

ЗЕЛЕНІ НАНОГЕРБІЦИДИ НА ОСНОВІ РОСЛИННИХ МЕТАБОЛІТІВ: САМООРГАНІЗАЦІЯ ЯК НОВА ПАРАДИГМА СТАЛОГО ЗАХИСТУ РОСЛИН

Придеткевич Ю.О., магістр хімії, асистент
Заклад вищої освіти

Подільський державний університет, м. Кам'янець-Подільський,
pridetkeviculia@pdatu.edu.ua

Сучасний агропромисловий комплекс стикається з фундаментальним протиріччям: з одного боку, необхідно забезпечити продовольчу безпеку зростаючого населення планети, з іншого — мінімізувати екологічний вплив засобів захисту рослин. Традиційні хімічні гербіциди, попри їхню ефективність, мають низку недоліків: низька цільова доставка (менше 0,1% активної речовини досягає мішені), розвиток резистентності бур'янів, токсичний вплив на нецільові організми та накопичення в агроекосистемах. Нанотехнологічні підходи до створення гербіцидів пропонують шляхи вирішення цих проблем, однак традиційні наноносії (полімери, ліпіди, неорганічні матеріали) часто мають обмежену біосумісність, складні у виробництві та викликають регуляторні побоювання. У цьому контексті особливої уваги заслуговує концепція «зелених наногербіцидів» на основі рослинних метаболітів, здатних до самоорганізації в наночастинки без використання синтетичних носіїв [1].

Фітохімічні наноасамблі являють собою новий клас безкаркасних наноструктур, повністю сформованих з рослинних метаболітів — поліфенолів, алкалоїдів, флавоноїдів, терпеноїдів та інших вторинних сполук — шляхом спонтанної самоорганізації через нековалентні взаємодії. Цей підхід принципово відрізняється від традиційного нанокапсулювання, де активна речовина ізольована від середовища синтетичним носієм. У випадку сама гербіцидна молекула або її природний попередник виконує одночасно роль «вантажу» та «контейнера». Самоорганізація рослинних метаболітів у наночастинки відбувається за рахунок сукупності слабких міжмолекулярних взаємодій. Водневі зв'язки відіграють ключову роль в організації поліфенолів, які містять численні гідроксильні групи, утворюючи стабільні тривимірні мережі. Динамічні ковалентні зв'язки, дисульфідні містки, можуть додатково зміцнювати структуру, зберігаючи при цьому оборотність і чутливість до зовнішніх стимулів. Важливою перевагою самоорганізації є її спонтанний характер — процес відбувається без застосування енергоємних методів, токсичних зшиваючих агентів або складного обладнання, що робить його екологічно чистим та економічно доцільним.

Поліфенольні наноасамблі є одним із найбільш вивчених типів. Поліфеноли — великий клас вторинних метаболітів, що включає флавоноїди, дубильні речовини, фенольні кислоти. Завдяки наявності численних фенольних гідроксильних груп вони демонструють високу здатність до самоасоціації через водневі зв'язки. Танінова кислота, один із найбільш вивчених поліфенолових лігандів, здатна утворювати стабільні наноконкомплекси з різноманітними

гербіцидними молекулами. Алкалоїдні наносистеми, своєю чергою, представлені азотовмісними сполуками (берберин, сангвінарин, кофеїн), які проявляють гербіцидні властивості, порушуючи фізіологічні процеси в рослинах-конкурентах. Наявність ароматичних кілець та гетероатомів створює передумови для їхньої самоасоціації. Сапонінові наноасамблі — глікозиди стероїдної або тритерпеноїдної природи з амфіфільною структурою — забезпечують здатність до самоорганізації в міцелоподібні структури виконуючи функцію природних емульгаторів [2].

Функціональні властивості фітохімічних наногербіцидів включають підвищену стабільність до ультрафіолетового випромінювання, вологи та температурних коливань. Нанорозмірні агрегати проявляють покращену адгезію до поверхні листків завдяки численным функціональним групам, зменшують поверхневий натяг та підвищують утримання препарату навіть на гідрофобних поверхнях. Крім того, використання рослинних метаболітів забезпечує низьку токсичність для ссавців, водних організмів та корисних комах, мінімізуючи вплив на культурні рослини.

Подолання резистентності бур'янів є однією з найсерйозніших проблем сучасного рослинництва. Фітохімічні наноасамблі пропонують два стратегічних підходи. Перший — багатоцільова дія, коли комбінування декількох гербіцидних сполук з різними механізмами в одній наночастинці ускладнює розвиток резистентності. Другий — використання нових принципів дії, оскільки багато рослинних метаболітів мають унікальні механізми, відмінні від синтетичних препаратів, що дозволяє ефективно контролювати популяції, вже резистентні до традиційних гербіцидів [1].

Незважаючи на значний потенціал, практичне впровадження стикається з викликами. Масштабування виробництва потребує адаптації лабораторних методів до промислових об'ємів із збереженням контролю за розміром та стабільністю частинок. Стандартизація сировини ускладнена варіабельністю складу рослинних екстрактів залежно від сорту, умов вирощування та методу екстракції. Довгострокова екологічна безпека потребує досліджень впливу на ґрунтові мікробні спільноти та кругообіг поживних речовин. Нарешті, економічна конкурентоспроможність на початковому етапі може поступатися традиційним препаратам, що вимагає оптимізації технологічних процесів.

Список використаної літератури

1. Крутякова В.І., Гулич О.І., Янсе Л.А. Стан і проблеми ринку біологічних засобів захисту рослин в Україні. Вісник аграрної науки. 2023. № 1 (838). С. 30–39.
2. Перспективи розробки препаратів для сільського господарства на основі наночастинок / Дерев'янюк С.В. та ін. Вісник аграрної науки. 2019. № 10 (799). С. 44–54.