

<https://doi.org/10.15407/frg2025.06.488>

УДК 581.132

## ВПЛИВ ЗАСОЛЕННЯ НА ВМІСТ НІТРИТРЕДУКТАЗИ В ЛИСТКАХ ТА АЗОТФІКСУВАЛЬНУ АКТИВНІСТЬ СИМБІОТИЧНОЇ СИСТЕМИ СОЇ, ІНОКУЛЬОВАНОЇ РИЗОБІЯМИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОКАРБОКСИЛАТІВ Mo І Ge

О.Ю. БОНДАРЕНКО, І.М. ОБЕЗЮК, Л.М. МИХАЛКІВ, С.Я. КОЦЬ

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

Досліджено вміст нітритредуктази в листках та активність нітрогенази в бульбочках як складових комплексу ферментів азотного метаболізму в симбіотичній системі, утвореній рослинами сої *Glycine max* (L.) Merr. сорту Самородок і бульбочковими бактеріями *Bradyrhizobium japonicum* PC08 за використання нанокарбоксилатів германію та молібдену, на фоні засолення (0,25 г NaCl/кг піску). Виявлено, що вміст нітритредуктази у рослинах сої, інокульованої культивованими із мікроелементами ризобіями, був вищим, ніж у контрольних рослинах сої, бактеризованих суспензією бульбочкових бактерій без нанокарбоксилатів. Засолення, хоч і було помірним, спричинило зниження кількості нітритредуктази в листках і активності нітрогенази у рослинах усіх досліджуваних варіантів, але зміни даних показників проявлялися різною мірою залежно від складу інокуляційної суспензії. Найменша різниця щодо обох ферментів між рослинами відповідних варіантів контролю і засолення виявлена за використання молібдену, а найбільша — германію. Отримані дані розширюють уявлення про вплив Mo та Ge на активність ферментів асиміляції азоту та свідчать на користь використання молібдену для оптимізації азотного обміну в рослинах сої в симбіозі з бульбочковими бактеріями за умов засолення.

**Ключові слова:** *Glycine max* (L.) Merr., *Bradyrhizobium japonicum*, інокуляція, нітритредуктаза, азотфіксувальна активність, засолення.

Соя (*Glycine max* (L.) Merr.) є одним із найважливіших джерел рослинного білка у світі. Однак мінливі умови навколишнього середовища та обмежена доступність орних земель потребують використання нових сортів сої з підвищеною стійкістю до стресів [1] та розробки різних агроекологічних заходів, що поліпшують стійкість вже відомих. Основною проблемою будь-якого підходу є складність взаємодій, що відбуваються між рослинами й середовищем на різних стадіях їх розвитку та у відповідь на різні стресові чинники. Для збільшення стресотолерантності рослинних організмів запропоновано різні тех-

Цитування: Бондаренко О.Ю., Обезюк І.М., Михалків Л.М., Коць С.Я. Вплив засолення на вміст нітритредуктази в листках та азотфіксувальну активність симбіотичної системи сої, інокульованої ризобіями із використанням нанокарбоксилатів Mo і Ge. *Фізіологія рослин і генетика*. 2025. 57, № 6. С. 488–496. <https://doi.org/10.15407/frg2025.06.488>

нології обробок насіння та підживлень з огляду на потреби у певні фази розвитку. На функціонування фізіолого-біохімічних процесів у рослинних клітинах впливає забезпеченість макро- та мікроелементами.

Під дією мікроелементів зростає стійкість рослин до бактеріальних і грибних захворювань, впливу несприятливих чинників навколишнього середовища (посухи, засолення, підвищення або зниження температури, тощо) внаслідок стабілізації процесів обміну речовин, усунення функціональних порушень, нормалізації перебігу фізіолого-біохімічних процесів, впливу на процеси фотосинтезу і дихання. Мікроелементи входять до складу багатьох ферментів, тому відіграють важливу роль у житті рослин. Усі біохімічні реакції синтезу, розпаду, обміну органічних речовин відбуваються за участю ферментів. Тому забезпеченість мікроелементами впливає на фотосинтез, окисно-відновні реакції, обмін вуглеводів, асиміляцію азоту й низку інших процесів [2].

Серед необхідних для бобових культур мікроелементів велике значення має молібден (Mo). У рослинах молібден задіяний в процесах перетворення неорганічного фосфору в органічні форми. Молібден також необхідний для таких ферментів, як аскорбатоксидаза, аденіноксидаза, ксантиноксидаза [2] та сприяє метаболізму заліза. Показано, що використання молібдену збільшує вміст білка в зерні [3], оскільки бере участь у біологічній фіксації азоту. В цьому процесі головну роль відіграє ферментативний комплекс — нітрогеназна система. Молібден входить до складу її реакційного центру як компонент білка Fe-Mo (NifDK) [4, 5]. Тому цей мікроелемент позитивно впливає на фізіологічні процеси у сої, зокрема на азотний обмін і фотосинтез, в останньому випадку через покращення забезпечення рослин азотом [6]. Відомо, що біологічна фіксація азоту у сої посилюється, коли насіння перед посівом обробляють молібденом (Mo) [7].

Германій (Ge) надходить у рослину, легко проникаючи через клітинні бар'єри. В живих організмах атоми германію знаходяться у складі германійорганічних сполук чи комплексів, які характеризуються низькою токсичністю та високою біологічною активністю. Германій сприяє нормалізації окисно-відновного стану в клітинах організму.

Важливим процесом у клітинах усіх живих організмів є азотний обмін. У вищих рослин звичайним джерелом азоту за природних умов є нітрати. Проте перед тим, як вступити в реакцію зі сполуками вуглецю з утворенням різноманітних азотовмісних компонентів клітини, нітрати мають відновитися до аміаку. Цей процес — асиміляторне відновлення нітратів відбувається у вищих рослин за такою схемою:



У даному процесі послідовно беруть участь два металовмісні білки — нітратредуктаза та нітритредуктаза. Фізіологічними джерелами електронів є піридиннуклеотиди або відновлений ферредоксин. Фотосинтетична нітритредуктаза, або ферредоксинзалежна нітритредукта-

за, локалізована в хлоропластах і як донор електронів використовує ферредоксин. У коренях донором є НАДФ. При цьому АТФ для відновлення нітратів і нітритів не потрібна. Обидві реакції відбуваються в умовах зниження кількості вільної енергії [8].

Нітрит відновлюється безпосередньо до іона амонію без вивільнення проміжних продуктів. Реакція відновлення нітриту відбувається у хлоропластах листків і пластидах клітин кореня, потребує шість електронів і каталізується ферментом нітритредуктазою. Молекулярна маса ферменту 63—72 кД. Його активність у 5—20 разів перевищує нітратредуктазну. Фермент містить залізопорфіринову протетичну групу і залізо у вигляді кластеру  $4\text{Fe}4\text{S}$  [8].

Показано, що рівень вмісту нітритредуктази тісно пов'язаний з рівнем її тестованої активності. Умови навколишнього середовища, які підвищували рівень активності екстрагованої нітритредуктази, збільшували рівень перехресно реагуючого матеріалу нітритредуктази в екстрактах [9]. Навпаки, умови навколишнього середовища, які призводили до зниження рівня активності екстрагованої нітритредуктази, спричиняли зниження кількості перехресно реагуючого матеріалу. Це свідчить, що модуляція активності екстрагованої нітритредуктази, індукована навколишнім середовищем, передбачає зміну рівня кількості ферменту та не опосередковується оборотною активацією-інактивацією вже існуючого ферменту [8, 9].

Метою нашої роботи було визначення кількості нітритредуктази в листках сої та азотфіксувальної активності симбіотичної системи соя—*V. japonicum* в умовах засолення за передпосівної інокуляції насіння суспензією бульбочкових бактерій, культивованих на середовищі з додаванням нанокарбоксилатів Мо або Ge.

## Методика

В досліді використовували сою *Glycine max* (L.) Merr. сорту Самородок (селекція Інституту кормів та сільського господарства Поділля Національної академії аграрних наук України) і бульбочкові бактерії *Bradyrhizobium japonicum* високоактивного виробничого штаму РС08 із музейної Колекції азотфіксувальних мікроорганізмів відділу симбіотичної азотфіксації Інституту фізіології рослин і генетики НАН України.

Досліди закладали на вегетаційному майданчику ІФРГ НАН України. Рослини вирощували у піщаній культурі у 8-кілограмових посудинах (7 рослин/посудину) за природних освітлення, температури та вологості повітря. Джерелом мінерального живлення була суміш Гельригеля, що містила 0,25 норми азоту. Для моделювання засолення у посудини відповідних варіантів вносили розчин хлориду натрію з розрахунку 0,25 г/кг піску. Вологість субстрату підтримували на оптимальному рівні 60—70 % повної вологоємності.

Культивування бактерій здійснювали методом періодичного інкубування на кругових качалках у колбах Ерленмейера, що містили 200 мл поживного середовища зі швидкістю обертання качалки 220 об/хв. Ризобії вирощували за 26—28 °С на манітно-дріжджовому се-

редовищі такого складу (г/л):  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  — 0,5,  $\text{MgSO}_4$  — 0,2,  $\text{NaCl}$  — 0,1, дріжджовий екстракт — 1,0, маніт — 10,0 [10]. Перед посівом насіння інокулювали бактеріальною суспензією бульбочкових бактерій *V. japonicum* PC08 ( $10^8$  кл/мл) упродовж 1 год. У дослідних варіантах у середовище вирощування ризобій вносили нанокарбоксилати Ge чи Mo у співвідношенні 1 : 1000. Використані нами препарати мікроелементів люб'язно надані ТОВ «Науково-виробнича компанія «АВАТАР»» (Україна, Київ). У контролі використовували інокуляційну суспензію *V. japonicum*, що містила культивовані на манітно-дріжджовому середовищі бактеріальні клітини без додатково внесених мікроелементів.

Схема досліду передбачала такі варіанти: насіння + *V. japonicum* PC08 (контроль 1); насіння + *V. japonicum* PC08 + Mo; насіння + *V. japonicum* PC08 + Ge; насіння + *V. japonicum* PC08,  $\text{NaCl}$  (контроль 2); насіння + *V. japonicum* PC08 + Mo,  $\text{NaCl}$ ; насіння + *V. japonicum* PC08 + Ge,  $\text{NaCl}$ .

Азотфіксувальну активність (АФА) корневих бульбочок визначали ацетиленовим методом [11] із використанням хроматографа «Agilent Technologies 6850» (США) із полуменево-іонізаційним детектором. Відбори зразків для аналізу здійснювали у фазу цвітіння. Повторність вимірювань — п'ятиразова.

Білки з листків виділяли в екстракційному буфері, який містив: 100 мМ *tris*- $\text{HCl}$  рН 8,8, 50 мМ ДТТ, 10 мМ EDTA, 1 мМ ФМСФ, інгібітори протеаз. Білковий осад розчиняли в буфері для лізису: 8,5 М сечовина, 2,5 мМ тіосечовина, 5 % CHAPS, 2 % тритон X-100; 1 % амфоліти, 100 мМ ДТТ.

Білкові профілі зразків отримували методом електрофорезу. Для цього готували зразки з концентрацією сумарного білка 100 мкг/мл і проводили поліакриламідний гель-електрофорез у денатурувальних умовах за Леммлі [12]. Розподільний гель містив 12 % акриламід, 0,1 % бісакриламід, 6 М сечовину, 0,375 М *tris*- $\text{HCl}$  (рН 8,9), 0,003 % персульфату амонію, 0,0003 % TEMED. Концентрувальний гель містив 8 % акриламід, 0,1 % бісакриламід, 6 М сечовину, 0,175 М *tris*- $\text{HCl}$  (рН 6,8), 0,003 % персульфату амонію, 0,0003 % TEMED. Для ідентифікації смуг використовували суміш маркерних білків фірми «SIGMA», США. Суміші містили такі білки з відомими масами:  $\beta$ -галактозидаза *E. coli* — 116 кД; фосфорилаза В кролика — 97,4 кД; бичачий альбумін — 66 кД; овальбумін курчати — 45 кД.

Електрофорез проводили в ПААГ з ДДС- $\text{Na}$  з використанням буферної системи *tris*-гліцин за методикою Леммлі. Потужність електричного струму при електрофорезі становила 1,5 Вт на пластину. Оцифровані пластинки гелю, реєстрограми, обробляли за допомогою комп'ютерної програми обробки гелів «ScnImage», денситограми електрофоретичних доріжок білків — з використанням програми «Gelobrob».

Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали за загальноприйнятими методиками із залученням програми «Microsoft Excel 2019». Застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (відмінності між середніми значеннями обчислювали за критерієм Стью-

дента, їх вважали вірогідними за  $p < 0,05$ ). У таблиці та на рисунку наведено середньоарифметичні дані та їх стандартні похибки.

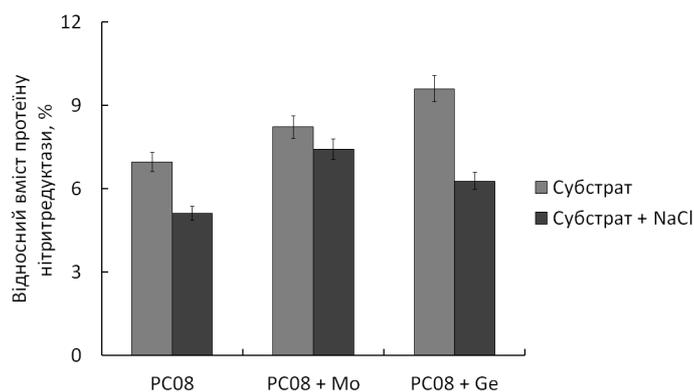
### Результати та обговорення

Вміст нітритредуктази в листках, як складової комплексу ферментів азотного метаболізму в рослинах сої, визначали у фазу цвітіння. Ця фаза є критичним етапом для формування врожаю, оскільки є ключовою для запилення й формування майбутніх бобів і, водночас — це найвразливіший період щодо хвороб та впливу різних чинників навколишнього середовища. Фіксація азоту рослинами сої в цю фазу зазвичай найвища.

Активність нітритредуктази в листках набагато вища, порівняно з нітратредуктазою. Цей фермент, відновлюючи нітрити, зменшує їхню кількість та робить азот доступним для включення в органічні сполуки, що знижує токсичний вплив нітритів на клітину. Саме тому, від кількості даного ферменту залежить кількість азоту, який клітина може використати для синтезу білка.

Результати аналізу змін вмісту нітритредуктази в листках сої, інокульованої *B. japonicum* PC08 за використання нанокарбоксилатів германію та молібдену і вирощуваної на звичайному і засоленому субстраті, представлені на рисунку. Виявлено, що в листках рослин сої за інокуляції суспензією *B. japonicum* і культивування на середовищі з нанокарбоксилатами молібдену та германію був значно вищий вміст даного протеїну ( $8,22 \pm 0,41$  та  $9,61 \pm 0,58$  % від загальної кількості розчинного білка листків, відповідно), ніж у контрольних рослин ( $6,97 \pm 0,49$  %).

Соя, як і багато інших культур, чутлива до абіотичних стресів, які знижують її врожайність. Засолення є однією з найпоширеніших проблем у посушливих та напівпосушливих регіонах світу, що робить поля непродуктивними [13, 14]. Сольовий стрес пригнічує ріст рослин із двох причин: по-перше, через осмотичний ефект, який пере-



Відносний вміст нітритредуктази (% від загальної кількості розчинного білка) в листках сої сорту Самородок, інокульованої *B. japonicum* PC08 за використання нанокарбоксилатів молібдену та германію:

PC08 — насіння + *B. japonicum* PC08; PC08 + Mo — насіння + *B. japonicum* PC08 + Mo; PC08 + Ge — насіння + *B. japonicum* PC08 + Ge

шкоджає поглинання води із ґрунту, а по-друге, через солеспецифічний або іонно-надлишковий ефект NaCl. Тобто, рослини страждають від комбінованого стресу, спричиненого засоленням, включно з дефіцитом води та іонним дисбалансом [15]. Адаптація до сольового стресу передбачає зміни в експресії генів, а згодом і в білковому профілі тканин, та є дуже складною на рівні клітини й цілої рослини [16, 17].

В нашому досліді засолення, хоча й помірно, знижувало вміст нітритредуктази у листках контрольних рослин в середньому на 27 % (до  $5,12 \pm 0,39$  % від загального вмісту розчинного білка) (див. рисунок). В разі інокуляції ризобіями з нанокарбоксилатом молібдену це зниження становило 8 % (до  $7,42 \pm 0,52$  %), а з нанокарбоксилатом германію — 27 % (до  $6,28 \pm 0,50$  %), як і у рослин контрольного варіанта. Тобто, рослини варіанта із молібденом виявилися стійкішими до дії засолення за цим показником. Вміст нітритредуктази в їхніх листках на засоленні був найвищим, а, зважаючи на пряму залежність між активністю й вмістом даного ферменту [9], найвищою була і його активність.

Результати визначення азотфіксувальної активності показали, що у рослин сої контрольного варіанта цей параметр був найвищим у варіанті з інокуляцією *V. japonicum* PC08, культивованими на середовищі з додаванням нанокарбоксилату Ge (таблиця). Раніше нами було виявлено, що за нормальних умов це сприяє формуванню активного симбіотичного апарату [18]. Однак в умовах засолення воно може бути небажаним, оскільки активація метаболічних процесів підвищує вразливість до стресових чинників та призводить до пригнічення порівняно з інтактними ризобіями [18]. В наших дослідженнях засолення субстрату знижувало АФА симбіотичних систем усіх трьох досліджених варіантів, проте рівень зниження був неоднаковим. Зменшення цього показника порівняно з контролем без засолення у варіанті з інокуляцією *V. japonicum* PC08+Ge було найсильнішим і становило 42 %. У варіанті інокуляції з *V. japonicum* PC08+Mo зниження АФА було неістотним і становило лише 5 %, а за інокуляції чистою культурою *V. japonicum* PC08 — 15 %.

Отже, на незасоленому субстраті у рослин сої за інокуляції *V. japonicum* PC08 при використанні нанокарбоксилату германію істотно підвищувались показники вмісту ферменту нітритредуктази, а відтак і його активності в листках у фазу цвітіння [8, 9]. Крім того, показник азотфіксувальної активності симбіотичних систем, створених

*Азотфіксувальна активність (АФА, мкмоль C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/рослину·год) рослин сої сорту Самородок, інокульованої V. japonicum PC08 за використання нанокарбоксилатів молібдену і германію та вирощеної на засоленому субстраті*

Варіант	АФА на субстраті без засолення	АФА на субстраті з додаванням NaCl
<i>V. japonicum</i> PC08	$5,359 \pm 0,631$	$4,540 \pm 0,944$
<i>V. japonicum</i> PC08+Mo	$3,855 \pm 0,258$	$3,659 \pm 0,466$
<i>V. japonicum</i> PC08+Ge	$6,815 \pm 0,523$	$3,980 \pm 0,511$

такими рослинами, теж був найвищий з усіх варіантів. Листки рослин за інокуляції ризобіями з мікроелементами містили більшу кількість ферменту нітритредуктази, ніж за інокуляції чистою культурою. Це дає підставу вважати, що в листках рослин цих варіантів і активність асиміляції азоту вища, ніж у рослин контрольного варіанта.

Засолення субстрату, на якому вирощували рослини сої, знижувало різною мірою показники вмісту ферменту нітритредуктази в листках та показники АФА. Відмічено, що навіть за помірної засоленості субстрату (0,25 г/кг) показники азотфіксувальної активності у рослин сої, інокульованих ризобіями з додаванням нанокарбоксилатів, були значно нижчими, ніж у рослин контрольного варіанта, причому зниження у варіанті з *V. japonicum* PC08+Ge було найсильнішим.

Відмінності у реакції ферментної системи асиміляції азоту в листках та симбіотичного апарату на інокуляцію рослин сої суспензією ризобій з додаванням нанокарбоксилатів металів можна пояснити безпосередньою дією останніх на насіння. Відомо, що такі препарати відрізняються від звичайних неорганічних солей мікроелементів високим проникненням у клітини та біологічною активністю [18, 19].

Отримані дані розширюють уявлення про вплив Мо та Ge на активність ферментів асиміляції азоту та свідчать на користь використання нанокарбоксилатів молібдену для оптимізації азотного обміну в рослинах сої в симбіозі з бульбочковими бактеріями за умов засолення.

#### REFERENCES

1. Hashiguchi, A. & Komatsu, S. (2017). Chapter 6 — Proteomics of Soybean Plants. *Proteomics in Food Science: From Farm to Fork*, pp. 89-105. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804007-2.00006-0>
2. Zambrano Zambrano, J.G. & Jurado Olivo, E.A. (2020). Efecto de aplicaciones foliares de molibdeno sobre el uso eficiente de nitrógeno y rendimiento en maíz amarillo duro (Bachelor's thesis, Calceta: ESPAM MFL).
3. Cardoso, B.M., Lazarini, E., Moreira, A., Moraes, L.A.C., Santos, F.L.D. & Dameto, L.S. (2021). Effect of Foliar Molybdenum Application on Seed Quality of Soybean Cultivars. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 6, No. 52, pp. 666-672. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1862164>
4. Rousk, K., Degboe, J., Michelsen, A., Bradley, R. & Bellenger, J.P. (2017). Molybdenum and phosphorus limitation of moss-associated nitrogen fixation in boreal ecosystems. *New Phytol.*, 214, pp. 97-107. <https://doi.org/10.1111/nph.14331>
5. Schwarz, G., Mendel, R.R. & Ribbe, M.W. (2009). Molybdenum cofactors, enzymes and pathways. *Nature*, 440, pp. 839-847. <https://doi.org/10.1038/nature08302>
6. Cakmak, I., Brown, P., Colmenero-Flores, J.M., Husted, S., Kutman, B.Y., Nikolic, M., Rengel, Z., Schmidt, S.B. & Zhao, F.-J. (2023). Micronutrients. In: Z. Rengel, I. Cakmak & P.J. White (Eds.), *Marschner's mineral nutrition of plants* (pp. 283-385). Cambridge, Academic press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819773-8.00017-4>
7. Abreu-Junior, C.H., Gruberger, G.A.C., Cardoso, P.H.S., Goncalves, P.W.B., Nogueira, T.A.R., Capra, G.F. & Jani, A.D. (2023). Soybean Seed Enrichment with Cobalt and Molybdenum as an Alternative to Conventional Seed Treatment. *Plants*, 12, No. 5, pp. 1164. <https://doi.org/10.3390/plants12051164>

8. Sarkar, A.K. & Sadhukhan, S. (2022). Proteomics — a powerful tool for understanding saline stress response in germinating seed. In: Roy S., Mathur P., Chakraborty A.P., Saha S.P. (Eds). *Plant Stress: Challenges and Management in the New Decade*. Springer, pp. 375-399. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-95365-2\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-95365-2_24)
9. Gupta, S.C. & Beevers, L. (1983). Synthesis and degradation of nitrite reductase in pea leaves. *J. Exp. Bot.*, 34, pp. 1455-1462. <https://doi.org/10.1104/pp.75.1.251>
10. Child, J.J. (1975). Nitrogen fixation by a daughter association of *Rhizobium* sp. with non-legume plant cells. *Nature*, 253, pp. 350-351. <https://doi.org/10.1038/253350a0>
11. Hardy, R.W.F., Holsten, R.D., Jackson, E.K. & Burns, R.C. (1968). Acetylene-ethylene assay for N<sub>2</sub> fixation: laboratory and field evaluation. *Plant Physiol.*, 43, No. 8, pp. 1185-1207. <https://doi.org/10.1104/pp.43.8.1185>
12. Laemmli, U.K. (1970) Cleavage of structural proteins during the assembly of bacteriophage T4. *Nature*, 227, No. 5259, pp. 680-685. <https://doi.org/10.1038/227680a0>
13. Sharifi, M., Ghorbanli, M. & Ebrahimzadeh, E. (2007). Improved growth of salinity-stressed soybean after inoculation with salt pre-treated mycorrhizal fungi. *J. Plant Physiol.*, 164, pp. 1144-1151. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.06.016>
14. Sobhanian, H., Razavizadeh, R., Nanjo, Y., Ehsanpour, A.A., Jazii, F.R., Motamed, N. & Komatsu, S. (2010). Proteome analysis of soybean leaves, hypocotyls and roots under salt stress. *Proteome Sci.*, 8, No. 1, p. 19. <https://doi.org/10.1186/1477-5956-8-19>
15. Munns, R., James, R.A. & Lauchli, A. (2006). Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Exp. Bot.*, 57, No. 5, pp. 1025-1043. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj100>
16. Ashraf, M. & Foolad, M.R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ Exp. Bot.*, 59, No. 2, pp. 206-216. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
17. Parker, R., Flowers, T.J., Moore, A.L. & Harpham, N.V.J. (2006). An accurate and reproducible method for proteome profiling of the effects of salt stress in the rice leaf lamina. *J. Exp. Bot.*, 57, No. 5, pp. 1109-1118. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj134>
18. Kiriziy, D., Obeziuk, I., Mykhalkiv, L. & Kots, S. (2025). Effect of salinity on the soybean plants symbiotic and photosynthetic apparatuses activity under rhizobia inoculation with the addition of Ge and Mo nanocarboxylates. *Studia Biologica*, 19(2), pp. 105-120. <https://doi.org/10.30970/sbi.1902.823>
19. Kolbert, Z., Barroso, J.B., Brouquisse, R., Corpas, F.J., Gupta, K.J., Lindermayr, C., Loake, G.J., Palma J.M., Petřivalský, M., Wendehenne, D. & Hancock, J.T. (2019). A forty-year journey: the generation and role of NO in plants. *Nitric Oxide Biol. Chem.*, 93, pp. 53-70. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2019.09.006>

Received 08.12.25

EFFECT OF SALINITY ON THE NITRITE REDUCTASE CONTENT IN LEAVES AND NITROGEN FIXING ACTIVITY OF SYMBIOTIC SYSTEMS OF SOYBEAN INOCULATED WITH RHIZOBIA USING NANOCARBOXYLATES OF Mo AND Ge

*O.Yu. Bondarenko, I.M. Obeziuk, L.M. Mykhalkiv, S.Ya. Kots*

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine  
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine  
e-mail: [biochemkiev@ukr.net](mailto:biochemkiev@ukr.net)

The nitrite reductase content in leaves, and the nitrogenase activity in nodules as components of the complex of nitrogen metabolism enzymes in symbiotic system formed by soybean plants *Glycine max* (L.) Merr. of the Samorodok variety and nodule bacteria *Bradyrhizobium japonicum* PC08 using nanocarboxylates of germanium and molybdenum under salinity (0.25 g NaCl/kg of sand) conditions were revealed. It was found that the content of nitrite reductase in soybean plants inoculated with rhizobia cultivated with trace ele-

ments was higher than in control plants bacterized with a suspension of nodule bacteria without nanocarboxylates. Salinity caused a decrease in the amount of nitrate reductase in leaves, and nitrogenase activity in plants of all studied variants, but changes in these indices varied depending on the composition of the inoculation suspension. The smallest difference in both enzymes between plants under salinity and the corresponding control was found with the use of Mo, and the largest — with Ge. The obtained data expand the understanding the Mo and Ge influence on the nitrogen assimilation enzymes activity, and support the use of Mo to optimize nitrogen metabolism in soybean plants in symbiosis with nodule bacteria under salinity conditions.

*Key words:* *Glycine max* (L.) Merr., *Bradyrhizobium japonicum*, inoculation, nitrite reductase, nitrogen-fixing activity, salinity.

#### ORCID

**О.Ю. БОНДАРЕНКО** — O.Yu. Bondarenko <https://orcid.org/0000-0002-6859-7136>

**І.М. ОБЕЗЮК** — I.M. Obeziuk <https://orcid.org/0009-0003-3663-6246>

**Л.М. МИХАЛКІВ** — L.M. Mykhalkiv <https://orcid.org/0000-0001-7488-4804>

**С.Я. КОЦЬ** — S.Ya. Kots <https://orcid.org/0000-0002-3477-793X>