

<https://doi.org/10.15407/frg2022.04.351>

УДК 581.1

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ІНГІБІТОРІВ СУКЦИНАТДЕГІДРОГЕНАЗИ З МІКРОЕЛЕМЕНТАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ

Л.М. МИХАЛЬСЬКА¹, О.Л. ЗОЗУЛЯ², В.В. ШВАРТАУ¹

¹Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17

²ТОВ «Сингента Україна»
03022 Київ, вул. Козацька, 120/4
e-mail: victorschwartau@gmail.com

Ефективний контроль хвороб, інтегрований із системами живлення, важливий для нарощування продуктивності пшениці озимої та інших культурних рослин. Застосування фунгіцидів класу SDHI з триазолами та стробілуринами сьогодні є основою контролювання шкодочинних збудників хвороб у рослинництві. Адепідин класу SDHI ефективний в інтегрованих системах контролю хвороб, насамперед проти фузаріозів, альтернаріозів, борошнистої роси, гельмінтоспоріозів, плямистостей тощо. Показано, що додавання до робочих розчинів фунгіцидів добрив з вмістом редокс-мікроелементів важливо для подовження періоду фотосинтетичної активності, підвищення вмісту хлорофілу у рослинах і формування посіву, більш резистентного до нестачі води. Останнє важливо для формування продуктивності у другій половині вегетації культури. Застосовувати фунгіциди з добривами варто у вегетативний період розвитку для збереження фотосинтетичної активності усіх ярусів культурної рослини, що істотно підвищує ефективність використання елементів живлення та подовжує період транспорту асимілятів до генеративного органу. Запропоновано розглядати композиції фунгіцидів з добривами на прикладі адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га + брексил мікс, 2,0 кг/га, як фактор підвищення ефективності використання азоту. Зазначимо, що контролювати шкодочинний фактор, зокрема *Fusarium graminearum* тощо, необхідно за впровадження інтегрованих систем захисту. При цьому роль редокс-мікроелементів (залізо, цинк, марганець, мідь) є важливою як для забезпечення високих рівнів контролю збудника за дії фунгіцидів, так і для формування резистентного до дії стресових чинників посіву культури. Встановлено, що композиції SDHI + триазол + стробілурин (міравіс нео) + магній + редокс-мікроелементи (брексил мікс) підвищують резистентність до стресів, викликають скорочення підколосового міжвузля, перерозподіл асимілятів до колоса (зростання довжини колоса), істотне зростання вмісту хлорофілу у нижчих ярусах за вираженого подовження вегетації, що є важливими складовими підвищення продуктивності пшениці озимої. Встановлені особливості взаємодії фунгіцидів та добрив важливі для вирощування культурних рослин за дефіциту ресурсів, добрив, пестицидів тощо.

Цитування: Михальська Л.М., Зозуля О.Л., Швартау В.В. Особливості взаємодії інгібіторів сукцинатдегідрогенази з мікроелементами для підвищення продуктивності пшениці озимої. *Фізіологія рослин і генетика*. 2022. 54, № 4. С. 351—364. <https://doi.org/10.15407/frg2022.04.351>

Ключові слова: інгібітори сукцинатдегідрогенази, контроль хвороб, живлення, резистентність, зернові колосові, пшениця озима.

Основними складовими формування продуктивності культурних рослин є впровадження сучасних сортів та гібридів й відповідні до потреб культури технології вирощування [1, 2]. Використання пестицидів у світі та в Україні збільшується, проте втрати врожаю за останні 40 років істотно не зменшилися. Велика роль у втратах врожаю серед біотичних обмежень продуктивності [3] належить хворобам, а також шкідникам і бур'янам. Тільки на посівах пшениці ідентифіковано 31 шкодочинний об'єкт, це насамперед фузаріози, септоріози, іржа, борошниста роса, плямистості тощо. Результати авторів роботи документально підтверджують втрати, що їх спричинили 137 патогенів і шкідників пшениці, рису, кукурудзи, картоплі та сої в усьому світі. На глобальному рівні діапазон збитків для пшениці становить 21,5 % (10,1–28,1 %), рису — 30 % (24,6–40,9 %), кукурудзи — 22,5 % (19,5–41,1 %), картоплі — 17,2 % (8,1–21,0 %), сої — 21,4 % (11,0–32,4 %). Хвороби рослин призводять також до зниження якості врожаю й накопичення мікотоксинів [4].

Традиційно вважають, що хворобу рослин викликає один вид збудника або навіть конкретний штам. Тим часом хвороби існують переважно у складі комплексу збудників. Більшість лабораторних досліджень зосереджується на окремих штаммах мікроорганізмів, вирощених у чистій культурі. Тому насправді ми сьогодні мало знаємо про можливі міжвидові взаємодії або взаємодії між різними таксонами патогенних мікроорганізмів у природі. У рослин багато захворювань — це результат багатовидових, часто синергічних взаємодій. Внаслідок цього підвищується рівень шкодочинності захворювань, і це слід брати до уваги при розробці ефективних заходів контролю. З іншого боку, є лише обмежені відомості щодо синергічних патогенних взаємодій при хворобах рослин, механізми яких на сьогодні невідомі. Наприклад, важкі ураження пшениці кореневими гнилями викликають *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae* та *F. sporotrichioides*, а фузаріозом колоса — комплекс видів *Fusarium graminearum*. Кореневі гнилі кукурудзи викликано *F. meridionale* і *F. boothii*, а корені й качани уражуються гнилями *Trichoderma* spp., *Penicillium* spp., *Pyrenochaeta indica*, *F. moniliforme*, *F. graminearum*, *F. oxysporum* [4]. Таких прикладів взаємодії збудників хвороб рослин, які призводять до комплексних захворювань, може виявитися набагато більше, а розуміння основних механізмів їхньої взаємодії має важливе значення для вивчення епідеміології рослин та боротьби з хворобами. Тим часом, переважна більшість зареєстрованих у світі фунгіцидів позиціонується на ринку для контролю або вибраних хвороб рослин, або для невеликого їх переліку.

Сучасні стратегії контролю хвороб рослин ґрунтуються в основному на застосуванні фунгіцидів. Досягненню високої продуктивності зернових культур за впровадження резистентних сортів/гібридів та забезпечення належної сівозміни сприяє й формування умов прояву максимальної ефективності фунгіцидів.

У рослинництві України з економічних причин застосування фунгіцидів є обмеженим. Використання окремих діючих речовин і більшості фунгіцидів слід розглядати не як елемент контролю широкого спектра збудників хвороб, а радше як чинник зміни балансу мікрофлори в агрофітоценозі. Тому одночасно з ефективним контролем збудників найшкодочинніших хвороб варто також належно контролювати збудників інших небезпечних для регіону хвороб. Цього можна досягти, впроваджуючи композиційні фунгіциди й системи контролю.

Значна кількість сучасних фунгіцидів у виробництві має обмежену ефективність [5], тому вимоги до контролю хвороб для забезпечення продовольчої безпеки у світі й в Україні реалізувати складно. Застосування препаратів з одним механізмом дії формує резистентні штами. Складнощі з моніторингом розвитку хвороб зумовлюють пізнє застосування фунгіцидів або невідповідність обраних діючих речовин потребам захисту культурної рослини. Також, розвиток шкодочинних хвороб в агрофітоценозі активує й ураження факультативними патогенами, зокрема сапрофітами. Раніше нами було показано, що на посівах культурних рослин в Україні домінують види *Alternaria* [6, 7].

Проблему інфікування посівів збудниками шкодочинних хвороб вирішити непросто. Кожні 2—4 роки 5—15 % посівів озимих колосових культур «випадають» унаслідок ураження кореневими гнилями, передусім фузаріозними. Майже щороку істотна частка зерна українського виробництва втрачає в класності через ураження посівів фузаріозами, альтернаріозами та інфікування збіжжя мікотоксинами. Гостро стоїть проблема ураження сажковими хворобами, потенційно небезпечні офіобольоз та іржа тощо.

Схожа ситуація спостерігалася майже 120 років тому в східному й центральному районах «кукурудзяного поясу» США. Дослідники проаналізували зниження рентабельності вирощування ячменю та зростання рівня ураження фузаріозом колосу на початку 1900-х років при відповідному збільшенні площ посівів кукурудзи. При цьому ураження фузаріозом ячменю було таким потужним, що виробництво культури було майже припинено [4].

Отже, застосування в агрофітоценозах ефективних фунгіцидів надзвичайно важливе для їх продуктивності, відновлення рентабельності культур та отримання неуряженого мікотоксинами збіжжя зернових.

Багаторічні дані про ефективність no-till технологій здебільшого свідчать про небезпеку підвищення ураження зерна мікотоксинами. Економічні умови ведення рослинництва формують невпинну тенденцію до скорочення елементів технологій вирощування з обробітку ґрунту, а це вимагає вдосконалених рішень у контролі хвороб шляхом застосування ефективних фунгіцидів.

Відомо, що зниження рівнів інфікування рослин фузаріозом колоса після застосування фунгіцидів не обов'язково викликає відповідне зниження накопичення мікотоксинів у зерні. У класичних працях [10, 11] встановлено, що застосування фунгіцидів, неселективних проти збудників хвороб — мікотоксинпродуцентів, призводить до

зростання накопичення мікотоксинів у збіжжі. Низка стробілуринів і триазолів виявилися малоефективними проти *Fusarium* spp., *Alternaria alternata*, *Arthrinium* spp., *Aspergillus niger*, *Epicoccum* spp., *Microdochium* spp., *Rhizopus oryzae* та *Trichoderma* spp. [4].

Чимала кількість фунгіцидів у сублетальних концентраціях стимулює накопичення мікотоксинів *in vitro*. Це свідчить про недопустимість зниження регламентованих доз фунгіцидів та використання неселективних до збудників цієї хвороби або малоефективних препаратів.

З огляду на помірні рівні контролю хвороб переважною більшістю сучасних фунгіцидів та на високі вимоги до контролю хвороб для забезпечення продовольчої безпеки у світі й в Україні важко переоцінити значення впровадження в сучасне світове виробництво рослинницької продукції композицій останнього покоління SDHI з азолами для істотного підвищення ефективності контролю хвороб та зниження вмісту мікотоксинів у врожах.

Фунгіциди SDHI було відкрито понад сорок років тому. Через обмежений спектр контрольованих захворювань карбоксаміди першого покоління застосовували у виробничих умовах лише на кількох культурах/патосистемах (в основному для контролю базидіоміцетів). Перший фунгіцид класу SDHI створений у 1966 році (карбоксин); сьогодні SDHI займають чільне місце у технологіях захисту культурних рослин [4, 12, 13]. Провідні пестицидні компанії активно розробляють похідні SDHI, наприклад Сингента з 2012 року вивела на ринок 3 похідних цього класу. Сьогодні більше 15 фунгіцидів-похідних SDHI застосовуються на численних культурних рослинах з високою ефективністю контролю патогенів Ascomycetes, Deuteromycetes, Basidiomycetes. Проте за скорочених сівозмін залишаються патогени, контроль яких до останнього часу винятково за допомогою фунгіцидів залишається проблемним.

Згодом, у 2003 році, було створено SDHI з розширеним спектром дії та підвищеною ефективністю, нові препарати випускають до сьогодні. Ці SDHI сучасного покоління швидко завойовують ринок багатьох культур.

Цільовий фермент інгібіторів SDH — сукцинатдегідрогеназа (SDH, комплекс II в ланцюзі мітохондріального дихання), яка є функціональною частиною циклу трикарбонових кислот і пов'язана з мітохондріальним електронтранспортним ланцюгом [13]. SDH складається з чотирьох субодиниць (A, B, C і D), а сайт зв'язування SDHI (сайт зв'язування убіхінону) формується субодиницями B, C і D. Мутації цільового сайту, які призводять до зниження чутливості, можуть розвиватися в усіх трьох субодиницях.

Молекулу адепідину створено з використанням компонентів, важливих для її високої активності в цільових об'єктах / системах [14]. Потрібно також відзначити фрагмент «N-метокси», який формує потужну активність із широким спектром контролю видів *Fusarium* та ін. Ліпофільно-етильовий лінкер і феніл забезпечують швидке надходження молекули в кутикулярний віск із наступним перерозподілом у клітинні ліофільні структури (мембрани). Це надход-

ження через воски забезпечує тривалий ефект фунгіцидної активності. Для подовження періоду контролю хвороб помірне інгібування в монооксигеназних системах може забезпечувати фрагмент «Cl₃-феніл», що, відповідно, може зумовлювати характерну повільну метаболізацію молекули.

Інгібування сукцинатдегідрогенази впливає на всі стадії життя патогену. Спектр дії адепідину охоплює велику кількість збудників і поєднує високу активність щодо багатьох шкодочинних патогенів, серед них *Z. tritici*, *Blumeria graminis*, *Pyrenophora (Drechslera) tritici-repentis*, *Uncinula (Erysiphe) necator* та *A. solani*. Адепідин зберігає високу активність проти важкоконтрольованих патогенів, таких як *B. cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum* та, що особливо важливо, проти високошкодочинних в Україні *Fusarium* spp. Адепідин демонструє високу ефективність щодо контролю *F. graminearum* і *F. culmorum* у концентраціях до 20 мг/л. Раніше нами було показано можливість підвищення рівнів контролю збудників шкодочинних хвороб застосуванням композицій фунгіцидів з добривами, насамперед з редокс-мікроелементами (залізо, цинк, марганець, мідь) [4, 15].

Зважаючи на викладене, метою роботи було визначити ефективність похідного SDHI на прикладі адепідину у композиції з триазолом й стробілурином та редокс-мікроелементами на посівах високопродуктивного сорту пшениці озимої за обмеженого застосування азотних добрив.

Методика

Польові дослідження проводили у дослідному сільськогосподарському виробництві Інституту фізіології рослин і генетики НАН України (смт Глеваха, Київська обл.) на пшениці озимій (*Triticum aestivum* L.) сорту Новосмуглянка (високоінтенсивного типу) у вегетаційних сезонах 2019—2021 років.

Рослини вирощували на дерновому слабо- та середньопідзолистому неоглеєному й глеюватому супіщаному ґрунті. Ґрунти типові для зони Полісся та характеризуються низьким рівнем родючості [15]. Облікова площа кожної ділянки — 10 м², повторність — 6-разова.

Посіви пшениці озимої обробляли фунгіцидом(ами) одноразово навесні у фазу ВВСН 37—39. В якості композиції редокс-мікроелементів використовували добриво брексил мікс (Valagro, Італія) (Mg 6 %, В 1,2 %, Fe 0,6 %, Mn 0,7 %, Zn 5 %, Cu 0,8 %, Мо 1,0 %) — 2,0 кг/га.

Досліди з визначення ефективності фунгіцидів у регіонах України проводили на дослідних станціях ТОВ «Сингента» у Київській та Хмельницькій областях, а також на виробничих посівах ТОВ «Хмельницьке» агропромхолдингу «Астарт-Київ» і ТОВ «ПоділляЛатІнвест» Вінницької області у 2019 та 2019—2021 роках, відповідно.

Аналіз ураження хворобами та визначення вмісту хлорофілу у прапорцевому листку здійснювали у фазу ВВСН 61 [4, 15].

Вимірювання вмісту хлорофілу в листках пшениці озимої проводили за допомогою польового хлорофіломіру SPAD-502 (Konica Minolta, Японія) [4, 15]. Реальний квантовий вихід електронного

транспорту (Y(II)), який оцінює ефективний квантовий вихід фотохімічного перетворення енергії у ФС II, визначали за допомогою польового флуориметра Y(II) meter & Plant Stress Kit (Opti-Sciences Inc., США) та розраховували за формулою $(F'_m - F_s)/F'_m$ [16].

Морфологічні й фізіологічні показники рослин визначали у фазу ВВСН 61. Якість зерна визначали на ІЧ-аналізаторі Perten Instruments (Швеція) у лабораторії ТОВ «Сингента Україна»; ефективність використання азоту (NUE), % = (N винесений з урожаєм, кг/га)/(N внесений з добривами, кг/га) × 100, %.

Результати оброблено статистично з використанням програми Microsoft Excel 2019 з StatPlus від AnalystSoft Inc. Version v. 7 (<https://www.analystsoft.com/en/>).

Результати та обговорення

Показано (табл. 1, 2), що застосування композицій похідних SDHI з триазолами та стробілуринами дозволяє з високою ефективністю контролювати ураженість рослин зернових колосових культур хворобами. Відзначимо високі рівні контролю фузаріозу колоса та плямистостей, що важливо не тільки для отримання високих та якісних врожаїв пшениці, але й має значення для зниження ураження хворобами для наступних культур у сівозміні: кукурудзи, соняшнику, сої тощо.

Складовою дії фунгіцидів є, окрім контролю захворюваності, й збереження фотосинтетично активних органів (листки, стебла), та,

ТАБЛИЦЯ 1. Ефективність композицій сучасних SDHI фунгіцидів з триазолами та стробілуринами щодо контролю збудників шкочинних хвороб на пшениці озимій, середні рівні контролю у дослідках 2019–2021 років, %

Цільовий об'єкт	Адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га	Протіоконазол, 150 г/л, біксафен, 75 г/л; 1,0 л/га	Піраклостробін, 150 г/л + біксафен, 75 г/л; 0,6 л/га
Фузаріоз колоса	95±4 ^a	80±7 ^b	85±5 ^b
Септоріоз	95±5 ^a	80±5 ^b	85±7 ^b
Піренофороз	91±7 ^a	70±7 ^b	75±5 ^b

Примітка: тут і далі середні значення показника, позначені однаковими літерами, свідчать про недостовірну різницю за $P < 0,05$.

ТАБЛИЦЯ 2. Ефективність композицій сучасних SDHI фунгіцидів з триазолами та стробілуринами щодо контролю збудників шкочинних хвороб на ячмені озимому, середні рівні контролю у дослідках 2019–2021 років, %

Цільовий об'єкт	Адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га	Протіоконазол, 150 г/л + біксафен, 75 г/л; 1,0 л/га	Піраклостробін, 150 г/л + біксафен, 75 г/л; 0,6 л/га	Піраклостробін, 66,6 г/л + епоксиконазол, 41,6 г/л + флуксапіроксад, 41,6 г/л; 1,0 л/га
Септоріоз	98±2 ^a	85±5 ^b	85±5 ^b	88±5 ^b
Гельмінтоспоріоз	95±5 ^a	90±5 ^a	70±7 ^b	70±8 ^b

відповідно, фотосинтетичного потенціалу культурних рослин. Роль фотосинтетичного потенціалу у формуванні продуктивності зернових колосових культур активно дискутується. Встановлено, що активність антиоксидантних ферментів хлоропластів прапорцевого листка істотно зростає за позакореневого підживлення азотом, що пов'язано із підвищенням рівнів фотосинтетичної активності [17]. Передчасна втрата фотосинтетичного потенціалу посіву зернових культур за ураження листків хворобами — одна з головних проблем, які обмежують генетичний потенціал продуктивності сортів/гібридів у виробництві. У наших досліджах 2019—2021 років застосування міравіс нео (адепідин) у ВВСН 39 пшениці озимої сприяло збереженню прапорцевого листка та листків нижчих ярусів. При цьому позакореневі обробки добривами, зокрема магнієм з азотом, можна було проводити не тільки у період вегетативного розвитку, але й у пізні, ближче до жнив, фази розвитку з відповідним додатковим впливом на зростання продуктивності. У 2021 році в Київській області було зафіксовано велику кількість опадів та суттєві ураження хворобами (на контролі перевищували 50 %). За внесення у ВВСН 39 фунгіциду міравіс нео у дозі 0,75 л/га вдалося знизити ураження хворобами рослин сортів Софія київська, Городниця та Київська 19, продуктивність при цьому залежно від сорту досягала 10,5—13,6 т/га [18].

Рівень азотного живлення є визначальним фактором формування продуктивності зернових колосових культур. В Україні внесення високих доз, більше 120 кг/га N, обмежено економічними чинниками. Також, зазначимо, що внесення високих доз мінеральних добрив — солей сильних кислот призводить до мінералізації органічної речовини ґрунтів й втрати родючості. Завищені дози мінерального азоту зумовлюють не тільки втрати добрив, але й ушкоджують численні організми в екосистемах, забруднюють водоносні горизонти та ведуть до різкого зростання викидів парникових газів (N_2O тощо). Тому, сучасні технології вирощування культурних рослин формуються не за принципом нарощування доз внесення мінеральних добрив, а шляхом підвищення ефективності використання елементів живлення та узгодження систем живлення та захисту посівів. При цьому забезпечення високих рівнів ефективності використання азоту є ключом до нарощування продуктивності культурних рослин.

Варто зазначити, що реутилізація пластичних речовин (вуглець/азот) у колос посилюється у разі внесення фунгіциду, що подовжує період фотосинтетичної активності та дає змогу досягти вищих рівнів продуктивності посіву. У перших роботах з досліджень впливу рівнів азотного живлення щодо захворюваності рослин у посівах зернових колосових культур показано зростання ураження кореневими гнилями та факультативними патогенами за зростання рівнів азотного живлення [4]. За позакореневого застосування азотних добрив з фунгіцидами показано можливість істотно знизити наслідки ураження хворобами [19—21]. Варто також відзначити численні дані щодо подовження вегетації культурних рослин за внесення фунгіцидів, особливо за дії композицій SDHI + триазоли/стробілурини [20, 21]. Раніше показано, що внесення редокс-мікроелементів позакоренево,

протягом вегетації культури, може приводити до оптимізації прояву захисної дії фунгіцидів та зростання якості зерна: зниження накопичення мікотоксинів у зерні пшениці озимої [22].

У дослідях на пшениці озимій сорту Новосмулянка у 2021—2022 роках застосування фунгіцидів адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га зумовлювало статистично достовірне підвищення врожаю. Істотних змін у якості зерна при цьому не встановлено (табл. 3). За внесення композиції добрива з фунгіцидами: брексил мікс, 2,0 кг/га + адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га спостерігали тенденцію щодо нарощування продуктивності. За внесення фунгіцидів стан stay-green подовжувався на 3—4 доби, а за додавання добрива до розчину для обприскування — до 7—9 діб. Подовження періоду фотосинтетичної активності може мати значення для підвищення ефективності використання азоту добрив. У дослідях найвищий показник ефективності використання азоту (NUE) встановлено за дії композиції фунгіциди + добриво. Таким чином, внесення композицій адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га окремо та разом з брексил мікс, 2,0 кг/га є важливим для підвищення ефективності використання азоту з добрив чи з ґрунту. При цьому композиції фунгіцидів з редокс-мікроелементами сприяють подовженню періоду фотосинтетичної активності та досягненню максимальних у дослідях показників ефективності використання азоту рослинами у посіві.

За впливу композиції брексил мікс + адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л спостерігали тенденцію до зниження висоти рослин за зростання довжини колоса (табл. 4). Довжина підколосового міжвузля знижувалася, що може свідчити про підвищення резистентності рослин до посухи та вилягання. Зниження стресу рослин за обробки добривом з фунгіцидами може бути фактором подовження фотосинтетичної активності. Збільшення вмісту хлорофілу у листках нижніх ярусів за обробки рослин добривом з фунгіцидами, порівняно з контролем, свідчить про подовження функціонування фотосинтетичного апарату, а реального квантового виходу електронного транспорту ФС II (Y(II)) — про вищу функціональну активність прапорцевих листків (табл. 4). Також, важ-

ТАБЛИЦЯ 3. Продуктивність пшениці озимої сорту Новосмулянка за внесення композицій фунгіцидів з адепідинам та добривом, середні дані 2021—2022 років

Варіант	Врожай, т/га	Білок/клейковина, %	Подовження вегетації, дні	Ефективність використання азоту, %
Контроль	8,1 ^a	14,1 ^a /32,2 ^a	—	42
Міравіс нео, 1,0 л/га	8,5 ^b	14,3 ^{ab} /32,4 ^a	3—4	47
Міравіс нео, 1,0 л/га + брексил мікс, 2 кг/га	8,7 ^b	14,4 ^{ab} /33,4 ^b	7—9	52
НІР _{0,05}	0,2	0,2/0,4	—	-

Примітка: тут і далі, рівень азотного живлення у дослідях становив N₇₀ за сезон.

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ІНГІБІТОРІВ СУКЦИНАТДЕГІДРОГЕНАЗИ

ТАБЛИЦЯ 4. Вплив композиції фунгіцидів з адепідином та брексил мікс на розвиток пшениці озимої

Показник	Контроль	Адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га	Адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л, 1,0 л/га + брексил мікс, 2 кг/га
Висота рослин, см	104±4 ^а	101±4 ^а	98±3 ^а
Довжина колоса, см	6,8±1,0 ^а	8,5±0,5 ^б	9,5±0,4 ^б
Довжина підколосового міжвузля, см	14,1±2,0 ^а	10,2±1,2 ^б	8,8±2,4 ^б
Вміст хлорофілу, відносних одиниць SPAD (Konica-Minolta SPAD-502)			
Прапорцевий листок	58,0±2,1 ^а	58,1±1,9 ^а	59,0±2,1 ^а
2-й ярус	27,4±3,1 ^г	38,0±2,0 ^б	44,9±1,9 ^б
3-й ярус	сухий	12,3±4,1 ^д	27,8±2,1 ^г
4-й ярус	сухий	сухий	27,3±2,8 ^г
5-й ярус	сухий	сухий	19,9±3,9 ^д
Реальний квантовий вихід електронного транспорту ФС II, Y(II) (Opti-Sciences)*			
Прапорцевий листок	0,688±0,005 ^а	0,698±0,004 ^б	0,712±0,007 ^а

Примітка: за 7 діб після обробки; визначення інших показників у ВВСН 61.

ливим є зростання вмісту хлорофілу у нижчих, під прапорцевим листком, ярусах.

Встановлена залежність впливу композиції добрива з фунгіцидами формує «ефект парасольки» щодо захисту нижчих ярусів листків за високих температур і нестачі вологи, що має значення для подовження вегетації й досягнення вищих рівнів використання азоту та інших елементів живлення, особливо у періоди дефіциту вологи.

Високоєфективні фунгіциди класу SDHI є порівняно новими на ринку, а їх часте застосування може призвести до формування резистентності у збудників хвороб. Фундаментальними принципами, яких слід дотримуватися при застосуванні стратегій управління резистентністю до фунгіцидів, є наступні:

1) усі фунгіциди з одним сайтом дії класу SDHI можуть формувати крос-резистентність до збудників хвороб;

2) при використанні сумішей для боротьби з резистентністю до SDHI фунгіцидів, які застосовуються у вигляді бакової суміші або спільної суміші, партнер по суміші має забезпечувати задовільну боротьбу з хворобами при окремому застосуванні проти цільового захворювання і повинен мати інший механізм дії;

3) фунгіциди SDHI слід застосовувати профілактично або на ранніх стадіях розвитку хвороби. Не можна використовувати знижені норми та обробляти посіви фунгіцидом з одним механізмом дії багаторазів.

Тому застосування композицій SDHI з іншими фунгіцидами за додавання до розчинів для обробки редокс-мікроелементів може бути важливим для посилення контролю ряду шкочинних хвороб, наприклад факультативних сапрофітів тощо. Композиції, наприклад брексилу мікс з фунгіцидами: адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л можуть бути складовими антирезистентної програми.

Отже, застосування фунгіцидів класу SDHI з триазолами та стробілуринами сьогодні є основою контролювання шкочинних збудників хвороб у посівах пшениці озимої та інших культурних рослин. Адепідин є похідним нової групи SDHI фунгіцидів N-метокси-(фенілетил)-піразол-карбоксамідів. У складі молекули фунгіциду є компоненти, які модерують її поліфункціональність: ліпофільний фрагмент, що потенціює подовжену активність, та піразолова амідна структура, яка визначає високий рівень активності щодо широкого спектра збудників хвороб. Фунгіцид ефективно інгібує проростання спор і ріст зародкових трубок та має високу профілактичну активність. Лікувальну активність визначено на збудниках багатьох шкочинних хвороб. Адепідин доцільно застосовувати профілактично для підвищення ефективності контролю хвороб та боротьби з резистентністю у збудників. Його високу ефективність контролю *in vitro* та в польових умовах встановлено для таких небезпечних в Україні патогенів, зокрема й до мікотоксинпродуцентів: *Pyrenophora teres*, *Drechslera graminea*, *Diplocarpon earlianum*, *Ramularia collo-cygni*, *Rhynchosporium secalis*, *Septoria* spp., *Drechslera tritici-repentis*, *Fusarium* spp. та інших.

Адепідин ефективний в інтегрованих системах контролю хвороб, насамперед проти фузаріозів, альтернаріозів, борошнистої роси, гельмінтоспоріозів, плямистостей тощо. Додавання до робочих розчинів фунгіцидів добрив з вмістом редокс-мікроелементів важливо для подовження періоду фотосинтетичної активності й підвищення вмісту хлорофілу у рослинах та формування посіву, більш резистентного до нестачі вологи. Останнє важливо для формування продуктивності у другій половині вегетації культури. Застосовувати фунгіциди + добрива варто у вегетативний період розвитку для збереження фотосинтетичної активності усіх ярусів культурної рослини, що істотно підвищує ефективність використання елементів живлення та подовжує транспорт асимілятів до генеративного органу.

Запропоновано розглядати композиції SDHI фунгіцидів на прикладі адепідин, 75 г/л + пропіконазол, 120 г/л + азоксистробін, 100 г/л; 1,0 л/га + брексил мікс, 2,0 кг/га, як фактор підвищення ефективності використання азоту. При цьому встановлене підвищення ефективності використання азоту за дії композиції добриво + фунгіциди важливе не тільки для нарощування продуктивності та якості культурних рослин і забезпечення рентабельності рослинництва, але й скорочення викидів парникових газів (N_2O). Зазначимо, що контролювати шкочинний фактор, наприклад *Fusarium graminearum* тощо доцільно за впровадження інтегрованих систем захисту. При цьому роль редокс-мікроелементів (залізо, цинк, марганець, мідь) є важливою як для забезпечення високих рівнів контролю збудника за дії

фунгіцидів, так і для формування резистентного до дії стресових чинників посіву культури.

Таким чином, композиції SDHI + триазол + стробілури (міравіс нео) + магній + редокс-мікроелементи (брексил мікс) підвищують резистентність до стресів — вихід електронного транспорту ФС II й функціональну активність прапорцевих листків, викликають скорочення підколосового міжвузля, перерозподіл асимілятів до колоса (зростання довжини колоса), істотне підвищення вмісту хлорофілу у нижчих ярусах за вираженого подовження вегетації, що є важливими складовими нарощування продуктивності пшениці озимої. Встановлені особливості взаємодії фунгіцидів та добрив важливі для вирощування культурних рослин за дефіциту ресурсів, добрив, пестицидів тощо.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Моргун В.В., Швартау В.В., Коновалов Д.В., Михальська Л.М., Скрипльов В.О. Клуб 100 центнерів. Сучасні сорти та системи живлення і захисту пшениці озимої. Видання XI. Наук. видання. К.: Вістка, 2022. 106 с. ISBN 978-617-7574-70-4.
2. Моргун В.В., Швартау В.В., Киризий Д.А. Физиологические основы формирования высокой продуктивности зерновых злаков. *Физиология и биохимия культ. растений*. 2010. **42**, № 5. С. 371—392.
3. Savary S., Willocquet L., Pethybridge S.J., Esker P., McRoberts N., Nelson A. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol Evol*. 2019. **3**. P. 430—439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
4. Швартау В.В., Зозуля О.Л., Михальська Л.М. Фузаріози: розповсюдження та основи контролювання. Київ: Логос, 2019. 219 с.
5. Oerke E. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*. 2006. **144**, Is. 1. P. 31—43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
6. Швартау В.В., Зозуля О.Л., Михальська Л.М., Санін О.Ю. Вплив композицій фунгіцидів на ефективність контролювання видів *Fusarium* та продуктивність пшениці озимої. *Карантин і захист рослин*. 2019. № 7—8. С. 23—28.
7. Mykhalska L.M., Zozulia O.L., Hrytsev O.A., Sanin O.Yu., Schwartz V.V. Distribution of species of *Fusarium* and *Alternaria* genera on cereals in Ukraine. *Biosystems Diversity*. 2019. **27**, N 2. P. 186—191. <https://doi.org/10.15421/011925>
8. Li S., Li X., Zhang H., Wang Z., Xu H. The research progress in and perspective of potential fungicides: Succinate dehydrogenase inhibitors. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*. 2021. **50**. 116476. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2021.116476>
9. Luo B., Ning Y. Comprehensive Overview of Carboxamide Derivatives as Succinate Dehydrogenase Inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2022. **70**(4). P. 957—975. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06654>
10. Müllenborn C., Steiner U., Ludwig M., Oerke E.C. Effect of fungicides on the complex of *Fusarium* species and saprophytic fungi colonizing wheat kernels. *Eur J Plant Pathol*. 2008. **120**. P. 157—166. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9204-y>
11. Da Luz S.R., Pazdiora P.S., Dallagnol L.J., Dors G.C., Chaves F.C. Mycotoxin and fungicide residues in wheat grains from fungicide-treated plants measured by a validated LC-MS method. *Food Chemistry*. 2017. **220**. P. 510—516. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.180>
12. Von Schmeling B., Kulka M. Systemic activity of 1,4-oxathiin derivatives. *Science*. 1966. **152**. P. 659—660. <https://doi.org/10.1126/science.152.3722.659>
13. Keon J.P.R., White G.A., Hargreaves J.A. Isolation, characterization and sequence of a gene conferring resistance to the systemic fungicide carboxin from the maize smut pathogen, *Ustilago maydis*. *Curr Genet*. 1991. **19**. P. 475—481. <https://doi.org/10.1007/BF00312739>

14. Sierotzki H., Haas U.-H., Oostendorp M., Stierli D., Nuninger C. Adepidyn Fungicide: A New Broad Spectrum Foliar Fungicide for Multiple Crops. In: Deising H.B., Fraaije B., Mehl A., Oerke E.C., Sierotzki H., Stammler G. (Eds), «Modern Fungicides and Antifungal Compounds». 2017. Vol. VIII. P. 77–83. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
15. Швартау В.В., Михальська Л.М., Каменчук О.П. Влияние гидроксида меди и про-квиназида на урожайность и накопление микроэлементов в зерне озимой пшеницы. *Физиология и биохимия культ. растений*. 2015. **47**, № 4. С. 279–286.
16. Genty, B., Harbinson, J. Regulation of Light Utilization for Photosynthetic Electron Transport. In: Baker, N.R. (eds) Photosynthesis and the Environment. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol 5. Springer, Dordrecht, 1996. https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9_3
17. Соколовська-Сергієнко О.Г., Кірізі́й Д.А., Стасик О.О., Шегеда І.М. Фотосинтез і активність антиоксидантних ферментів хлоропластів прапорцевого листка рослин озимої пшениці за позакореневого підживлення карбамідом. *Фізіологія рослин і генетика*. 2016. **48**, № 6, С. 519–529. <https://doi.org/10.15407/frg2016.06.519>
18. Швартау В., Вакуленко В., Михальська Л. Рекордна пшениця. Зерно. 2021. № 8. С. 76–78.
19. Ruske R.E., Gooding M.J., Jones, S.A. The effects of adding picoxystrobin, azoxystrobin and nitrogen to a triazole programme on disease control, flag leaf senescence, yield and grain quality of winter wheat. *Crop Protection*. 2003. **22**. С. 975–987. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(03\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(03)00113-3)
20. Schierenbeck M., Fleitas M.C., Simyn M.R., Cortese F., Golik S.I. Nitrogen accumulation in grains, remobilization and post-anthesis uptake under tan spot and leaf rust infections on wheat. *Field Crops Research*. 2019. **235**. P. 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.016>
21. Schierenbeck M., Fleitas M.C., Gerard G.S., Dietz J.I., Simyn M.R. Combinations of fungicide molecules and nitrogen fertilization revert nitrogen yield reductions generated by *Pyrenophora tritici-repentis* infections in bread wheat. *Crop Protection*. 2019. **121**. P. 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.04.004>
22. Санін О.Ю., Михальська Л.М., Долгальова Ю.А., Зозуля О.Л., Швартау В.В. Вплив фунгіцидів і добрив на вміст мікотоксинів у зерні високопродуктивних сортів озимої пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2019. **51**, № 1. С. 67–75. <https://doi.org/10.15407/frg2019.01.067>

Отримано 30.08.2022

REFERENCES

1. Morgun, V.V., Schwartau, V.V., Konovalov, D.V., Mikhalska, L.M. & Skripiev, V.O. Club 100 centners. Modern varieties and systems of nutrition and protection of winter wheat. Edition XI. Scientific edition. K.: Vistka., 2022. 106 p. ISBN 978-617-7574-70-4 [in Ukrainian].
2. Morgun, V.V., Schwartau, V.V. & Kyriziy, D.A. (2010). Physiological bases of formation of high productivity of grain cereals. *Physiology and biochemistry cult. plant*, 42, No. 5, pp. 371-392 [in Russian].
3. Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J. Esker, P., McRoberts N. & Nelson, A.(2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nat Ecol. Evol.*, 3, pp. 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
4. Schwartau, V.V., Zozulya, O.L. & Mykhalska, L.M. (2019). Fusarium wilt: distribution and basics of control. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
5. Oerke, E. (2006). Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science*, 144(1), pp. 31–43. <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
6. Schwartau, V.V., Zozulya, O.L., Mikhalska, L.M. & Sanin, O.Yu. (2019). Influence of fungicide compositions on efficiency of Fusarium species control and winter wheat productivity. *Quarantine and plant protection*, № 7-8, pp. 23-28 [in Ukrainian].

7. Mykhalska, L.M., Zozulia, O.L., Hrytsev, O.A., Sanin, O.Yu. & Schwartau, V.V. (2019). Distribution of species of *Fusarium* and *Alternaria* genera on cereals in Ukraine. *Biosystems Diversity*, 27(2), pp. 186-191. <https://doi.org/10.15421/011925>
8. Li, S., Li, X., Zhang, H., Wang, Z. & Xu H. (2021). The research progress in and perspective of potential fungicides: Succinate dehydrogenase inhibitors. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 50, 116476. <https://doi.org/10.1016/j.bmc.2021.116476>.
9. Luo, B. & Ning, Y. (2022). Comprehensive Overview of Carboxamide Derivatives as Succinate Dehydrogenase Inhibitors. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(4), pp. 957-975. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06654>
10. Mullenborn, C., Steiner, U., Ludwig, M. & Oerke E.C. (2008). Effect of fungicides on the complex of *Fusarium* species and saprophytic fungi colonizing wheat kernels. *Eur J Plant Pathol*, 120, pp. 157-166. <https://doi.org/10.1007/s10658-007-9204-y>
11. Da Luz, S.R., Pazdiora, P.S., Dallagnol, L.J., Dors, G.C. & Chaves, F.C. (2017). Mycotoxin and fungicide residues in wheat grains from fungicide-treated plants measured by a validated LC-MS method. *Food Chemistry*, 220, pp. 510-516. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.180>
12. Von Schmeling, B. & Kulka, M. (1966). Systemic activity of 1,4-oxathiin derivatives. *Science*, 152, pp. 659-660. <https://doi.org/10.1126/science.152.3722.659>
13. Keon, J.P.R., White, G.A. & Hargreaves, J.A. (1991). Isolation, characterization and sequence of a gene conferring resistance to the systemic fungicide carboxin from the maize smut pathogen, *Ustilago maydis*. *Curr Genet*, 19, pp. 475-481. <https://doi.org/10.1007/BF00312739>
14. Sierotzki, H., Haas, U.-H., Oostendorp, M., Stierli, D. & Nuninger, C. Adepidyn Fungicide: A New Broad Spectrum Foliar Fungicide for Multiple Crops. In: Deising, H.B., Fraaije, B., Mehl, A., Oerke, E.C., Sierotzki, H. & Stammler, G. (Eds), «Modern Fungicides and Antifungal Compounds». 2017. Vol. VIII. P. 77-83. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig.
15. Schwartau, V.V., Mikhalskaya, L.M. & Kamenchuk, O.P. (2015). Influence of copper hydroxide and proquinazide on yield and accumulation of microelements in winter wheat grain. *Plant Physiology and Genetics*, 47, No. 4, pp. 279-286 [in Russian].
16. Genty, B. & Harbinson, J. (1996). Regulation of Light Utilization for Photosynthetic Electron Transport. In: Baker, N.R. (eds) *Photosynthesis and the Environment*. *Advances in Photosynthesis and Respiration*, vol 5. Springer: Dordrecht. https://doi.org/10.1007/0-306-48135-9_3
17. Sokolovska-Sergienko, O.G., Kiriziy, D.A., Stasik O.O. & Sheheda, I.M. (2016). Photosynthesis and flad leaf chloroplasts antioxidant anzymes activity in winter wheat plants under urea foliar fertilization. *Fiziol. rast. genet.* 48, No. 6, pp. 519-529, <https://doi.org/10.15407/frg2016.06.519> [in Ukrainian].
18. Schwartau, V., Vakulenko, V. & Mikhalska, L. Record wheat. *Grain*. 2021, No. 8, pp. 76-78 [in Ukrainian].
19. Ruske, R.E., Gooding, M.J. & Jones, S.A. (2003). The effects of adding picoxystrobin, azoxystrobin and nitrogen to a triazole programme on disease control, flag leaf senescence, yield and grain quality of winter wheat. *Crop Protection*, 22, pp. 975-987. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(03\)00113-3](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(03)00113-3)
20. Schierenbeck, M., Fleitas, M.C., Simyn, M.R., Cortese, F. & Golik, S.I. (2019). Nitrogen accumulation in grains, remobilization and post-anthesis uptake under tan spot and leaf rust infections on wheat. *Field Crops Research*, 235, pp. 27-37. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.016>
21. Schierenbeck, M., Fleitas, M.C., Gerard, G.S., Dietz, J.I. & Simyn, M.R. (2019). Combinations of fungicide molecules and nitrogen fertilization revert nitrogen yield reductions generated by *Pyrenophora tritici-repentis* infections in bread wheat. *Crop Protection*, 121, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.04.004>
22. Sanin, O.Yu., Mikhalska, L.M., Dolhalova, Y.A., Zozulya, O.L. & Schwartau, V.V. (2019). Influence of fungicides and fertilizers on the contents of mycotoxins in grain of highly productive winter wheat varieties. *Fiziol. rast. genet.* 51, No. 1, pp. 67-75. <https://doi.org/10.15407/frg2019.01.067> [in Ukrainian].

Received 30.08.2022

FEATURES OF THE INTERACTION OF SUCCINATE DEHYDROGENASE
INHIBITORS WITH MICROELEMENTS TO INCREASE THE WINTER WHEAT
PRODUCTIVITY

L.M. Mykhalska¹, O.L. Zozulya², V.V. Schwartau¹

¹Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

²TOV Syngenta Ukraine
120/4 Kozatska St., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: VictorSchwartau@gmail.com

Effective disease control integrated with nutrition systems is important for increasing the productivity of winter wheat and other crops. The use of fungicides of the SDHI class with triazoles and strobilurins is today the basis of controlling harmful pathogens in crops. Adepidine of the SDHI class is effective in integrated disease control systems, primarily against *Fusarium*, *Alternaria*, powdery mildew, *Helminthosporium*, spotting, etc. It is shown that the addition of fertilizers containing redox trace elements to the spraying solutions of fungicides is important for prolonging the period of photosynthetic activity, increasing the chlorophyll content in plants, and forming crops that are more resistant to moisture deficit. The latter is important for the formation of productivity in the second half of the growing season of the crop. It is worth applying fungicides with fertilizers in the vegetative period of development to preserve the photosynthetic activity of all wheat leaves levels, which significantly increases the efficiency of the use of nutrients and prolongs the period of transport of assimilates to the reproductive organ. It is proposed to consider the composition of fungicides with fertilizers, for example, adepidin, 75 g/l + propiconazole, 120 g/l + azoxystrobin, 100 g/l + Brexyl mix, 2.0 kg/ha, as a factor for increasing the efficiency of nitrogen use. It should be noted that it is advisable to control the harmful factor, in particular *Fusarium graminearum*, etc., with the introduction of integrated protection systems. At the same time, the role of redox trace elements (iron, zinc, manganese, copper) is important both for ensuring high levels of control of the pathogen under the action of fungicides, and for the formation of crops resistant to the effects of stress factors. It was established that the compositions of SDHI + triazole + strobilurin (Miravis Neo) + magnesium + redox-TE (Brexyl Mix) increase resistance to stresses, cause reduction of the peduncle, redistribution of assimilates to the ear (increase in ear length), significant increase in the content of chlorophyll in the lower leaves levels with a pronounced lengthening of the growing season, which is an important component of increasing the productivity of winter wheat. The established features of the interaction of fungicides and fertilizers are important for the cultivation of crops under the absence of resources, fertilizers, pesticides, etc.

Key words: succinate dehydrogenase inhibitors, disease control, nutrition, resistance, grain spike crops, winter wheat.