

<https://doi.org/10.15407/frg2024.01.074>

УДК 631.847.211:633.34:632.95:581.557

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАВЧАСНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ СОЇ СТІЙКИМИ ДО ФУНГІЦИДІВ РИЗОБІЯМИ ТА ОБРОБКИ ПРОТРУЙНИКАМИ

К.П. КУКОЛ, Н.А. ВОРОБЕЙ, П.П. ПУХТАЄВИЧ, Т.А. КОЦЬ

*Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17
e-mail: katerinakukol@gmail.com*

У польових умовах вивчали процеси формування та функціонування симбіотичних систем сої зі стійкими до фунгіцидів бульбочковими бактеріями *Bradyrhizobium japonicum* PC07 та B78 на фоні застосування препаратів стандак топ та максимум XL, здійснюючи обробки протруйниками й інокулянтами за 7 діб до посіву. У результаті проведених досліджень спостерігалось незначне зниження кількості й маси корневих бульбочок упродовж вегетації за комплексної завчасної обробки насіння сої протруйниками та ризобіями порівняно з контрольними рослинами (бактеризація без застосування фунгіцидів). Виявлено зниження у фазу бутонізації—початку цвітіння азотфіксуювальної активності (АФА) симбіотичних систем, сформованих за участю обох штамів бульбочкових бактерій на фоні застосування максимуму XL на 12,6—25,0 %, а за обробки стандак топом — на 13,9—15,1 %. У фазу утворення бобів відзначено, що за обробки насіння максимумом XL із *B. japonicum* PC07 АФА була нижчою на 17,9 % порівняно з контрольними рослинами, тоді як за інокуляції ризобіями штаму B78 за дії цього ж протруйника даний показник був на рівні контрольних рослин. У цю фазу встановлено підвищення активності азотфіксації на 7,3 та 5,4 % за застосування стандак топу з *B. japonicum* PC07 і B78, відповідно. Встановлено стимулювальний вплив комплексної завчасної обробки насіння сої протруйниками та бульбочковими бактеріями на ріст рослин сої упродовж вегетації. Підвищення маси надземної частини рослин сої за інокуляції на фоні застосування максимуму XL становило 10,5—14,3 %, а за обробки стандак топом — 6,9—8,5 %. Маса коренів сої за застосування протруйників з інокулянтами була вищою порівняно з контрольними рослинами на 6,1—10,8 % у фазу бутонізації та на 7,9—15,2 % у фазу утворення бобів. У рослин усіх варіантів досліджу, завчасно оброблених протруйниками та бульбочковими бактеріями (за 7 діб до посіву), підвищилась зернова продуктивність порівняно з контрольними. На фоні застосування максимуму XL і стандак топу прибавка врожаю сої становила відповідно 4,8 і 6,2 % за інокуляції *B. japonicum* PC07 та 9,6 і 12,9 % — за інокуляції *B. japonicum* B78. Незважаючи на те що рослини сої завчасно оброблені протруйниками та інокулянтами дещо поступалися контрольним за активністю процесів нодуляції, бульбочки на їх коренях активно асимілювали атмосферний N₂, ріст рослин був інтенсивнішим, а зернова продуктивність вищою. Таким чином, застосування для інокуляції насіння сої

Цитування: Кукол К.П., Воробей Н.А., Пухтаєвич П.П., Коць Т.А. Ефективність завчасної інокуляції насіння сої стійкими до фунгіцидів ризобіями та обробки протруйниками. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. 56, № 1. С. 74—86. <https://doi.org/10.15407/frg2024.01.074>

фунгіцидостійких ризобій, навіть за умов їх контакту упродовж 7 діб із діючими речовинами хімічних препаратів, дає змогу забезпечити функціонування ефективних симбіотичних систем.

Ключові слова: *Bradyrhizobium japonicum*, соя, фунгіциди, інокуляція, протруювання насіння, стійкі до фунгіцидів штами ризобій, азотфіксація.

На сучасному етапі розвитку сільськогосподарського виробництва однією з головних проблем аграрного сектора економіки України залишається істотне збільшення й стабілізація виробництва зернобобових культур, зокрема сої, яка є основним джерелом продукції, збалансованої за амінокислотним складом і вмістом екологічно чистого білка [1].

Як зернобобова культура соя здатна до симбіозу з бульбочковими бактеріями. Завдяки цьому в біологічний кругообіг вводиться значна кількість атмосферного азоту, частина якого залишається в ґрунті, що робить сою цінним попередником для наступних культур сівозміни [2]. Крім того, широке використання азотфіксації у практиці сільськогосподарського виробництва уможливорює високий вихід рослинного білка без застосування вартісних мінеральних азотних добрив. З огляду на це передпосівна інокуляція насіння бульбочковими бактеріями в сучасному землеробстві стала невід'ємною складовою технологічного процесу виробництва зерна [3].

Важливим резервом отримання високих врожаїв зернобобових культур і підвищення якості насіння є ефективний захист від збудників хвороб. У сучасних інтегрованих системах захисту рослин, які забезпечують контроль шкідливих організмів у межах економічного порогу шкідливості, найпоширеніший хімічний метод. Його було започатковано понад 250 років тому, коли в середині XVIII ст. почали протруювати насіння злакових культур миш'яковими і ртутними препаратами. У 1970-х роках хімічний метод зазнав критики від світової спільноти, після чого почалося його вдосконалення. Сьогодні асортимент пестицидів, препаративні форми та способи їх застосування докорінно змінилися [4].

Для обмеження розвитку патогенної мікробіоти на поверхні насіння проводять передпосівне протруювання сої препаратами фунгіцидної дії, що дає змогу захистити рослини на ранніх етапах органогенезу [5, 6]. Доцільність такої обробки висвітлюють результати фітопатологічної експертизи насіння, яка встановила видовий склад патогенів, що спричинюють інфікування. Серед них домінуючими були представники грибнової флори: *Alternaria*, *Fusarium*, *Peronospora*, *Cladosporium*, *Botrytis*, *Aspergillus*, *Penicillium* та *Mucor*. Встановлено також неоднорідність видового складу патогенної мікробіоти на різних сортах сої, що створює істотну загрозу як для зберігання товарного зерна, так і для формування повноцінних сходів.

Водночас пестициди, які застосовують у сільському господарстві для контролю збудників хвороб, бур'янів і шкідників у посівах різних культур, можуть інгібувати або стимулювати розвиток корисної мікрофлори, а також патогенів, які не мають практичного значення у звичайних умовах [7].

Оскільки хімічні засоби захисту рослин (ЗЗР) є фізіологічно активними речовинами, існують особливі вимоги для реалізації безпечності їх практичного застосування. Основними з них є персистентність діючих речовин, що характеризує стійкість пестицидів у навколишньому середовищі; мінімальна хронічна токсичність для людей і тварин; відсутність мутагенного, канцерогенного та кумулятивного ефектів; вибірковість дії за відношенням до корисних організмів [8].

Алексєєв зі співавт. [9] стверджують, що інокуляцію насіння бульбочковими бактеріями разом з передпосівним протруюванням можливо поєднувати тільки за відсутності токсичної дії пестицидів на штами азотфіксувальних мікроорганізмів. До таких препаратів вони відносять ранкону, прометрин, максим ХЛ та харнес.

У своїй роботі Гетачев та Абебл [10] доводять, що вплив фунгіцидів на життєздатність азотфіксувальних мікроорганізмів і реалізацію їх симбіотичного потенціалу залежить як від генотипу ризобій, так і від діючих речовин пестицидів, якими здійснюють обробку посівного матеріалу.

До того ж постало питання не лише щодо добору штамів і пестицидів для спільного застосування, а й термінів обробки насіння сої, дотримання яких уможливує ефективне функціонування сформованого симбіозу та фітопротекторну дію хімічних ЗЗР. Колективом бразильських дослідників встановлено підвищення показників кількості, маси кореневих бульбочок та зернової продуктивності рослин сої за відсутності інгібувального впливу на активність азотфіксації у рослин, інокульованих за 10 днів до посіву штамами *V. jaronicum* SEMIA 5079 і SEMIA 5080 та оброблених протруйниками дерозал, стандак топ або максим ХЛ [11]. Інші автори, порівнюючи обробки препаратами фунгіцидної дії за 14 днів і у день посіву, за бактеризації ризобіями безпосередньо перед посівом, з'ясували, що саме завчасне застосування протруйників менше впливало на симбіотичний апарат, проте сильніше позначалося на фізіологічному стані самої рослини, зокрема на фотосинтезі та транспірації [12]. Це підтверджує думку про комплексну різноспрямовану дію пестицидів на макро- і мікросимбіонтів. Безумовно, досліджувати вплив хімічних ЗЗР на обидва компоненти симбіозу необхідно, залучаючи різні сорти бобових рослин, відмінні за симбіотичними та фізіолого-біохімічними властивостями штами азотфіксувальних мікроорганізмів, підбираючи строки обробки насіння, щоб забезпечити економію часу, матеріальних ресурсів і збереження ефективності цих складових технологій вирощування.

Із огляду на викладене, метою нашої роботи було дослідити у польових умовах ефективність інокуляції сої стійкими до фунгіцидів штамами ризобій за завчасної обробки насіння протруйниками та бактеріальними препаратами.

Методика

Польові досліді проводили з рослинами сої (*Glycine max* (L.) Merr.) сорту Алмаз на базі агробіостанції Уманського державного педагогіч-

ного університету імені Павла Тичини. Грунт дослідної ділянки — темно-сірий опідзолений, рН 5,4—5,6, вміст гумусу 1,6—2,0 %, фосфору, калію та легкогідролізованого азоту відповідно по 9,2—12,2, 13,0—17,7 і 12,0—12,8 мг/100 г ґрунту.

Сорт сої Алмаз занесений до Реєстру сортів рослин України з 2007 р., ранньостиглий, холодостійкий, вегетаційний період — 100—105 днів. Рослини цього сорту стійкі до хвороб і шкідників [13].

У дослідженні використовували протруйники з різними діючими речовинами: 1) стандак топ («BASF», Німеччина) — інноваційний протруйник для контролю основних хвороб та шкідників сої з діючими речовинами фіпроніл (250 г/л) + тіофанатметил (225 г/л) + піраклостробін (25 г/л); норма витрати протруйника становить 2,0 л/т, робочого розчину — 10 л/т насіння; 2) максим XL («Syngenta», Швейцарія) — протруйник контактної та проникної дії проти широкого спектра найпоширеніших хвороб. Препарат містить флудіоксоніл (25 г/л) + металаксил-М (10 г/л); норма витрати протруйника для обробки насіння сої становить 1,0 л/т, робочого розчину — 10 л/т насіння [14].

Використані для інокуляції насіння сої штами бульбочкових бактерій *V. japonicum* PC07 та *V. japonicum* B78 взято з Колекції азотфіксуювальних мікроорганізмів Інституту фізіології рослин і генетики НАН України. Штами ризобій стійкі у чистій культурі до різних фунгіцидів, які широко використовуються у виробничих умовах [15, 16].

Для приготування інокуляційних суспензій біомасу бактерій змивали з поверхні агаризованого манітно-дріжджового середовища водою. Тривалість бактеризації насіння суспензією бульбочкових бактерій становила 60 хв, титр суспензії — 10^9 кл/мл. Часовий термін між протруюванням насіння сої та бактеризацією становив 1 год.

Сою висівали у третій декаді квітня на глибину 3—5 см з розрахунку 600 тис схожих насінин на 1 га. Агротехніка вирощування культури — загальноприйнята для зони Лісостепу. Облікова площа ділянок 5 м². Повторність 4-разова, розміщення — рендомізоване. Контрольний варіант досліду — соя, інокульована за 7 діб до посіву бульбочковими бактеріями, без застосування протруйників.

Зразки для аналізу відбирали у фази бутонізації—початку цвітіння та утворення бобів. Обчислювали вегетативну масу рослин, масу кореня та кількість і масу сформованих кореневих бульбочок. Азотфіксувальну активність (АФА) визначали ацетиленовим методом на хроматографі Agilent GC system 6850 (США) за рівнем ацетиленвідновлювальної активності кореневих бульбочок [17]. Урожай зерна обліковували після ручного збирання з наступним його зважуванням.

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали за загальноприйнятими методиками із залученням пакету програм Microsoft Excel 2019. У таблицях наведено середньоарифметичні дані та їх стандартні похибки.

Результати та обговорення

Заміна біологічним азотом значної частини мінеральних азотних добрив, які використовуються за вирощування бобових культур, мож-

лива лише за високої інтенсивності процесу фіксації атмосферного N_2 . Водночас для формування високоефективних симбіотичних систем необхідно цілеспрямовано добирати партнерів симбіозу за їх комплементарністю [18].

Результатом формування бобово-ризобіальної системи є утворення симбіотичного апарату у вигляді корневих бульбочок, і їх поява — необхідна умова реалізації азотфіксуючого потенціалу цієї системи. Бульбочки на коренях сої формуються, здебільшого в орному шарі (до 15 см), на головному корені та бокових корінцях. Фіксація азоту й надходження його в рослину найінтенсивніше відбувається за температури повітря 24—28 °С і відносній вологості 40—60 %. На структурних, добре аерованих ґрунтах бульбочки утворюються інтенсивніше, ніж на ущільнених і безструктурних [19].

Проведені дослідження показали, що кількість бульбочок, сформованих за участю штаму РС07 на фоні застосування максимуму ХЛ, була меншою порівняно з контрольними рослинами на 19,1 % у фазу бутонізації—початку цвітіння та на 15,5 % у фазу утворення бобів. Водночас їхня маса знижувалася на 20,8 % і 16,9 % відповідно. За комплексного застосування стандак топу й *V. japonicum* РС07 зниження досліджуваних показників становило 16,3 і 25,0 % у фазу бутонізації—початку цвітіння та 8,5 і 14,8 % у фазу утворення бобів.

Зниження кількості й маси корневих бульбочок, сформованих за участю *V. japonicum* В78 на фоні обробки за 7 діб до посіву протруйниками, було дещо меншим порівняно з аналогічними показниками рослин, інокульованих ризобіями штаму РС07. Зокрема, кількість бульбочок на фоні завчасного застосування максимуму ХЛ зменшувалася на 15,4 % у фазу бутонізації—початку цвітіння і була на рівні контрольних рослин у фазу утворення бобів, тоді як їхня маса була меншою на 12,0—16,1 % порівняно з контрольними рослинами упродовж вегетації. Токсична дія стандак топу на формування симбіозу сої з *V. japonicum* В78 спричинювала зниження кількості й маси бульбочок відповідно на 17,5 і 22,6 % у фазу бутонізації—початку цвітіння та на 11,7 і 15,3 % у фазу утворення бобів (табл. 1).

Дослідниками показано істотне зменшення кількості життєздатних ризобій на насінні сої через 10 діб після комплексного застосування бактерій-азотфіксаторів із речовинами фунгіцидної та інсектицидної дії. Так, за впливу завчасної інокуляції бульбочковими бактеріями з карбендазімом, на насінні залишалася $1,2 \cdot 10^6$ КУО, за дії піраклостробіну з тіофанатметилом і фіпронілом — $1,0 \cdot 10^4$ КУО та за впливу флудіоксонілу з металаксилом-М — $4,6 \cdot 10^4$ КУО. В той самий час за стандартного застосування мікробного препарату в день посіву і без пестицидів кількість життєздатних клітин *V. japonicum* становила $1,2 \cdot 10^6$ КУО/насінину. У подальшій роботі ці автори з'ясували, що кількість мікробних одиниць на посівному матеріалі навіть за дії протруйників залишалася достатньою для формування ефективного симбіозу [11].

Подібні результати отримані й іншими дослідниками, які визначили життєздатність ризобій за впливу стандак топу за різних строків зберігання обробленого насіння. Ними також відзначено вплив

протруйника на морфологію бактеріальних колоній, меншу толерантність до дії хімічних сполук у *V. elkanii* порівняно з *V. japonicum* та відсутність змін у профілях ДНК обох штамів після контакту з пестицидом. Водночас морфологічні зміни після усунення дії стресового чинника не були виявлені, а симбіотична продуктивність за впливу пестициду та без його застосування відрізнялася неістотно [20].

Отримані нами дані щодо кількості сформованих на коренях сої бульбочок у досліді вказують на високий рівень виживання ризобій на насінні за умов завчасної обробки хімічними ЗЗР та стійкими до фунгіцидів штамами.

Проведені дослідження виявили у фазу бутонізації—початку цвітіння зниження азотфіксувальної активності симбіотичних систем, сформованих за участю обох залучених у роботу штамів ризобій, на фоні застосування максимуму XL на 12,6—25,0 %, а за обробки стандак топом — на 13,9—15,1 % (табл. 2). У фазу утворення бобів відзначено, що за послідовної обробки насіння максимумом XL та *V. japonicum* PC07 АФА була нижчою на 17,9 % порівняно з контрольними рослинами, тоді як за інокуляції ризобіями штаму В78 на фоні дії протруйника цей показник був на рівні контрольних рослин. Підвищення активності азотфіксації на 7,3 та 5,4 % у цю фазу виявили за завчасного застосування стандак топу з *V. japonicum* PC07 і В78.

Отже, зміна нітрогеназної активності симбіотичних систем сої у нашому досліді демонструє їх різну реакцію як на штами, використані для передпосівної інокуляції насіння, так і на відмінні за складом та діючими речовинами протруйники.

У літературі описано результати кількох польових досліджень, проведених із рослинами сої у Бразилії, за обробки насіння стандак топом і різних умов забезпечення рослин азотом упродовж вегетації (внаслідок біологічної фіксації молекулярного N₂ та внесення мінеральних добрив). З'ясовано, що застосування протруйника знижувало загальний вміст азоту в зерні сої незалежно від джерела його надходження. Зважаючи на це автори припустили, що діючі речовини стандак топу можуть безпосередньо впливати на його метаболізм в рослинах [20].

ТАБЛИЦЯ 1. Кількість і маса бульбочок (у розрахунку на 1 рослину) на коренях сої, завчасно обробленої протруйниками та інокульованої стійкими до фунгіцидів штамами *V. japonicum*

Варіант	Фаза розвитку рослин			
	Бутонізація—початок цвітіння		Утворення бобів	
	шт.	г	шт.	г
<i>V. japonicum</i> PC07 (контроль)	31,9±1,5	1,20±0,06	33,0±1,7	1,42±0,07
<i>V. japonicum</i> PC07 + максимум XL	25,8±1,2	0,93±0,05	27,9±1,3	1,18±0,04
<i>V. japonicum</i> PC07 + стандак топ	26,7±1,3	0,90±0,04	30,2±1,5	1,21±0,06
<i>V. japonicum</i> В78 (контроль)	33,8±1,7	1,24±0,06	32,5±1,6	1,50±0,07
<i>V. japonicum</i> В78 + максимум XL	28,6±1,4	1,04±0,05	31,8±1,5	1,32±0,06
<i>V. japonicum</i> В78 + стандак топ	27,9±1,3	0,96±0,04	28,7±1,4	1,27±0,05

Виявлено стимулювальний вплив комплексної завчасної обробки насіння сої протруйниками та бульбочковими бактеріями на ріст рослин сої упродовж вегетації. Підвищення маси надземної частини рослин сої сорту Алмаз у досліді за інокуляції на фоні застосування максимуму XL становило 10,5–14,3 %, а за обробки стандак топом — 6,9–8,5 %. Маса коренів сої на фоні застосування протруйників та інокулянтів була вищою порівняно з контрольними рослинами на 6,1–10,8 % у фазу бутонізації та на 7,9–15,2 % у фазу утворення бобів (табл. 3).

Відомо, що інтегральним показником ефективності симбіозу є формування урожайності зерна бобовою рослиною. У рослин всіх варіантів досліді, до яких було застосовано завчасну обробку протруйниками та бульбочковими бактеріями відзначено підвищення продуктивності порівняно з контрольними (табл. 4). Так, за комплексного застосування хімічних ЗЗР та мікробного препарату на основі *V. japonicum* PC07 прибавка врожаю становила 4,8 і 6,2 %. За впливу діючих речовин максимуму XL і стандак топу на фоні інокуляції *V. japonicum* B78 зернова продуктивність була вищою порівняно з контрольними рослинами на 9,6 та 12,9 % відповідно.

Підвищення продуктивності рослин сої у досліді може бути зумовлене ефективністю протруювання насіння хімічними препаратами з кількома діючими речовинами у своєму складі (стандак топ має три діючі речовини, максимум XL — дві), що передбачає лікувальний і профілактичний ефекти. У свою чергу обробка активними, конкурентоздатними, резистентними до впливу фунгіцидів ризобіями, крім забезпечення рослин азотом, здатна підвищувати їх стійкість до низки абіотичних і біотичних стресових чинників.

Відомо про зниження на 23,8–36,7 % зернової продуктивності сої, обробленої за 14 діб до посіву бенорадом, стандак топом або феввером та інокульованої у день посіву *V. japonicum* 6346. Водночас за застосування протруйників та бульбочкових бактерій безпосередньо у день посіву зниження зернової продуктивності становило від 24,2 до 39,9 %. Крім цього зазначено, що термін передпосівної обробки насіння також був важливим чинником, оскільки впливав на реалізацію азотфіксувального потенціалу сформованих симбіотичних систем [12]. Ангіноні зі співавт. [21] встановили, що насіння сої, промислово оброблене флудіоксонілом (50 мл/50 кг) і тіаметоксаном

ТАБЛИЦЯ 2. Азотфіксувальна активність рослин сої (мкмоль C_2H_4 /(рослину · год)) за обробки протруйниками та інокуляції стійкими до фунгіцидів штамами *V. japonicum*

Варіант	Фаза розвитку рослин	
	Бутонізація—початок цвітіння	Утворення бобів
<i>V. japonicum</i> PC07 (контроль)	6,09±0,30	5,02±0,24
<i>V. japonicum</i> PC07 + максимум XL	4,57±0,20	4,12±0,20
<i>V. japonicum</i> PC07 + стандак топ	5,17±0,24	4,87±0,22
<i>V. japonicum</i> B78 (контроль)	7,05±0,32	5,89±0,28
<i>V. japonicum</i> B78 + максимум XL	6,16±0,29	6,32±0,31
<i>V. japonicum</i> B78 + стандак топ	6,07±0,26	6,21±0,29

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАВЧАСНОЇ ІНОКУЛЯЦІЇ НАСІННЯ СОЇ

ТАБЛИЦЯ 3. Надземна маса рослин та маса коренів сої (г/рослину) на фоні обробки протруйниками та інокуляції стійкими до пестицидів штамами *V. japonicum*

Варіант	Фаза розвитку рослин			
	Бутонізація—початок цвітіння		Утворення бобів	
	надземна маса, г	маса кореня, г	надземна маса, г	маса кореня, г
<i>V. japonicum</i> PC07 (контроль)	27,10±1,37	4,44±0,22	38,77±2,40	6,50±0,29
<i>V. japonicum</i> PC07 + максим XL	28,29±1,56	4,76±0,26	44,30±2,15	7,49±0,32
<i>V. japonicum</i> PC07 + стандак топ	28,96±1,50	4,92±0,25	41,10±1,94	7,09±0,25
<i>V. japonicum</i> B78 (контроль)	29,60±1,43	4,62±0,21	38,00±1,82	5,80±0,24
<i>V. japonicum</i> B78 + максим XL	32,71±1,61	5,05±0,24	43,40±1,84	6,55±0,30
<i>V. japonicum</i> B78 + стандак топ	31,82±1,51	4,90±0,23	41,23±1,18	6,26±0,27

(100 мл/50 кг), можна інокулювати *V. japonicum* SEMIA 5019 і SEMIA 5079 та зберігати 10 днів до посіву, без негативного впливу на врожайність зерна.

У вегетаційних дослідах ми вивчали вплив різних фунгіцидів на ефективність інокуляції сої *V. japonicum* B78 за умов послідовної обробки насіння протруйниками і ризобіями в день посіву. Внаслідок застосування препарату стандак топ та бактеризації відзначено зниження зернової продуктивності рослин на 7,0 %, що вірогідно свідчить про інгібувальний ефект хімічних сполук у складі протруйника на фізіолого-біохімічні процеси в клітинах макросимбіонта, оскільки негативний вплив на рівень асиміляції N₂ кореневими бульбочками виявлено лише у фазу трьох справжніх листків. Завдяки стійкості утворених симбіотичних систем до діючих речовин препарату максим XL зафіксовано збільшення урожаю зерна на 27,2 % [22].

Слід враховувати, що ефекти, виявлені у вегетаційних дослідах з піщаною культурою, можуть істотно відрізнятися порівняно з польовими внаслідок впливу на вирощувані культури та рослинно-мікробну взаємодію численної ґрунтової біоти. У таких дослідах, очевидно, істотно різняться умови, в яких відбувається процес детоксикації

ТАБЛИЦЯ 4. Урожайність зерна сої, завчасно обробленої протруйниками та інокульованої стійкими до фунгіцидів штамами *V. japonicum*

Варіант	Урожайність зерна, ц/га	+/- до контролю, %
<i>V. japonicum</i> PC07 (контроль)	17,65±0,39	—
<i>V. japonicum</i> PC07 + максим XL	18,50±0,45	+4,8
<i>V. japonicum</i> PC07 + стандак топ	18,75±0,62	+6,2
<i>V. japonicum</i> B78 (контроль)	20,90±0,55	—
<i>V. japonicum</i> B78 + максим XL	23,59±0,69	+12,9
<i>V. japonicum</i> B78 + стандак топ	22,90±0,60	+9,6

пестицидів, особливо через сорбційні процеси у ґрунті. Тому важливим для практичного застосування розроблених елементів технології вирощування сої є проведення досліджень у різних ґрунтово-кліматичних зонах України.

Повідомлялося про високу ефективність спільної обробки насіння сої активними штамами ризобій із препаратами фунгіцидної та інсектицидної дії за 30, 45 і 60 діб до посіву. Однак для збереження життєздатності бульбочкових бактерій на посівному матеріалі використовували премакс — специфічний клітинний протектор [23].

Араужо зі співавт. [24] з'ясували, що комплексна обробка інокулянтном і стандак топом за 30 діб до посіву за використання речовин протекторної дії дає змогу забезпечити формування ефективних симбіотичних систем. Проаналізувавши показники зернової продуктивності сої, вирощеної у різних ґрунтово-кліматичних зонах, вони відзначили високий потенціал застосованої технології навіть за несприятливих умов навколишнього середовища. Водночас дослідники вказують, що як засоби протекторної дії для бактеріальних клітин використовували цукри, полімери та різні інертні речовини.

У різних країнах світу впроваджують інноваційні розробки у виробництво мікробних препаратів. Значна частина досліджень спрямована саме на мінімізацію або уникнення токсичного впливу пестицидів на клітини корисної мікробіоти. Як захисні молекули для бактеріальних клітин розглядають також речовини, синтезовані самими мікроорганізмами, наприклад полігідроксибутират або біоплівка [25, 26]. Зважаючи на це у нашій подальшій роботі доцільно детальніше проаналізувати наявні у літературі дані щодо речовин, які можуть забезпечити захист ризобіальних клітин на насінні, та провести власні дослідження їх властивостей і ефективності застосування.

Таким чином, створення різних за ефективністю азотфіксувальних систем бобові рослини—ризобії як моделей для вивчення особливостей взаємодії цих біологічних об'єктів має важливе теоретичне й практичне значення. У результаті нашої роботи встановлено, що завчасна (за 7 діб до посіву) обробка насіння сої сорту Алмаз протруйниками стандак топ і максим XL та інокуляція стійкими до фунгіцидів бульбочковими бактеріями *V. japonicum* PC07 й B78 забезпечують збереження потенціалу азотфіксувальної активності утворених симбіотичних систем і підвищення зернової продуктивності.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Поспелова Г.Д. Видовий склад фітопатогенної флори насіння сої. *Вісник Полт. Держ. Аграр. Акад.* 2015. № 1—2. С. 44—48.
2. Sanzovo A.W.S., Silvestre D.A., Goes K.C.G.P., Volsi B., Constantino L.V., Bordin I., Telles T.S., Andrade D.S. Crop rotation and inoculation increase soil bradyrhizobia population, soybean grain yields, and profitability. *Brazilian J. Microbiol.* 2023. N 54. P. 3187—3200. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01148-2>
3. Коць С.Я., Воробей Н.А., Кириченко О.В., Мельникова Н.М., Михалків Л.М., Пухтаєвич П.П. Мікробіологічні препарати для сільського господарства. Київ: Логос, 2016. 48 с.
4. Трибель С.О., Стригун О.О., Гаманова О.М. Сучасний стан хімічного методу захисту рослин. *Карантин і захист рослин.* 2014. № 1. С. 1—4.

5. Lamichhane J.R., You M.P., Laudinot V., Barbetti M.J., Aubertot J.N. Revisiting sustainability of fungicide seed treatments for field crops. *Plant Disease*. 2020. **104**, N 3. P. 610–623. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-19-1157-FE>
6. Райчук Т.М. Вплив протруйників на мікрофлору та схожість насіння сої. *Наукові доповіді НУБіП*. 2010. **17**, № 1. URL: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/Nd/2010-1/10trtness.pdf> (Дата звернення: 28.12.2023).
7. Сторчоус І. Застосування гербіцидів: очікуваний ефект та побічний вплив. *Пропозиція*. 2014. № 1. С. 100–105.
8. Євтушенко М.Д., Марюгін Ф.М., Туренко В.П., Жеребко В.М., Секун М.П. Фітофармакологія. Київ: Вища освіта, 2004. 432 с.
9. Алексеев О.О., Патица В.П. Формування високоефективної симбіотичної системи *Bradyrhizobium japonicum* — соя. *Наук. зап. Терноп. Нац. пед. Ун-ту. Сер. Біол.* 2014. **60**, № 3. С. 40–43.
10. Getachew Z., Abeble L. Effect of seed treatment using Mancozeb and Ridomil fungicides on *Rhizobium* strain performance, nodulation and yield of soybean (*Glycine max* L.). *J. Agricult. Nat. Res.* 2021. **4**, N 2. P. 86–97. <https://doi.org/10.3126/janr.v4i2.33674>
11. da Silva K., da Silva E.E., Farias E.D.N.C., da Silva Chaves J., Albuquerque C. N.B., Cardoso C. Agronomic efficiency of *Bradyrhizobium* pre-inoculation in association with chemical treatment of soybean seeds. *African J. Agricult. Res.* 2018. **13**, N 14. P. 726–732. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13016>
12. Павлише А.В., Кірізій Д.А., Коць С.Я. Реакція симбіотичних систем сої на дію фунгіцидів за різних способів обробки. *Фізіологія рослин і генетика*. 2017. **49**, № 3. С. 237–247. <https://doi.org/10.15407/frg2017.03.237>
13. Білявська Л.Г., Білявський Ю.В. Новий сорт сої Алмаз. *Науково-технічний бюлетень інституту олійних культур*. 2007. № 12. С. 101–106.
14. Державний реєстр пестицидів і агрохімікатів, дозволених до використання в Україні. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів. URL: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini/> (Дата звернення: 28.12.2023).
15. Воробей Н.А., Кукол К.П., Коць С.Я. Оцінка токсичності впливу фунгіцидів на бульбочкові бактерії *Bradyrhizobium japonicum* у чистій культурі. *Мікробіологічний журнал*. 2020. **82**, № 3. С. 45–54. <https://doi.org/10.15407/microbioj82.03.045>
16. Кукол К.П., Воробей Н.А., Коць С.Я. Чутливість чистих культур *Bradyrhizobium japonicum* до фунгіцидів. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2019. **30**. С. 20–31. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.30.20-31>
17. Hardy R.W.F., Holsten R.D., Jackson E.K., Burns R.C. The acetylene-ethylene assay for N₂ fixation: laboratory and field evaluation. *Plant Physiol.* 1968. **43**, N 8. P. 1185–1207.
18. Walker L., Lagunas B., Gifford M.L. Determinants of host range specificity in legume-rhizobia symbiosis. *Front. Microbiol.* 2020. **11**. 3028. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585749>
19. Бабич А.О. Сучасне виробництво і використання сої. Київ: Урожай, 1993. 427 с.
20. Rodrigues T.F., Bender F.R., Sanzovo A.W.S., Ferreira E., Nogueira M.A., Hungria M. Impact of pesticides in properties of *Bradyrhizobium* spp. And in the symbiotic performance with soybean. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2020. **36**, N 11. 172. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02949-5>
21. Anghinoni F.B.G., Braccini A.L., Scapim C.A., Anghinoni G., Ferri G.C., Suzukawa A.K., Tonin T.A. Pre-inoculation with *Bradyrhizobium* spp. In industrially treated soybean seeds. *Agricult. Sci.* 2017. **8**, N 7. P. 582–590. <https://doi.org/10.4236/as.2017.87044>
22. Кукол К.П., Воробей Н.А., Пухтаєвич П.П., Рибаченко Л.І., Якимчук Р.А. Вплив фунгіцидів на ефективність інокуляції сої стійкими до пестицидів бульбочковими бактеріями. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2020. **31**. С. 26–35. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.26-35>
23. Machineski G.S., Scaramal A.S., de Matos M.A., Machineski O., Colozzi Filho A. Efficiency of pre-inoculation of soybeans with *Bradyrhizobium* up to 60 days before sowing. *African J. Agricult. Res.* 2018. **13**, N 24. P. 1233–1242. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13108>

24. Araujo R.S., Cru S.P.D., Souchie E.L., Martin T.N., Nakatani A.S., Nogueira M.A., Hungria M. Preinoculation of soybean seeds treated with agrichemicals up to 30 days before sowing: Technological innovation for large-scale agriculture. *Int. J. Microbiol.* 2017. 5914786. <https://doi.org/10.1155/2017/5914786>
25. Jayasinghearachchi H.S., Seneviratne G.A Bradyrhizobial-Penicillium spp. Biofilm with nitrogenase activity improves N₂ fixing symbiosis of soybean. *Biol. Fertil. Soils.* 2004. **40**, N 6. P. 432-434. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0796-5>
26. Mariana S.S., Mariangel H., Marco A.N., Santos M.S., Hungria M., Nogueira M.A. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and biofilm by *Azospirillum brasilense* aiming at the development of liquid inoculants with high performance. *African J. Biotechnol.* 2017. **16**, N 37. P. 1855–1862. <https://doi.org/10.5897/AJB2017.16162>

Отримано 22.01.2024

REFERENCES

1. Pospelova, H.D. (2015). Species composition of phytopathogenic flora of soybean seeds. *Visn. Poltavsk. derzhavnoi ahrar. ak-mii*, No. 1-2, pp. 44-48 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31210/visnyk2015.1-2.08>
2. Sanzovo, A.W.S., Silvestre, D.A., Goes, K.C.G.P., Volsi, B., Constantino, L.V., Bordin, I., Telles, T.S. & Andrade, D.S. (2023). Crop rotation and inoculation increase soil bradyrhizobia population, soybean grain yields, and profitability. *Brazilian J. Microbiol.*, No. 54, pp. 3187-3200. <https://doi.org/10.1007/s42770-023-01148-2>
3. Kots, S.Ya., Vorobey, N.A., Kyrychenko, O.V., Melnykova, N.N., Mykhalkiv, L.M. & Pukhtayevych, P.P. (2016). Microbiological preparations for agriculture. Kyiv: Logos [in Ukrainian].
4. Trybel, S.O., Strygun, O.O. & Gamanova, O.M. (2014). Current state of a chemical method of plant protection. *Karantyn i zahyst rast.*, No. 1, pp. 1-4 [in Ukrainian].
5. Lamichhane, J.R., You, M.P., Laudinot, V., Barbetti, M.J. & Aubertot, J.N. (2020). Revisiting sustainability of fungicide seed treatments for field crops. *Plant Disease*, 104, No. 3, pp. 610-623. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-19-1157-FE>
6. Raichuk, T.N. (2010). Influence of seed disinfectants on mycoflora and emergence of soybean seeds. *Scientific Reports of NULES of Ukraine*, 17, No. 1 [in Ukrainian]. Retrieved from <https://nd.nubip.edu.ua/2010-1/10rtness.pdf>
7. Storhou, I. (2014). Herbicides application: expected effect and side influence. *Propozytsiia*, No. 1, pp. 100-105 [in Ukrainian].
8. Ievtushenko, M.D., Mariutin, F.M., Turenko, V.P., Zhrebko, V.M. & Sekun M.P. (2004). *Phytopharmacology*. Kyiv: Vyshcha osvita [in Ukrainian].
9. Aliksieiev, O.O. & Patyka, V.P. (2014). Forming of the powerful symbiotic system *Bradyrhizobium japonicum* — soybean. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk Nat. Pedagogical Un-ty. Ser. Biol.*, 60, No. 3, pp. 40-43 [in Ukrainian].
10. Getachew, Z. & Abeble, L. (2021). Effect of seed treatment using Mancozeb and Ridomil fungicides on *Rhizobium* strain performance, nodulation and yield of soybean (*Glycine max L.*). *J. Agricult. Natural Res.*, 4, No. 2, pp. 86-97. <https://doi.org/10.3126/janr.v4i2.33674>
11. da Silva, K., da Silva, E.E., Farias, E.D.N.C., da Silva Chaves, J., Albuquerque, C.N. B. & Cardoso, C. (2018). Agronomic efficiency of *Bradyrhizobium* pre-inoculation in association with chemical treatment of soybean seeds. *African J. Agricult. Res.*, 13, No. 14, pp. 726-732. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13016>
12. Pavlyshche, A.V., Kiriziy, D.A. & Kots, S.Ya. (2017). The reaction of symbiotic soybean systems to the action of fungicides under various treatment. *Fiziol. rast. genet.*, 49, No. 3, pp. 237-247 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2017.03.237>
13. Bilyavska, L.G. & Bilyavsky, Y.V. (2007). New soybean variety Almaz. *Sci. Techn. Bulletin In-ty of Oilseed Crops NAAS*, No. 12, pp. 101-106.
14. State register of pesticides and agrochemicals authorized for use in Ukraine. Ministry of Env. Protect. and Nat. Res. of Ukraine, November, 2023 [in Ukrainian]. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy/derzhavnyj-reyestr-pestytsydiv-i-agrohimikativ-dozvolenyh-do-vykorystannya-v-ukrayini>

15. Vorobey, N.A., Kukol, K.P. & Kots, S.Ya. (2020). Fungicides toxicity assessment on Bradyrhizobium japonicum nodule bacteria in pure culture. Mikrobiol. Z., 82, No. 3, pp. 45-54 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/microbiolj82.03.045>
16. Kukol, K.P., Vorobey, N.A. & Kots, S.Ya. (2019). Sensitivity of pure cultures of Bradyrhizobium japonicum to fungicides. Silskohospodarska mikrobiol., 30, pp. 20-31 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.30.20-31>
17. Hardy, R.W.F., Holsten, R.D., Jackson, E.K. & Burns, R.C. (1968). The acetylene-ethylene assay for N₂ fixation: laboratory and field evaluation. Plant Physiol., 43, No. 8, pp. 1185-1207. <https://doi.org/10.1104/pp.43.8.1185>
18. Walker, L., Lagunas, B. & Gifford, M.L. (2020). Determinants of host range specificity in legume-rhizobia symbiosis. Front. Microbiol., 11, 3028. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585749>
19. Babych, A.O. (1993). Modern production and use of soybeans. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
20. Rodrigues, T.F., Bender, F.R., Sanzovo, A.W.S., Ferreira, E., Nogueira, M.A. & Hungria, M. (2020). Impact of pesticides in properties of Bradyrhizobium spp. and in the symbiotic performance with soybean. World J. Microbiol. Biotechnol., 36, No. 11, 172. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02949-5>
21. Anghinoni, F.B.G., Braccini, A.L., Scapim, C.A., Anghinoni, G., Ferri, G.C., Suzukawa, A.K. & Tonin, T.A. (2017). Pre-inoculation with Bradyrhizobium spp. in industrially treated soybean seeds. Agricult. Sci., 8, No. 7, pp. 582-590. <https://doi.org/10.4236/as.2017.87044>
22. Kukol, K.P., Vorobey, N.A., Pukhtaievych, P.P., Rybachenko, L.I., & Yakymchuk, R.Ya. (2020). Effect of fungicides on the efficiency of soybean inoculation with pesticide-resistant nodule bacteria. Silskohospodarska mikrobiol., 31, pp. 26-35. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.31.26-35>
23. Machineski, G.S., Scaramal, A.S., de Matos, M.A., Machineski, O. & Colozzi Filho, A. (2018). Efficiency of pre-inoculation of soybeans with Bradyrhizobium up to 60 days before sowing. African J. Agricult. Res., 13, No. 24, pp. 1233-1242. <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13108>
24. Araujo, R.S., Cru, S.P.D., Souchie, E.L., Martin, T.N., Nakatani, A.S., Nogueira, M.A. & Hungria, M. (2017). Preinoculation of soybean seeds treated with agrichemicals up to 30 days before sowing: Technological innovation for large-scale agriculture. Int. J. Microbiol., 2017, 5914786. <https://doi.org/10.1155/2017/5914786>
25. Jayasinghearachchi, H.S. & Seneviratne, G.A (2004). Bradyrhizobial-Penicillium spp. biofilm with nitrogenase activity improves N₂ fixing symbiosis of soybean. Biol. Fertil. Soils, 40, No. 6, pp. 432-434. <https://doi.org/10.1007/s00374-004-0796-5>
26. Mariana, S.S., Mariangel, H., Marco, A.N., Santos, M.S., Hungria, M. & Nogueira, M.A. (2017). Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and biofilm by Azospirillum brasilense aiming at the development of liquid inoculants with high performance. African J. Biotechnol., 16, No. 37, pp. 1855-1862. <https://doi.org/10.5897/AJB2017.16162>

Received 22.01.2024

EFFICIENCY OF SOYBEAN SEEDS INOCULATION WITH FUNGICIDE-RESISTANT RHIZOBIA UNDER PRE-TREATMENT WITH SEED DRESSING AGENTS

K.P. Kukol, N.A. Vorobey, P.P. Pukhtaievych, T.A. Kots

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine
e-mail: katerinakukol@gmail.com

The processes of formation and functioning of soybean symbiotic systems with fungicide-resistant nodule bacteria *Bradyrhizobium japonicum* PC07 and B78 were studied in field experiment under the use of Standak Top and Maxym XL preparations 7 days before sowing. The insignificant decrease in the number and weight of root nodules during the grow-

ing season was observed under the complex pre-treatment of soybean seeds with seed treatment agents and rhizobia, compared to control plants (bacterization without fungicides). In the budding-beginning of flowering stage, the nitrogen fixation activity of symbiotic systems formed with the participation of both strains of nodule bacteria decreased when using Maxim XL by 12.6–25.0 %, and when treated with Standak Top — by 13.9–15.1 %. In the stage bean formation, nitrogen fixation activity was lower by 17.9 % compared to control plants when seeds were treated with Maxim XL and *B. japonicum* PC07. In the case of inoculation with rhizobia strain B78 under the action of the same seed treatment agent, this index was at the level of control plants. In the stage of bean formation, the use of the Standak Top with *B. japonicum* PC07 and B78 showed an increase in nitrogen fixation activity by 7.3 and 5.4 %, respectively. The stimulating effect of complex pre-treatment of soybean seeds with seed dressing agents and nodule bacteria on the growth of soybean plants during the growing season was revealed. The increase in the shoot mass of soybean plants under inoculation with Maxim XL was 10.5–14.3 %, and under treatment with Standak Top — 6.9–8.5 %. The weight of soybean roots under the use of treatment agents with inoculants was higher compared to control plants by 6.1–10.8 % in the budding stage and by 7.9–15.2 % in the stage of bean formation. Plants of all variants treated in advance with seed dressing agents and nodule bacteria (7 days before sowing) showed an increase in grain productivity compared to control plants. When applying Maxim XL and Standak Top, the increase in soybean yield was 4.8 and 6.2 %, respectively, under inoculation with *B. japonicum* PC07, and 9.6 and 12.9 % — under inoculation with *B. japonicum* B78. In general, despite the fact that soybean plants pretreated with seed dressing agents and inoculants were somewhat inferior to the control plants in terms of nodulation activity, nodules on their roots actively assimilated atmospheric N₂, plant growth was more intensive, and grain productivity was higher. Thus, the use of fungicide-resistant rhizobia for inoculation of soybean seeds, even under conditions of their contact for 7 days with the active substances of chemical preparations, allows to ensure the functioning of effective symbiotic systems.

Key words: *Bradyrhizobium japonicum*, soybean, fungicides, inoculation, seed dressing, fungicide-resistant rhizobia strains, nitrogen fixation.

ORCID

КУКОЛ К.П. — K.P. Kukol <https://orcid.org/0000-0002-2889-9957>

ВОРОБЕЙ Н.А. — N.A. Vorobey <https://orcid.org/0000-0002-6039-5409>

ПУХТАЄВИЧ П.П. — P.P. Pukhtaievych <https://orcid.org/0000-0002-6179-6239>

КОЦЬ Т.А. — T.A. Kots <https://orcid.org/0000-0003-4622-9559>