодеструкторів та створення препаратів нового покоління розглядається як один із важливих шляхів підвищення ефективності біологізації сучасного землеробства.

Станом на початок 2024 року в Державному реєстрі пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні, зареєстровано понад 25 біодеструкторів різного призначення [16]. Ці препарати застосовуються для прискорення процесів розкладання органічних решток у агроекосистемах, активізації ґрунтової мікробіоти та покращення кругообігу поживних речовин. Вони відрізняються між собою складом діючих агентів, спектром мікроорганізмів, механізмом дії та рівнем біологічної активності.

Серед біодеструкторів, представлених на українському ринку, найбільшого поширення набули препарати «Екостерн», «Целюлад Л», «Polymix», «MicoCell», «Вермистим Д», «Біонорма Деструктор», «Деструктор Стерні (ДС)», «Plantonit Destructor», «Біокомплекс-БТУ», «Біосистемс», «Органік-Баланс», «Лігногумат», «Ризобакт Гуміфікатор» та низка інших препаратів. Їх використання спрямоване на прискорення мінералізації післяжнивних решток, покращення агрофізичних і агрохімічних властивостей

грунту, а також зниження інфекційного навантаження за рахунок пригнічення розвитку окремих груп патогенних мікроорганізмів [4].

Розширення асортименту біодеструкторів на вітчизняному ринку свідчить про зростання зацікавленості агровиробників у біологічних методах управління родючістю ґрунту та ефективному використанні органічних решток як джерела поживних речовин. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку сталого землеробства, спрямованого на збереження ґрунтових ресурсів та підвищення екологічної безпеки аграрного виробництва.

Біофунгіциди належать до групи біологічних засобів захисту рослин, основу яких становлять живі мікроорганізми або продукти їхнього метаболізму. Ці препарати використовуються для профілактики та контролю захворювань сільськогосподарських культур, спричинених грибними і бактеріальними патогенами, протягом усього вегетаційного періоду.

Важливою перевагою біофунгіцидів є їхня здатність забезпечувати тривалий захисний ефект і впливати на широкий спектр збудників хвороб. Їх застосування дозволяє ефективно стримувати розвиток таких захворювань, як кореневі гнилі, фузаріоз, альтернаріоз, фітофтороз, фомоз, борошниста роса, бактеріози, різні види плямистостей, а також інші грибні та бактеріальні інфекції.

На сьогодні для біологічного контролю фітопатогенів досліджено понад 440 видів мікроорганізмів, які можуть використовуватися як діючі агенти біофунгіцидних препаратів. Найбільш поширеними серед них є представники родів *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Trichoderma*, *Clonostachys*, *Pantoea* та *Burkholderia*, а також окремі види дріжджів. Механізм їхньої антагоністичної дії ґрунтується на синтезі широкого спектра біологічно активних речовин, зокрема антибіотиків, бактеріоцинів, сидерофорів, ферментів та інших вторинних метаболітів, здатних пригнічувати ріст і розвиток патогенних мікроорганізмів [4, 30].

Серед біофунгіцидів, зареєстрованих і широко застосовуваних в Україні, особливе поширення отримали препарати «Біополіцид», «Фітоцид»,

«МікоХелп», «Склероцид», «Фітодоктор», «Триходермін», «ФітоХелп» та «Фітоспорин» [16, 30]. Їх використання сприяє зменшенню залежності від хімічних фунгіцидів, підвищенню екологічної безпеки агровиробництва та формуванню стійких агроєкосистем.

Біоінсектициди та **біоакарициди** є спеціалізованою групою біологічних засобів захисту рослин, основу яких становлять живі мікроорганізми або продукти їхнього метаболізму, зокрема специфічні біологічно активні сполуки та токсини вибіркової дії. Ці препарати характеризуються високою селективністю щодо цільових організмів і застосовуються для регулювання чисельності шкідливих комах та кліщів в агроценозах.

Біоінсектициди призначені для контролю популяцій комах-шкідників на різних стадіях їхнього розвитку, насамперед імаго — дорослої статевозрілої стадії життєвого циклу. Механізм їхньої дії ґрунтується на інфікуванні шкідника мікроорганізмами або впливі специфічних токсичних метаболітів, які порушують процеси живлення, розвитку, розмноження чи функціонування життєво важливих систем організму. Біоакарициди, своєю чергою, використовуються для обмеження чисельності кліщів-фітофагів, які завдають значної шкоди сільськогосподарським культурам. Застосування таких препаратів дає змогу ефективно контролювати шкідників без суттєвого негативного впливу на корисну ентомофауну, ґрунтові організми та навколишнє середовище. Використання біоінсектицидів і біоакарицидів розглядається як важливий елемент інтегрованих систем захисту рослин, оскільки сприяє зниженню пестицидного навантаження на агроєкосистеми, уповільнює формування резистентності у шкідливих організмів та забезпечує екологічно безпечне виробництво сільськогосподарської продукції.

Біоінсектицидні та біоакарицидні препарати забезпечують ефективний контроль широкого спектра шкідливих організмів сільськогосподарських культур. Їх застосування спрямоване на обмеження чисельності колорадського жука, капустяної совки, вогнівок, яблуневої плодожерки, лучного та американського білого метеликів, різних видів молей, павутинних кліщів, а

також численних видів листогризучих гусениць [27–30]. Важливою перевагою цих препаратів є їх висока селективність і безпечність для корисної ентомофауни, зокрема бджіл та інших комах-запилювачів, що має особливе значення в умовах екологізації сучасного агровиробництва.

На вітчизняному ринку біологічних засобів захисту рослин представлені препарати «Лепідоцид-БТУ», «Бітоксисабацилін-БТУ», «Актофіт», «Актоверм», «Ентоцид», «Нематофагін-М», «Боверин-М», «Метаризин-М», «Вертицилін-М», «Мікосан», «Біотрол» та інші [4]. Більшість із них створені на основі ентомопатогенних бактерій, грибів або продуктів їхньої життєдіяльності та характеризуються високою ефективністю щодо окремих груп шкідників. Серед біоінсектицидів і біоакарицидів іноземного виробництва найбільшого поширення набули препарати Companion, Kodiak, Serenade, Nemato-Guard, Biomet, Bioderma Ketmium та інші [30]. Розширення асортименту біологічних засобів захисту рослин на світовому та вітчизняному ринках свідчить про зростання ролі біологічних методів контролю шкідливих організмів у сучасних інтегрованих системах захисту рослин.

Біородентициди є спеціалізованою групою біологічних засобів захисту, призначених для контролю чисельності мишоподібних гризунів у агроєкосистемах. Їх основу становлять патогенні для гризунів мікроорганізми, переважно бактерії роду *Salmonella*, які характеризуються високою вибірковістю дії та дають змогу зменшити використання хімічних родентицидів, потенційно небезпечних для довкілля і здоров'я людини.

Найчастіше як біологічний агент у складі біородентицидів використовуються бактерії *Salmonella enteritidis* var. *Issatchenko*, здатні спричиняти масові інфекційні захворювання серед популяцій мишоподібних гризунів. Після потрапляння до організму шкідника бактерії активно розмножуються у шлунково-кишковому тракті, проникають у кровоносну систему та викликають септицемію, що зрештою призводить до загибелі тварини. Летальний ефект зазвичай настає через 5–14 діб після споживання зараженої принади. Особливістю дії біородентицидів є поступовий розвиток

інфекційного процесу, завдяки чому гризуни не припиняють споживання препарату навіть після появи перших симптомів захворювання. Це сприяє ефективнішому поширенню збудника серед популяції шкідників та підвищує результативність біологічного контролю. Важливою перевагою родентопатогенних бактерій є їх висока специфічність щодо цільових організмів. Незважаючи на належність до роду *Salmonella*, використовувані штами не становлять суттєвої небезпеки для людини, свійських тварин, корисної дикої фауни та більшості нецільових видів гризунів. Завдяки цьому біородентициди розглядаються як екологічно безпечна альтернатива традиційним хімічним засобам боротьби зі шкідниками. Біологічні родентицидні препарати застосовуються у вигляді зернових принад для контролю чисельності мишоподібних гризунів на посівах сільськогосподарських культур, луках і пасовищах, у садах, лісових насадженнях, місцях зберігання продукції, на елеваторах, млинах, складах, у тваринницьких приміщеннях та інших об'єктах, де існує ризик пошкодження врожаю або запасів продукції гризунами.

На ринку України представлений широкий асортимент біологічних родентицидів, призначених для регулювання чисельності мишоподібних гризунів у сільському господарстві та місцях зберігання продукції. Серед найбільш відомих препаратів цієї групи слід відзначити «BIO Genius», «Раттер», «Бактородентицид», біородентицид «Майсі», «Родента-Біо» та «Антимишин». Їх застосування спрямоване на зниження чисельності шкідників шляхом використання біологічних механізмів впливу, що дає змогу мінімізувати використання хімічних родентицидів і зменшити антропогенне навантаження на навколишнє середовище. Серед зарубіжних біологічних засобів боротьби з гризунами особливу увагу привертає препарат BIORAT, розроблений кубинською компанією LABIOFAM. Завдяки високій ефективності та біологічній спрямованості дії цей препарат набув поширення більш ніж у 20 країнах світу та використовується для контролю й обмеження чисельності популяцій гризунів у різних агроекологічних умовах [30].

Поширення біологічних родентицидів як на вітчизняному, так і на міжнародному ринках свідчить про зростаючий інтерес до екологічно безпечних методів захисту сільськогосподарських угідь і запасів продукції від шкідливої діяльності гризунів.

3.4. Практичні рекомендації щодо екологічно безпечного використання агрохімікатів

Екологічно безпечне використання агрохімікатів є важливою складовою сучасного агровиробництва, оскільки дозволяє знизити негативний вплив на ґрунти, водні ресурси, біорізноманіття та здоров'я людини. Практичні рекомендації в цій сфері базуються на поєднанні агротехнологічних, біологічних і організаційних підходів, спрямованих на мінімізацію ризиків при збереженні ефективності захисту рослин і підвищення врожайності [34].

Одним із ключових принципів є точне дозування агрохімікатів. Надмірне внесення препаратів, таких як гліфосат, «Гранстар» (трибенурон-метил), «Актара» (тіаметоксам) або «Топсин-М» (тіофанат-метил), є основною причиною накопичення токсичних залишків у ґрунті та воді. Тому важливо дотримуватися рекомендованих норм внесення, які залежать від типу культури, фази розвитку рослин та рівня засміченості полів. Наприклад, для гліфосату критично важливо уникати повторного внесення на одній ділянці протягом короткого періоду, оскільки це значно підвищує ризик накопичення залишків у верхньому шарі ґрунту [11].

Наступним важливим напрямом є вибір препаративної форми та способу внесення. Рідкі формуляції зазвичай забезпечують більш рівномірний розподіл діючої речовини, тоді як гранульовані форми можуть зменшувати ризик зносу вітром. Використання сучасних штангових обприскувачів із системами контролю норми внесення дозволяє значно зменшити перевитрати препаратів і мінімізувати їх потрапляння на нецільові об'єкти [34].

Важливу роль відіграє також просторова організація обробки полів. Обов'язковим є створення буферних зон уздовж водних об'єктів, де

використання агрохімікатів обмежується або повністю забороняється. Це дозволяє зменшити ризик потрапляння інсектицидів і гербіцидів у водойми, що особливо важливо для таких препаратів, як тіаметоксам, який є токсичним для водних безхребетних навіть у низьких концентраціях.

Окремо слід звернути увагу на чергування культур і сівозміну. Монокультура сприяє накопиченню специфічних шкідників і хвороб, що, у свою чергу, призводить до збільшення використання агрохімікатів. Впровадження сівозміни дозволяє природним чином зменшити потребу в пестицидах. Наприклад, чергування зернових культур із бобовими сприяє збагаченню ґрунту азотом і зменшує потребу у мінеральних добривах, таких як аміачна селітра [9].

Важливим напрямом є також інтегрований захист рослин, який передбачає поєднання хімічних, біологічних і агротехнічних методів. У цьому підході агрохімікати використовуються лише як крайній захід, коли інші методи не забезпечують достатнього рівня контролю шкідників або хвороб. Наприклад, перед застосуванням інсектициду «Актара» доцільно використовувати біологічні методи контролю популяцій шкідників або механічні способи обмеження їх поширення.

Важливу роль відіграє також моніторинг стану ґрунтів і водних ресурсів. Регулярне визначення залишкових концентрацій пестицидів і добрив дозволяє своєчасно виявляти потенційні екологічні ризики. У практиці це може включати як лабораторні аналізи, так і використання біоіндикаторів, зокрема тест-рослин або ґрунтових організмів [34].

Таким чином, екологічно безпечне використання агрохімікатів базується на системному підході, який включає не лише правильне внесення препаратів, а й організацію агровиробництва в цілому. Такий підхід дозволяє суттєво знизити екологічне навантаження та забезпечити більш стале використання агроєкосистем.

Подальше зниження екологічних ризиків, пов'язаних із застосуванням агрохімікатів, значною мірою залежить від впровадження технологій точного

землеробства. Йдеться про системи, які дозволяють враховувати просторову неоднорідність полів і вносити препарати диференційовано. Це особливо актуально для гербіцидів і добрив, таких як гліфосат або аміачна селітра, де надмірне внесення в окремих зонах не підвищує врожайність, але суттєво збільшує екологічне навантаження [28].

Практично це реалізується через використання GPS-навігації, карт врожайності та датчиків стану ґрунту. Наприклад, у зонах із високим вмістом органічної речовини потреба у мінеральному азоті знижується, тоді як на бідніших ділянках вона може бути вищою. Такий підхід дозволяє уникати надлишкового внесення аміачної селітри, що зменшує ризик нітратного забруднення підземних вод [9].

Важливим напрямом є також перехід до більш селективних і малотоксичних препаратів. Сучасні агрохімічні засоби поступово змінюються у бік зменшення екологічної стійкості діючих речовин. Наприклад, заміна широкоспектральних інсектицидів на більш специфічні препарати знижує вплив на корисну ентомофауну. У випадку «Актари» (тіаметоксам) рекомендовано обмежувати її використання у періоди активного цвітіння культур, щоб мінімізувати ризик для запилювачів [34].

Окрему увагу слід приділяти часу внесення агрохімікатів. Обробка рослин у несприятливих погодних умовах, таких як сильний вітер або дощ, значно підвищує ризик зносу препарату та його потрапляння у водні об'єкти або на нецільові культури. Наприклад, застосування гліфосату у період підвищеної вологості може сприяти його міграції у нижні горизонти ґрунту.

Важливим елементом є використання біологічних альтернатив хімічним засобам захисту рослин. До таких альтернатив належать біофунгіциди, біоінсектициди та мікробні препарати, які містять живі культури бактерій або грибів. Їх застосування дозволяє зменшити залежність від традиційних агрохімікатів, зокрема таких як «Топсин-М», і знизити загальний токсичний фон агроєкосистеми.

Практично ефективним є також використання органічних добрив і сидератів. Заміна частини мінеральних добрив органічними дозволяє зменшити ризик накопичення нітратів і фосфатів у ґрунті. Наприклад, вирощування сидератів (гірчиці, люпину, фацелії) сприяє природному збагаченню ґрунту поживними речовинами та покращенню його структури [34].

У межах екологічно безпечного землеробства важливим є також післяобробний контроль територій. Після внесення агрохімікатів доцільно проводити моніторинг залишкових речовин у ґрунті та воді. Це дозволяє своєчасно виявляти перевищення допустимих концентрацій і коригувати подальші агротехнічні заходи [28].

Таблиця 3.2

**Додаткові практичні рекомендації екологічно безпечного
застосування агрохімікатів**

Напрямок	Практичний захід	Приклад	Екологічний результат
<i>Точне землеробство</i>	диференційоване внесення	GPS-карти полів	зменшення перевитрат препаратів
<i>Оптимізація доз</i>	корекція норм внесення	зниження дози гліфосату на родючих ґрунтах	зменшення залишкових концентрацій
<i>Час обробки</i>	врахування погодних умов	уникнення обробки перед дощем	зниження міграції в ґрунт і воду
<i>Біологічна заміна</i>	біопрепарати замість хімічних	біоінсектициди замість «Актари»	зменшення токсичного навантаження

<i>Органічне живлення</i>	сидерати компости	та люпин як сидерат	покращення структури грунту
<i>Контроль після внесення</i>	моніторинг залишків	аналіз ґрунту і води	раннє виявлення забруднення

Узагальнюючи вищенаведене, практичні рекомендації щодо екологічно безпечного використання агрохімікатів повинні базуватися на поєднанні технологічних інновацій, біологічних підходів та суворого екологічного контролю. Лише комплексне впровадження таких заходів дозволяє зменшити негативний вплив препаратів на довкілля та забезпечити стабільність агроєкосистем у довгостроковій перспективі.

ВИСНОВКИ

На основі літературного аналізу встановлено, що проблема екотоксичності агрохімікатів є однією з ключових у сучасному сільському господарстві, оскільки інтенсивне застосування хімічних засобів захисту рослин і мінеральних добрив супроводжується накопиченням токсичних речовин у компонентах довкілля.

1. У роботі обґрунтовано доцільність використання біотехнологічних методів для оцінки та зниження екотоксичності агрохімікатів. Зокрема, показано, що біоіндикація та біотестування є ефективними інструментами моніторингу екологічного стану середовища, оскільки дозволяють оцінювати сумарний вплив токсичних речовин на живі організми. Використання тест-рослин, мікроорганізмів і водних організмів забезпечує отримання об'єктивної інформації про рівень токсичності навіть у випадках, коли концентрації агрохімікатів є відносно низькими.
2. Дослідження показало, що біотехнологічні підходи до зниження токсичного впливу агрохімікатів базуються на використанні природних механізмів детоксикації. Найбільш ефективними серед них є біоремедіація, що забезпечує розклад токсичних сполук за участю мікроорганізмів і дозволяє зменшувати їх концентрацію у ґрунті та воді; фіторемедіація, яка сприяє акумуляції або стабілізації агрохімікатів у рослинній масі, що знижує їх біодоступність та застосування біосорбентів, які у свою чергу, ефективно зв'язують токсичні речовини, обмежуючи їх міграцію та вплив на живі організми.
3. Оцінка рівня екотоксичності досліджуваних агрохімікатів показала, що найбільш небезпечними з екологічної точки зору є інсектициди системної дії, зокрема тіаметоксам, який впливає на широкий спектр нецільових організмів. Гербіциди, такі як гліфосат, характеризуються здатністю накопичуватися у ґрунті та впливати на

мікробіологічні процеси. Фунгіциди, зокрема тіофанат-метил, можуть пригнічувати корисну мікрофлору, що негативно позначається на функціонуванні ґрунтових екосистем. Водночас встановлено, що мінеральні добрива при надмірному застосуванні також створюють значний екологічний ризик через забруднення водних ресурсів нітратами та фосфатами.

4. Біологічні препарати є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного агровиробництва. Їх використання сприяє збереженню екологічної рівноваги агроекосистем, покращенню стану ґрунтового середовища, зменшенню антропогенного навантаження на довкілля та виробництву безпечної і якісної сільськогосподарської продукції. Результати дослідження свідчать, що на світовому ринку біопрепаратів, середньорічний темп приросту становить близько 8,5 %. В Україні станом на 2024 рік у Державному реєстрі пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання, зареєстровано близько 135 біологічних засобів захисту рослин вітчизняного виробництва від 38 компаній-виробників, а також 117 препаратів іноземного походження, представлених виробниками з 28 країн світу.
5. Розроблені практичні рекомендації щодо екологічно безпечного використання агрохімікатів передбачають оптимізацію дозування, впровадження технологій точного землеробства, використання сівозмін і біологічних альтернатив, а також регулярний екологічний моніторинг. Встановлено, що комплексне застосування цих заходів дозволяє суттєво зменшити токсичне навантаження на довкілля без зниження ефективності сільськогосподарського виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив та пестицидів: Монографія. В. П. Патики, Н. А. Макаренко, Л. І. Моклячук та ін.; За ред. В. П. Патики К.: Основа, 2005. 300 с.
2. Агрохімікати. Встановлення допустимих концентрацій шкідливих речовин ДСТУ 4944:2008. К.:Держспоживстандарт України, 2009. 8 с.
3. Біомоніторинг у контексті цифрової екології: інтеграція біологічних, аналітичних та інформаційних методів у системах спостереження за станом довкілля / О. Ничик, А. Котинський, О. Тогачинська, О. Салавор, Н. Бублієнко *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 5 (154). С. 94–100.
4. Бунас А.А, Ткач С.Д., Дворецький В.В. Біопрепарати в Україні та світі : сучасні тренди й перспективи. *Агроекологічний журнал*. 2024. № 4. С. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2024.317163>
5. Бурда Ю.А. Пестициди, їх вплив на довкілля та здоров'я людини / А.Ю. Бурда, Н.В. Бунякіна, О.Г. Дрючко *Екологія. Довкілля. Енергозбереження 2024* : зб. матеріалів V Міжнар. наук.-практ. конф. (19 груд. 2024 р., Полтава). Полтава : Нац. ун-т м. Юрія Кондратюка, 2024. С. 78-80.
6. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В., Грищук І.А., Ушкалов В.О. Екологічні ризики: природа і критерії. *Науково-практичний журнал “Екологічні науки”*. 2020. № 4 (31). С. 131–135.
7. Волошина Н.О. Екологія Частина І: навчальний посібник. К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2020. 243 с.
8. Волошина Н.О. Екологія Частина ІІ: навчальний посібник. К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2020. 219 с.
9. Гарафонова О., Маргасова В. Перспективи впровадження інноваційних технологій розвитку агропро-мислового комплексу України. *Socio-economic relations in the digital society*. 2022. Vol. 3 (45). С. 19–28.
10. Гойстер О. С., Дзядевич С. В., Мінченко О. Г. Застосування сучасних біосенсорних технологій в екотоксикологічному моніторингу деяких

токсикантів природного (мікотоксини) та антропогенного (пестициди) походження. частина II. пестициди. Сенсорна електроніка і мікросистемні технології, 10(4), 2013. С. 40–59.

URL: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2013.4.110704>

11. Інновації точного землеробства у зменшенні екологічних ризиків в агроєкосистемах України. URL: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.3.2024.314928>
12. Ісаєнко В.М., Білик Т.І., Кіпніс Л.С. Основи екологічної токсикології, лаб. практикум. Київ, Україна: НАУ, 2007, 68 с.
13. Клімкіна І.І., Грунтова В.Ю. Основи екологічної токсикології. Методичні рекомендації. Донецьк, Україна: НТУ, 2015, 44 с.
14. Коршун М.М., Мартіянова Ю.В., Горбачевський Р.В. Гігієнічна оцінка міграції нових пестицидів із ґрунту в нижні шари атмосферного повітря. *Доповіді Вінницького національного медичного університету*. 2023. Вип. 27 (1). С. 144–149.
15. Крутякова В., Гулич О., Янсе Л. Стан і проблеми ринку біологічних засобів захисту рослин в Україні. *Bulletin of Agricultural Science*. 2023. Т. 101. № 1. С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202301-04..>
16. Лисиченко Г.В., Хміль Г.А., Барбашев С.В., Забулонов Ю.Л., Тищенко Ю.Є. Екологічний ризик: методологія оцінювання та управління: навчальний посібник. Київ: Наукова думка, 2014. 328 с
17. Ліщук А.М., Парфенюк А.І., Городиська І.М., Бородай В.В., Драга М.В. Основні важелі управління екологічними ризиками в агроценозах. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 2. С. 74–85
18. Макаренко Н. А., Бондарь В. І., Борщ Г. М. Екотоксикологічна оцінка біодобрив (продуктів ферментації біогазової установки) на предмет їх відповідності вимогам органічного виробництва. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 4. С. 20–24.
19. Мартіянова Ю.В., Коршун М.М. Прогнозування ступеню небезпечності забруднення ґрунту, підземних та поверхневих вододжерел пестицидами

- різних хімічних класів залежно від ґрунтово-кліматичних умов. *Український науковий медичний молодіжний журнал*. 2021. Т. 124. № 2. С. 77–88.
20. Монарх В.В. Оцінка екологічних ризиків забруднення пестицидами компонентів агроєкосистеми. *Збалансоване природокористування*. 2014. № 1. С. 206–212.
 21. Назарук М.М., Бота О.В. Дослідження екологічних ризиків як ключовий елемент оцінки впливу на довкілля. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2020. № 34. С. 100–107.
 22. Ничик, О. В. Екологічні наслідки застосування пестицидів під час вирощування харчової сировини в Україні: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції, 17-25 март 2015 година. - Софія «Бял ГРАД-БГ» ООД. – Том 13.– С. 57-59.
 23. Палапа Н.В., Гончар С.М. Екологічні ризики, пов'язані із сільськогосподарською діяльністю людини. *Агроєкологічний журнал*. 2022. №1. С. 68–80.
 24. Петрук Р.В. «Наукове обґрунтування оптимальних форм інтегрованого управління екологічною безпекою непридатних пестицидів та пестицидвмісних відходів.» Автореферат дис. д-ра тех. наук. Київ, Україна, 2020
 25. Сидорчук П.С. Екологічні ризики та наслідки застосування пестицидів. Multidisciplinary academic notes. Theory, methodology and practice: The XXVII International Scientific and Practical Conference (Prague, Czech Republic, July 12–15, 2022). Р. 60–62
 26. Сорочан О.О. Біохімічні основи екотоксикології, навч посіб. Донецьк, Україна : Оксамит-Текс, 2006, 80 с.
 27. Тохтарь К.І., Гаврилюк Ю.В. Чи можливе безпечне використання пестицидів. *Агрохімія і ґрунтознавство: міжвід. тем. наук. збірник*. Харків: ННЦ “ІГА ім. О.Н. Соколовського”. 2020. Вип. 90. С. 76–85.

28. Цицюра Я.Г., Шкатула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фіторемедіації та фіторекультивуації у сучасних системах землеробства. Вінниця: ТОВ “Друк”, 2022. 1200 с.
29. Яковець Л.А. Екотоксикологічна оцінка зернової продукції агроценозів за вмістом залишків пестицидів в умовах Лісостепу Правобережного. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. № 16. С. 226–237.
30. Agricultural Biologicals Market Size, Share, and Trends 2024 to 2034. URL: <https://www.precedenceresearch.com/agricultural-biologicals-market>.
31. Basso B., Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3 (4). P. 254–256.
32. Bhakta I., Phadikar S., Majumder K. State of the art technologies in precision agriculture: a systematic review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019. Vol. 99 (11). P. 4878–4888
33. Biological Control Agents Strategic Report. 2022. URL: https://commodityinsights.spglobal.com/biological_control_agents-2022.html.
34. Hrynevych O., Blanco Canto M., Jiménez García M. Tendencies of precision agriculture in Ukraine: Dis-ruptive smart farming tools as cooperation drivers. *Agriculture*. 2022. Vol. 12 (5). 698.
DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12050698>.
35. Lata C., Muthamilarasan M., Prasad, M. Biotechnological interventions for improving drought tolerance in cereals. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2018. 38(8). P. 920–936. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15065325>.
36. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*. 2016. Vol. 529 (7584). P. 84–87
37. Lishchuk A., Parfenyk A., Furdychko O., Boroday V., Beznosko I., Drebot O., Karachinska N. Ecotoxicological hazard of pesticide use in traditional agricultural technologies. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25 (2). P. 274–289.

38. Lishchuk A., Parfenyk A., Horodyska I., Boroday V., Ternovyi Y., Tymoshenko L. Environmental Risks of the Pesticide Use in Agrocenoses and their Management. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24 (3). P. 199–212.
39. Méndez-Vázquez L.J., Lira-Noriega A., Lasa-Covarrubias R., Cerdeira-Estrada S. Delineation of site-specific management zones for pest control purposes: Exploring precision agriculture and species distribution modeling approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2019. Vol. 167. 105101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105101>.
40. Timmis K. N. The contribution of microbial biotechnology to sustainable development goals. *Microbial Biotechnology*, 10(5), P. 984–987.
41. Zaman Q.U. Precision agriculture technology: A pathway toward sustainable agriculture. Chapter 1. In: *Precision Agriculture Academic Press*. 2023. P. 1–17.