

АГРОНОМІЯ

УДК 579.841.3:631.847:635.652:502.22:551.577.38

Стійкість симбіозу *Rhizobium leguminosarum*–*Pisum sativum* за дії полісахаридно-білкового комплексу в умовах штучної посухи**Ворона О.В.¹ , Козар С.Ф.² **¹ Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН² Національний університет «Чернігівська політехніка» E-mail: Ворона О.В. alexvoronaia@ukr.net

Ворона О.В., Козар С.Ф. Стійкість симбіозу *Rhizobium leguminosarum*–*Pisum sativum* за дії полісахаридно-білкового комплексу в умовах штучної посухи. «Агробіологія», 2025. № 2. С. 19–28.

Voronaia O., Kozar S. Stability of *Rhizobium leguminosarum*–*Pisum sativum* symbiosis under the action of PPC under conditions of artificial drought. «Agrobiology», 2025. no. 2, pp. 19–28.

Рукопис отримано: 03.09.2025 р.

Прийнято: 18.09.2025 р.

Затверджено до друку: 27.11.2025 р.

doi: 10.33245/2310-9270-2025-199-2-19-28

З огляду на кліматичні зміни та часті посухи актуальним є пошук способів підвищення виживаності *Rhizobium leguminosarum* у навкол насіннєвій зоні за передпосівної інокуляції насіння, що забезпечить формування стійкішого бобово-ризобіального симбіозу.

Досліджено вплив полісахаридно-білкового комплексу (ПБК) на ефективність бактеризації насіння активними штамами *R. leguminosarum* в умовах недостатнього зволоження. Порівняно збереженість бульбочкових бактерій після бактеризації та оцінено її вплив на розвиток рослин і азотфіксуючу активність за оптимального (60 % повної вологоємності, ПВ) та низького (30 % ПВ) зволоження.

Метою дослідження було визначення виживаності бульбочкових бактерій у навкол насіннєвій зоні та оцінка впливу бактеризації насіння гороху (*Pisum sativum* L.) з ПБК на утворення й масу бульбочок, азотфіксацію та початковий ріст рослин за штучної посухи.

Використані методи: мікробіологічні, фізіологічні, хроматографічні та статистичні.

Отримані дані показали, що бактеризація гороху сорту Царевич активними штамами *R. leguminosarum* позитивно впливає на ріст рослин. Виявлено залежність збереження бактерій у навкол насіннєвій зоні від рівня зволоження та штаму інокулянта.

За поєднання бактеризації з ПБК виживаність бактерій була вищою, що супроводжувалося більшою масою бульбочок і вищою азотфіксацією. Встановлено, що всі показники функціонування симбіозу *R. leguminosarum*–*Pisum sativum* за посухи знижувалися порівняно з оптимальними умовами.

Найефективнішою була інокуляція насіння гороху сорту Царевич штамом *R. leguminosarum* Г222 у поєднанні з ПБК, яка забезпечила найбільше збільшення кількості й маси бульбочок, а також високі показники азотфіксації як за оптимального, так і недостатнього зволоження.

Ключові слова: *Rhizobium leguminosarum*, біологічна азотфіксація, бобово-ризобіальний симбіоз, штучна посуха, полісахаридно-білковий комплекс (ПБК).

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень. Зміна клімату, яка постійно відбувається на планеті, належить до найважливіших чинників, які впливають на життя та розвиток людства [1]. Особливої уваги в цьому контексті заслуговує сільське господарство, адже саме воно є найбільш вразливим до коливань температури та кількості опадів. Функціонування галузі землеробства загалом, а також величина врожаю сільськогосподарських культур залежать від агрокліматичних умов, зокрема рівня тепло- і вологозабезпеченості [2]. Це обумовлено тим, що зміна температурного режиму, а також інтенсивності зволоження безпосередньо впливає на біохімічні процеси, швидкість росту і розвитку рослин, а також на їх продуктивність в агроценозах [3, 4].

Водний режим є особливо значущим серед абіотичних чинників. Водозабезпечення впливає на формування врожаю бобових культур, включаючи горох [5]. Дефіцит вологи [6–8] або, навпаки, її надлишок [6] негативно впливають на рослину і на специфічні бульбочкові бактерії, які розвиваються на її корінні. Вважається, що оптимальною для формування та функціонування симбіотичної системи рослина-діазотроф є вологість на рівні 60–70 % від повної вологоємності [9]. У бобових культур у роки посухи значно зменшується активність азотфіксації, а також уповільнюється поглинання мінерального азоту. Зокрема за умов надлишку або нестачі вологи у симбіотичних діазотрофів порушується респіраторна функція, що призводить до зменшення їх чисельності в екотопі [10, 11]. Важливість досліджень у цій сфері визначається низькою стійкістю бульбочкових бактерій до водного стресу.

Формування бобово-ризобіального симбіозу є ключовою умовою забезпечення високого рівня азотфіксації [12]. Проте його потенціал у взаємодії з аборигенними ризобіями обмежений низькою активністю останніх або їх недостатньою кількістю у зоні проростання насіння [13–15]. Водночас численні абіотичні чинники додатково регулюють взаємовідносини специфічних бульбочкових бактерій з відповідною бобовою культурою [3, 6]. Часто ці чинники визначають інтенсивність утворення симбіозу і відіграють вирішальну роль у реалізації потенційних можливостей симбіонтів та у загальній ефективності симбіотичної системи [16–18]. У зв'язку з цим вивчення симбіотичних діазотрофів, їх здатності до утворення бульбочок, рівня азотфіксувальної активності та

впливу на ріст і розвиток рослин має бути комплексним [19, 20].

Важливим завданням є пошук способів адаптації бобово-ризобіального симбіозу до посухи. Одним з найбільш ефективних рішень є передпосівна бактеризація насіння біопрепаратами на основі ефективних штамів бульбочкових бактерій. Цей агрозахід не лише підвищує врожайність культур, а також насичує ґрунт специфічними діазотрофами, які утворюють ефективніший, у порівнянні з аборигенними азотфіксувальними бактеріями, симбіоз із рослинами [21].

Інтродукція корисних бактерій у ґрунт здійснюється методом інокуляції насіння [22–24]. При цьому проміжок часу від висіву бактеризованого насіння до проростання кореня рослини є критичним для діазотрофів [25]. Тому особливої актуальності набуває розробка та впровадження у практику комплексних біологічних препаратів, здатних забезпечувати утримання і виживання бактерій на насінні. Йдеться про підвищення їх здатності закріплюватися на насінні після потрапляння у ґрунт і про збереження життєздатності на інокульованому матеріалі. Це завдання вирішується завдяки використанню липкогенних плівкоутворювачів (прилипачів), що мають полісахаридну або білкову природу.

Метою досліджень було дослідити вплив передпосівної бактеризації насіння гороху посівного штамми *R. leguminosarum* у поєднанні з ПБК на збереженість бактерій у навколонуасіннєвій зоні, утворення бульбочок, азотфіксувальну активність і ріст рослин в умовах штучної посухи.

Матеріал і методи дослідження. Досліджували рослини гороху (*Pisum sativum* L.) сорту Царевич та активні штами бульбочкових бактерій *R. leguminosarum* 250 а, *R. leguminosarum* 31 та *R. leguminosarum* Г 222. Штами *R. leguminosarum* 250 а та *R. leguminosarum* 31 отримані з колекції корисних ґрунтових мікроорганізмів Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. Новий штам *R. leguminosarum* Г 222 виділений в лабораторії фізіології мікроорганізмів Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. Для досліджень використовували суспензію клітин бактерій симбіотичних діазотрофів, яку отримували за допомогою вирощування їх у рідкому поживному середовищі на основі горохового відвару за умов періодичного культивування на качалках за 220 об./хв за температури $+28\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Перед бактеризацією насіння стерилізували 3 % розчином перекису водню впродовж 15 хв і промивали дистильованою водою [26].

Для подовження збереженості мікроорганізмів застосовували раніше підібраний полісахаридно-білковий комплекс [27], який складається з полісахаридів (альгінат натрію, крохмаль) і речовин білкової природи (желатин).

Інокуляцію насіння проводили бактеріальною суспензією з розрахунку 2×10^5 клітин на насінину. Насіння висівали у стерильний пісок через 2 години після інокуляції.

Для вивчення впливу бактеризації на утворення бульбочок і їх активність, масу та біометричні показники рослин вирощували горох у дволітрових посудинах в піщаній культурі із внесенням поживного розчину, що містить (на 1 л) $1,00 \text{ г Ca(NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $0,25 \text{ г KNO}_3$, $0,20 \text{ г KH}_2\text{PO}_4$, $0,25 \text{ г MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0,25 \text{ г (NH}_4)_2\text{SO}_4$ та комплекс мікроелементів: $2,86 \text{ мг H}_3\text{BO}_3$, $1,81 \text{ мг MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $0,22 \text{ мг ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $0,08 \text{ мг CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $0,02 \text{ мг Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $4,98 \text{ мг FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Посуху створювали контрольованим поливом упродовж проведення дослідів. Повторність – 6-кратна.

Вивчали збереженість бульбочкових бактерій у навколонуасіннєвій зоні за температури $+20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, за оптимальної (60 % повної вологості (ПВ)) та недостатньої вологості (30 % ПВ). Кількість бактерій у навколонуасіннєвій зоні визначали впродовж 5 діб загальноприйнятими мікробіологічними методами [28, 29].

Схема дослідів:

Блок I

1. Контроль (без бактеризації) (60 % ПВ).
2. Обробка насіння ПБК (60 % ПВ).
3. Бактеризація *R. leguminosarum* 250 а (60 %).
4. Бактеризація *R. leguminosarum* 250 а сумісно з ПБК (60 % ПВ).
5. Бактеризація *R. leguminosarum* 31 (60 % ПВ).
6. Бактеризація *R. leguminosarum* 31 сумісно з ПБК (60 % ПВ).
7. Бактеризація *R. leguminosarum* Г 222 (60 %).
8. Бактеризація *R. leguminosarum* Г 222 сумісно з ПБК (60 %).

Блок II

1. Посуха (без бактеризації) (30 % ПВ).
2. Обробка насіння ПБК (30 % ПВ).
3. Бактеризація *R. leguminosarum* 250 а (30 % ПВ).

4. Бактеризація *R. leguminosarum* 250 а сумісно з ПБК (30 % ПВ).

5. Бактеризація *R. leguminosarum* 31 (30 % ПВ).

6. Бактеризація *R. leguminosarum* 31 сумісно з ПБК (30 % ПВ).

7. Бактеризація *R. leguminosarum* Г 222 (30 %).

8. Бактеризація *R. leguminosarum* Г 222 сумісно з ПБК (30 %).

Активність азотфіксації мікроорганізмів визначали ацетиленовим методом [30] на газовому хроматографі Chrom-4 з полум'яно-іонізаційним детектором на колонці з $\beta - \beta$ - диоксипропіонітрилом.

Усі результати оброблено статистично за загальноприйнятою методикою [31].

Результати дослідження та обговорення. У результаті проведення досліджень виявлено, що виживаність інтродукованих бактерій *R. leguminosarum* у навколонуасіннєвій зоні залежить як від вологості ґрунту, так і штаму інокулянта. Дані наведені на рисунку 1 свідчать про те, що за дії ПБК за сумісної передпосівної бактеризації на першу добу потрапляння насіння у субстрат за нормальної вологості (60 % ПВ) виживаність бактерій *R. leguminosarum* перевищувала кількість бактерій у ґрунті за умов водного дефіциту у 1,9 рази. На 3-ю добу різниця у чисельності мікроорганізмів за дії ПБК та без застосування комплексу за нормальних умов (60 % ПВ) становила 38,1 %.

В умовах штучної посухи (30 % ПВ) за передпосівної бактеризації уже на першу добу кількість життєздатних клітин бактерій на насінні різко знижувалась, однак за сумісного застосування ПБК та передпосівної бактеризації за тих же умов виживаність становить на 30,9 % більше, ніж у варіантах без застосування ПБК.

На четверту добу після потрапляння інокульованого насіння у субстрат за 30 % ПВ без застосування ПБК життєздатних клітин *R. leguminosarum* не виявлено.

ПБК сприяє кращому збереженню бактерій *R. leguminosarum* в навколонуасіннєвій зоні за умов оптимального (60 % ПВ) та недостатнього водозабезпечення (30 %). Кращу збереженість клітин *R. leguminosarum* за дії ПБК можна пояснити тим, що він захищає бактерії від несприятливого впливу зовнішнього середовища, а також слугує для бактерій роду *Rhizobium* джерелом поживних речовин в умовах водного стресу, спричиненого посухою.

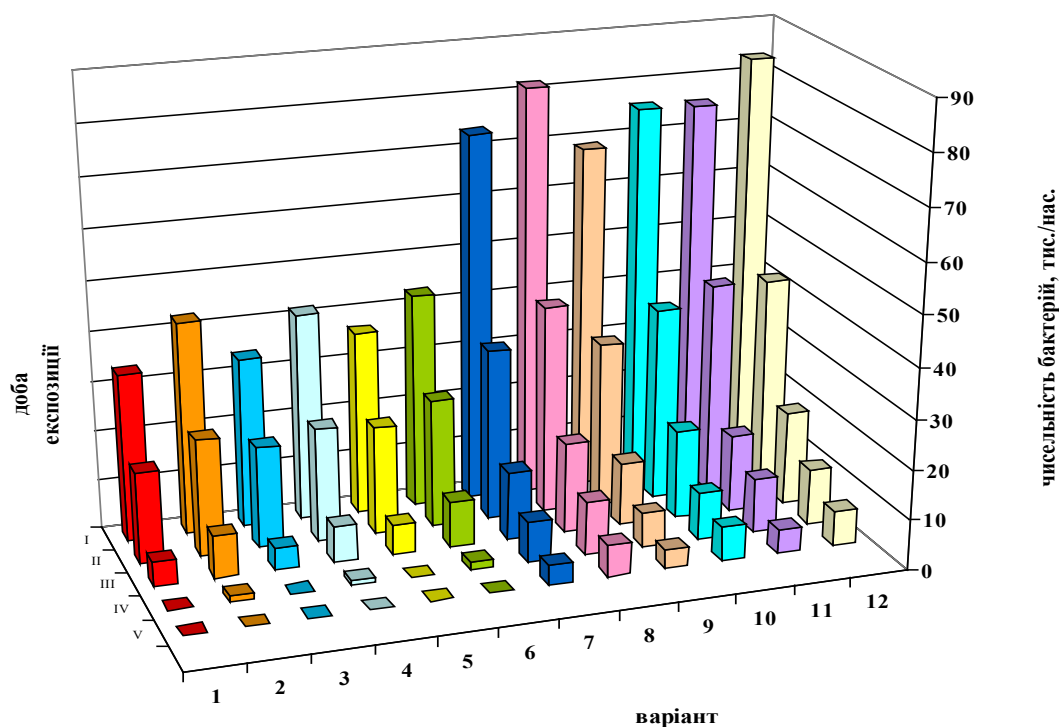


Рис. 1. Вживаність *R. leguminosarum* за дії ПБК на насінні гороху посівного у субстраті за умов штучної посухи.

Умовні позначення:

- 1 – *R. leguminosarum* 250 а 30 % ПВ; 2 – *R. leguminosarum* 250 а+ПБК 30 % ПВ;
 3 – *R. leguminosarum* 31 30 % ПВ; 4 – *R. leguminosarum* 31+ПБК 30 % ПВ;
 5 – *R. leguminosarum* Г 222 30 % ПВ; 6 – *R. leguminosarum* Г 222+ПБК 30 % ПВ;
 7 – *R. leguminosarum* 250 а 60 % ПВ; 8 – *R. leguminosarum* 250 а+ПБК 60 % ПВ;
 9 – *R. leguminosarum* 31 60 % ПВ; 10 – *R. leguminosarum* 31+ПБК 60 % ПВ;
 11 – *R. leguminosarum* Г 222 60 % ПВ; 12 – *R. leguminosarum* Г 222+ПБК 60 % ПВ.

Впродовж усього періоду спостережень кількість бульбочок, сформованих на коренях рослин гороху різними за активністю штамми *R. leguminosarum* в умовах штучної посухи, була меншою, ніж у відповідних рослин, які росли за оптимального водозабезпечення 60 % ПВ (табл. 1). Зокрема у варіантах з недостатньою (30 % ПВ) вологістю кількість сформованих бульбочок у рослин в усіх дослідних варіантах помітно зростала за використання ПБК. За нодуляційною активністю найменш чутливим до стресових умов, які зумовлені недостатнім водозабезпеченням (30 % ПВ), виявився штам *R. leguminosarum* Г 222.

Виявлено, що маса рослин залежить від умов водозабезпечення, бактеризації та використання ПБК. Зокрема, маса рослин вирощених за 60 % ПВ за сумісного застосування ПБК та бактеризації була на 24,8 % більшою за варіанти бактеризації без застосування комплексу. За умов недостатнього водоза-

безпечення (30 % ПВ) суха маса рослин була на 27,6 % більшою у варіантах із застосуванням ПБК. Найбільший приріст маси рослин як за оптимальних, так і посушливих умов спостерігається у варіантах з бактеризацією штамом *R. leguminosarum* Г 222 сумісно з ПБК (табл. 1).

Більша кількість міжвузлів у рослин спостерігається за бактеризації за дії ПБК за 60 % ПВ, ніж в умовах недостатнього водозабезпечення. За недостатнього водозабезпечення (30 % ПВ) рослин гороху маса бульбочок на їх коренях була меншою, ніж на коренях рослин, вирощених за оптимального поливу (60 % ПВ).

Найбільша кількість міжвузлів утворювалася у разі застосування штаму *R. leguminosarum* Г 222 за сумісного застосування ПБК за нормального водозабезпечення (60 % ПВ) і перевищувала контроль на 47,84 % (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив штамів *R. leguminosarum* за дії ПБК на ріст рослин гороху посівного сорту Царевич в умовах штучної посухи (вегетаційний дослід, фаза цвітіння)

Варіант	Висота рослин, см		Кількість міжвузлів, од.		Суха вегетативна маса рослин, г/рослину	
	60 % ПВ	30 % ПВ	60 % ПВ	30 % ПВ	60 % ПВ	30 % ПВ
Контроль (без обробки)	44,33 ± 1,28	35,20 ± 1,19	11,67 ± 1,06	10,33 ± 0,33	2,001 ± 0,032	1,670 ± 0,033
ПБК	46,44 ± 1,20	37,67 ± 0,84	12,58 ± 0,58	10,77 ± 0,98	2,089 ± 0,012	1,701 ± 0,017
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а	60,75 ± 1,31	51,20 ± 1,04	15,9 ± 0,38	11,90 ± 0,91	2,458 ± 0,046	1,775 ± 0,027
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а + ПБК	64,88 ± 1,21	54,11 ± 1,07	17,0 ± 0,48	15,55 ± 0,39	3,208 ± 0,031	2,347 ± 0,032
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31	57,36 ± 1,28	48,67 ± 1,09	15,0 ± 0,25	11,69 ± 0,23	1,690 ± 0,099	2,303 ± 0,034
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31 + ПБК	62,89 ± 1,29	52,33 ± 0,64	16,8 ± 0,18	15,33 ± 0,26	3,134 ± 0,064	2,266 ± 0,037
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222	66,07 ± 1,46	56,08 ± 1,14	16,32 ± 0,28	14,88 ± 0,15	2,694 ± 0,055	2,108 ± 0,036
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222 + ПБК	69,79 ± 1,15	61,11 ± 1,17	17,3 ± 0,36	15,75 ± 0,24	3,446 ± 0,044	2,572 ± 0,025

У всіх дослідних варіантах кількість бульбочок була вищою за застосування бактеризації та ПБК як за оптимального зволоження (60 % ПВ), так і в умовах штучної посухи (30 % ПВ) (табл. 2). У разі застосування ПБК та бактеризації спостерігалось збільшення кількості бульбочок в порівнянні з варіантами з бактеризацією без застосування цього комплексу. Впродовж дослідного періоду найбільша кількість бульбочок спостерігалась за бактеризації штамом *R. leguminosarum* Г 222 за дії ПБК за нормального водозабезпечення (60 % ПВ) і перевищувала варіант *R. leguminosarum* 250 а із сумісним застосуванням ПБК на 15,57 %, варіант *R. leguminosarum* 31 + ПБК – на 21,55 % (табл. 2).

Найбільший приріст маси бульбочок за 60 % ПВ дала обробка штамом *R. leguminosarum* Г 222 сумісно із застосуванням ПБК і перевищувала варіант *R. leguminosarum* 250 а + ПБК на 19,06 %, варіант *R. leguminosarum* 31 + ПБК – на 25,69 %.

За умов недостатнього водозабезпечення (30 % ПВ) за використання ПБК приріст

маси бульбочок в грамах був меншим у порівнянні з оптимальним водозабезпеченням. Хоча маса бульбочок була вищою у варіантах із сумісним застосуванням ПБК та бактеризації, ніж у варіантах без застосування ПБК. Найбільший приріст маси бульбочок спостерігається у варіанті *R. leguminosarum* Г 222 + ПБК і перевищував варіант із бактеризацією цим же штамом без дії ПБК на 47,17 %.

Водний дефіцит обмежує симбіотичну азотфіксацію у бобових, що негативно впливає на ефективність функціонування симбіотичних систем. У результаті досліджень виявили значне зменшення азотфіксувальної активності у рослин гороху, вирощених за недостатнього поливу (30 % ПВ) (табл. 3). Зокрема, за 30 % ПВ у всіх варіантах з інокуляцією гороху штамми *R. leguminosarum* азотфіксація зменшувалася у середньому у 2,1 рази порівняно з інокульованими цими ж штамми, але вирощеними за нормального водозабезпечення рослинами (60 % ПВ). Азотфіксувальна активність у всіх варіантах із сумісним застосуванням

ПБК за 30 % ПВ була значно вищою, ніж у варіантах з бактеризацією без дії цього комплексу. Найбільша азотфіксувальна активність спостерігалась у варіанті з бактеризацією штамом *R. leguminosarum* Г 222 із застосуванням ПБК за нормального водозабезпечення (60 % ПВ) і перевищувала

в 2 рази варіант із бактеризацією цим же штамом із застосуванням ПБК за умов штучної посухи (30 % ПВ). Азотфіксувальна активність у всіх варіантах за недостатнього поливу (30 % ПВ) була значно меншою, ніж у цих же варіантах за нормального водозабезпечення (60 % ПВ).

Таблиця 2 – Вплив штамів *R. leguminosarum* на утворення бульбочок на коренях рослин гороху сорту Царевич за умов штучної посухи (вегетаційний дослід, фаза цвітіння)

Варіант	Кількість бульбочок, од./росл.		Маса бульбочок, г/росл.	
	60 % ПВ	30 % ПВ	60 % ПВ	30 % ПВ
Контроль (без обробки)	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Полісахаридно-білковий комплекс (ПБК)	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а	8,9 ± 1,11	2,8 ± 1,01	0,240 ± 0,025	0,141 ± 0,011
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а+ПБК	12,2 ± 1,43	3,9 ± 1,11	0,341 ± 0,017	0,214 ± 0,026
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31	8,3 ± 0,35	2,6 ± 1,02	0,222 ± 0,041	0,115 ± 0,014
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31+ПБК	11,6 ± 1,27	3,5 ± 1,12	0,323 ± 0,014	0,195 ± 0,029
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222	9,3 ± 1,90	3,1 ± 1,14	0,284 ± 0,015	0,159 ± 0,036
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222+ПБК	14,1 ± 1,85	4,2 ± 1,08	0,406 ± 0,031	0,234 ± 0,037

Таблиця 3 – Вплив передпосівної бактеризації гороху посівного штамми *R. leguminosarum* на азотфіксувальну активність рослин гороху сорту Царевич за умов штучної посухи (вегетаційний дослід, фаза цвітіння)

Варіант	АА, мкг N/рослину	
	60 % ПВ	30 % ПВ
Контроль (без обробки)	0,00	0,00
Полісахаридно-білковий комплекс (ПБК)	0,00	0,00
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а	478,40 ± 12,55	244,65 ± 11,79
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 250 а+ПБК	645,14 ± 18,8	305,27 ± 16,2
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31	445,17 ± 10,5	220,32 ± 15,5
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> 31+ПБК	632,39 ± 17,72	236,33 ± 9,22
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222	391,40 ± 22,55	249,45 ± 11,99
Бактеризація <i>R. leguminosarum</i> Г 222+ПБК	655,14 ± 28,8	325,64 ± 14,46

Висновки. Отже, недостатнє водозабезпечення (30 % ПВ) негативно впливає на процес формування бобово-ризобіального симбіозу, оскільки за умов посухи знижується виживаність бульбочкових бактерій в навколонасіньній зоні. Це можна пояснити тим, що за умов водного стресу пригнічується процес проникнення ризобій у тканини кореня, під час його розвитку, що негативно позначається на кількості кореневих бульбочок, та впливає на азотфіксувальну активність симбіотичного апарату загалом.

За нодуляційною активністю та масою бульбочок, сформованих на коренях, штам *R. leguminosarum* Г 222 виявився найстійкішим до стресових умов, що, своєю чергою, є показником ефективності його симбіозу з рослинами *Pisum sativum* і підтверджує господарську значимість.

Встановлено, що ПБК підвищує життєздатність бульбочкових бактерій за умов посухи. Застосування цього комплексу забезпечує фіксацію бактерій на насінні, підтримує їх життєздатність у навколонасіньній зоні, що сприяє формуванню ефективного симбіозу діазотроф-рослина, а також кращому росту і розвитку гороху посівного.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ford H.V., Jones N.H., Brendan Andrew J. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses. *Journal of Integrative Agriculture*. 2021. 17. P. 1–15. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61794-5
2. Agamil R.A., Ghramh H.A., Hashem M. Seed inoculation with *Azospirillum lipoferum* alleviates the adverse effects of drought stress on wheat plants. *JABFQ*. 2017. 90. P. 165–173. DOI: 10.5073/JABFQ.2017.090.021
3. Fenta B.A., Beebe S.E., Kunert K.J. Role of fixing nitrogen in common bean growth under water deficit conditions. *Food Energy Secur.* 2020. 18. 43 p. DOI: 10.1002/fes3.183
4. Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress / A. Sharma et al. *Biomolecules*. 2019. 9(7). 285 p. DOI: 10.3390/biom9070285
5. Han S.K., Wagner D. Role of chromatin in water stress responses in plant. *J. Exp. Botany*. 2014. 65(10). P. 285–299. DOI: 10.1093/jxb/ert403.
6. Apel A., Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress and signal transduction. *Plant Biol.* 2004. 55. P. 373–399. DOI: 10.1146/annurev-arplant.55.031903.141701.
7. Diversity and environmental stress responses of rhizobia bacteria from Egyptian grain legumes / H.H. Zahran et al. *Aust. J. Basic Appl. Sci.* 2012. 6. P. 571–583.
8. Kaushal M., Wani S.P. Plant – growth promoting rhizobacteria: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. *Ann. Microbiol.* 2016. 66. P. 35–42. DOI: 10.1007/s13213-015-1112-3
9. Fang Y., Xiong L. General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cell. Mol. Life Sci.* 2015. 72(4). P. 673–689. DOI: 10.1007/s00018-014-1767-0.
10. Mayak S., Tirosh T., Glick B.R. Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. *Plant Sci.* 2014. 166. P. 525–530. DOI: 10.1016/j.plantsci.2003.10.025
11. Мельник В.М., Коць С.Я. Формування і функціонування симбіотичних систем соя – *Bradyrhizobium japonicum* за різного водозабезпечення. *Фізіологія рослин та генетика*. 2015. Т. 47. № 6. С. 483–490.
12. Kots S.Y., Gryshchuk O.O. Phytohormonal regulation of legume-rhizobium symbiosis. *Фізіологія рослин та генетика*. 2019. Vol. 51. No 1. P. 3–27. DOI: 10.15407/frg2019.01.003
13. Andrews M., Andrews M.E. Specificity in Legume-Rhizobia Symbioses. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. 18(4). 705 p. DOI: 10.3390/ijms18040705
14. Comparison of drought tolerance in nitrogen-fixing and inorganic nitrogen grown common beans / A. Lodeiro et al. *Plant Sci.* 2000. 154. P. 31–41. DOI: 10.1016/S0168-9452(99)00246-0
15. Біологічний азот / В.П. Патики та ін. Київ: Світ, 2003. 424 с.
16. Gourion B., Berrabah F., Ratet P., Stacey G. Rhizobium – legume symbioses: the crucial role of plant immunity. *Acta Horticulturae*. 2018. 3. P. 186–194. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.008
17. Jobby R., Jha P., Gupta A., Desai A. Bio-transformation of chromium by root nodule bacteria *Sinorhizobium* sp. *PloS ONE*. 2019. 14. P. 17–20. DOI: 10.1371/journal.pone.0219387
18. Survival of several Rhizobium/Bradyrhizobium strains on different inoculant formulations and inoculated seeds / F.J. Temprano et al. *International microbiology*. 2002. 5(2). P. 81–86. DOI: 10.1007/s10123-002-0067
19. Herridge D., Peoples M., Boddey M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. 2008. *Plant and Soil*. 311. P. 11–18. DOI: 10.1007/s11104-008-9668-3
20. Lindstrom K., Mousavi S.A. Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Thematic Issue on Agricultural Biotechnology*. 2020. 13. P. 57–63. DOI: 10.1111/1751-7915.13517
21. Мікробні препарати у землеробстві. Теорія і практика: монографія / В.В. Волкогон та ін. Київ: Аграрна наука, 2006. 312 с.

22. Inoculation with selected indigenous mycorrhizal complex improves *Ceratonia siliqua*'s growth and response to drought stress / I. Jadranec et al. Saudi J. Biol. Sci. 2021. 28. P. 825–832. DOI: 10.1016/j.sjbs.2020.11.018

23. Rai R., Dash P.K., Mohapatra T., Singh A. Phenotypic and molecular characterization of indigenous *rhizobia* nodulating chickpea in India. Indian Journal of Experimental Biology. 2012. 50. P. 340–350. DOI: 10.18805/LR-430

24. Моргун В. Бактеризація посівного матеріалу бобових. Пропозиція. 2007. № 2. С. 40–41.

25. Козар С.Ф., Євтушенко Т.А., Нестеренко В.М. Вплив речовин різного хімічного складу на життєздатність діазотрофів на насінні сільськогосподарських культур. Сільськогосподарська мікробіологія. 2017. Вип. 25. С. 10–17. DOI: 10.35868/1997-3004.25.10-17

26. Молоцький М.Я., Васильківський С.П., Князюк В.І., Власенко В.А. Селекція і насінництво сільськогосподарських рослин. Київ: Вища освіта, 2006. 460 с.

27. Метод збереження функціональної активності і життєдіяльності діазотрофів: пат. 147465, Україна: МПК C05F11/08, C05F11/08. Опубл. 12.05.21.

28. Єщенко В.О., Копитко П.Г., Костоґриз П.В., Опришко В.П. Основи наукових досліджень в агрономії. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і. К.», 2014. 332 с.

29. Волкогон В.В., Надкернична О.В., Токмакова Л.М. Експериментальна ґрунтова мікробіологія. Київ: Аграрна наука, 2010. 464 с.

30. Hardy R.W.F., Holsten R.D., Jackson E.K., Burns R.C. The acetylene-ethylene assay for nitrogen fixation: laboratory and field evaluation. Plant Physiology. 1968. 43(8). P. 1185–1207. DOI: 10.1104/pp.43.8.1185.

31. Методика наукових досліджень в агрономії: навч. посіб. / Е.Р. Ермантраут та ін. Харків: Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва, 2008. 64 с.

REFERENCES

1. Ford, H.V., Jones, N.H., Brendan Andrew, J. (2021). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses. Journal of Integrative Agriculture. no. 17, pp. 1–15. DOI: 10.1016/S2095-3119(17)61794-5

2. Agamil, R.A., Ghramh, H.A., Hashem, M. (2017). Seed inoculation with *Azospirillum lipoferum* alleviates the adverse effects of drought stress on wheat plants. JABFQ. no. 90, pp. 165–173. DOI: 10.5073/JABFQ.2017.090.021

3. Fenta, B.A., Beebe, S.E., Kunert, K.J. (2020). Role of fixing nitrogen in common bean growth under water deficit conditions. Food Energy Secur. no. 18, 43 p. DOI: 10.1002/fes3.183

4. Sharma, A., Shahzad, B., Kumar, V., Kohli, S.K., Sidhu, G.P.S., Bali, A.S., Handa, N., Kapoor, D., Bhardwaj, R., Zheng, B. (2019). Phytohormones regulate accumulation of osmolytes under abiotic stress. Biomolecules. no. 9(7), 285 p. DOI: 10.3390/biom9070285

5. Han, S.K., Wagner, D. (2014). Role of chromatin in water stress responses in plant. J. Exp. Botany. no. 65(10), pp. 285–299. DOI: 10.1093/jxb/ert403.

6. Apel, A., Hirt, H. (2004). Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress and signal transduction. Plant Biol. no. 55, pp. 373–399. DOI: 10.1146/annurev.arplant.55.031903.141701.

7. Zahran, H.H., Abdel-Fattah, M., Yasser, M.M., Mahmoud, A.M., Redmar, E.J. (2012). Diversity and environmental stress responses of *rhizobia* bacteria from Egyptian grain legumes. Aust. J. Basic Appl. Sci. no. 6, pp. 571–583.

8. Kaushal, M., Wani, S.P. (2016). Plant – growth promoting *rhizobacteria*: drought stress alleviators to ameliorate crop production in drylands. Ann. Microbiol. no. 66, pp. 35–42. DOI: 10.1007/s13213-015-1112-3

9. Fang, Y., Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. Cell. Mol. Life Sci. no. 72(4), pp. 673–689. DOI: 10.1007/s00018-014-1767-0.

10. Mayak, S., Tirosh, T., Glick, B.R. (2014). Plant growth-promoting bacteria that confer resistance to water stress in tomatoes and peppers. Plant Sci. no. 166, pp. 525–530. DOI: 10.1016/j.plantsci.2003.10.025

11. Melnyk, V.M., Kots, S.Y. (2015). Formuvannya i funktsionuvannya symbiotychnykh system soya – *Bradyrhizobium japonicum* za riznoho vodo zabezpechennya [Floor mat. Formation and functioning of symbiotic systems of soybean – *Bradyrhizobium japonicum* with different water supply]. Fyzyolohyya rastenyi y henetyka [Plant physiology and genetics]. no. 47(6), pp. 483–490.

12. Kots, S.Y., Gryshchuk, O.O. (2019). Phytohormonal regulation of legume-rhizobium symbiosis. Fiziologia rastenij i genetika [Physiology of roslin and genetics]. no. 51(1), pp. 3–27. DOI: 10.15407/frg2019.01.003

13. Andrews, M., Andrews, M.E. (2017). Specificity in Legume-Rhizobia Symbioses. International Journal of Molecular Sciences. no. 18(4), 705 p. DOI: 10.3390/ijms18040705

14. Lodeiro, A., González, P., Hernández, A., Balagué, L., Favelukes, G. (2000). Comparison of drought tolerance in nitrogen-fixing and inorganic nitrogen grown common beans. Plant Sci. no. 154, pp. 31–41. DOI: 10.1016/S0168-9452(99)00246-0

15. Patyka, V.P., Kots, S.Y.A., Volkohon, V.V., Sherstoboyeva, O.V., Melnychuk, T.M., Kalinichenko, A.V., Hrynyk, I.V. (2003). Biologichnyy azot [Biological nitrogen]. Kyiv, World, 424 p.

16. Gourion, B., Berrabah, F., Ratet, P., Stacey, G. (2018). Rhizobium – legume symbioses: the crucial role of plant immunity. *Acta Horticulturae*. no. 3, pp. 186–194. DOI: 10.1016/j.tplants.2014.11.008
17. Jobby, R., Jha, P., Gupta, A., Desai, A. (2019). Biotransformation of chromium by root nodule bacteria *Sinorhizobium* sp. *PloS ONE*. no. 14, pp. 17–20. DOI: 10.1371/journal.pone.0219387
18. Temprano, F.J., Albareda, M., Camacho, M., Daza, A., Santamaría, C., Rodríguez-Navarro, D.N. (2002). Survival of several *Rhizobium/Bradyrhizobium* strains on different inoculant formulations and inoculated seeds. *International microbiology*. no. 5(2), pp. 81–86. DOI: 10.1007/s10123-002-0067
19. Herridge, D., Peoples, M. Boddey, M. (2008). Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. *Plant and Soil*. no. 311, pp. 11–18. DOI: 10.1007/s11104-008-9668-3
20. Lindstrom, K., Mousavi, S.A. (2020). Effectiveness of nitrogen fixation in rhizobia. *Thematic Issue on Agricultural Biotechnology*. no. 13, pp. 57–63. DOI: 10.1111/1751-7915.13517
21. Volkohon, V.V., Nadkernychna, O.V., Kovalivska, T.M., Tokmakova, L.M., Kopylov, Y.P., Kozar, S.F., Khalep, Y.M. (2006). Mikrobni preparaty u zemlerobstvi. *Teoriya i praktyka* [Microbial preparations in agriculture. Theory and practice]. Kyiv, 154 p.
22. Jadrane, I., Alfeddy, M.N., Dounas, H., Kouisni, L., Aziz, F., Ouahmane, L. (2021). Inoculation with selected indigenous mycorrhizal complex improves *Ceratonia siliqua*'s growth and response to drought stress. *Saudi J. Biol. Sci.* no. 28, pp. 825–832. DOI: 10.1016/j.sjbs.2020.11.018
23. Rai, R., Dash, P.K., Mohapatra, T., Singh, A. (2012). Phenotypic and molecular characterization of indigenous rhizobia nodulating chickpea in India. *Indian Journal of Experimental Biology*. no. 50, pp. 340–350. DOI: 10.18805/LR-430
24. Morhun, V. (2007). Bakteryzatsiya posivnoho materialu bobovykh [Bacterization of legume seed material]. *Propozytsiya* [Proposition]. no. 2, pp. 40–41.
25. Kozar, S.F., Yevtushenko, T.A., Nesterenko, V.M. (2017). Vplyv rechovyn riznoho khimichnoho skladu na zhyttiezdatsnist diazotrofov na nasinni silskohospodarskykh kultur [An infusion of speeches of a diverse chemical warehouse for livelihood and entertainment for us of culture and culture]. *Silskohospodarska mikrobiologiya* [Agricultural Microbiology]. no. 25, pp. 10–17.
26. Molotskyi, M.Ya., Vasylykivskyi, S.P., Kniazuk, V.I., Vlasenko, V.A. (2006). Seleksiia i nasynystvo silskohopodarskykh roslyn [Breeding and seed production of agricultural plants]. Kyiv, Higher education, 460 p.
27. Metod zberezhenia funktsionalnoi aktyvnosti i zhyttiedialnosti diazotrofov: pat. 147465UA, MIIK C05F11/08, C05F11/08 [Method of preserving viability and functional activity of diazotrophs: pat. 147465UA, IPC C05F11/08, C05F11/08. 12.05.2021].
28. Ieshchenko, V.O., Kopytko, P.H., Kostohryz, P.V., Opryshko, V.P. (2014). *Osnovy naukovykh doslidzhen v ahronomii* [Fundamentals of scientific research in agronomy]. Vinnytsia, PP "TD" Edelweiss i. TO", 332 p.
29. Volkohon, V.V., Nadkernychna, O.V., Tokmakova, L.M. (2010). *Eksperymental'na gruntova mikrobiologiya* [Experimental soil microbiology]. Kyiv, Agrarian science, 464 p.
30. Hardy, R.W.F., Holsten, R.D., Jackson, E.K., Burns, R.C. (1968). The acetylene-ethylene assay for nitrogen fixation: laboratory and field evaluation. *Plant Physiology*. no. 43(8), pp. 1185–1207. DOI: 10.1104/pp.43.8.1185.
31. Ermantraut, E.R., Bobro, M.A., Hoptsiy, T.I. (2008). *Metodyka naukovykh doslidzhen' v ahronomiyi* [Methods of scientific research of agronomy]. Kharkiv, Kharkiv National Agrarian University im. V.V. Dokuchaeva, 64 p.

Stability of *Rhizobium leguminosarum*–*Pisum sativum* symbiosis under the action of PPC under conditions of artificial drought

Voronaia O., Kozar S.

Considering climate change and frequent droughts, it is urgent to find ways to increase the survival of *Rhizobium leguminosarum* in the peri-seed zone during pre-sowing seed inoculation, which will ensure the formation of a more stable legume-rhizobial symbiosis.

The effect of a polysaccharide-protein complex (PPC) on the efficiency of seed inoculation with active strains of *R. leguminosarum* under conditions of insufficient moisture was studied. The survival of nodule bacteria after bacterization was compared and its effect on plant development and nitrogen-fixing activity was assessed under optimal (60 % total moisture capacity, VC) and low (30 % VC) moisture conditions.

The aim of the study was to determine the survival of nodule bacteria in the peri-seed zone and assess the effect of bacterization of pea seeds (*Pisum sativum* L.) with PPC on the formation and mass of nodules, nitrogen fixation, and initial plant growth under artificial drought.

Methods used: microbiological, physiological, chromatographic and statistical.

The data obtained showed that inoculation of pea varieties Tsarevich with active strains of *R. leguminosarum* has a positive effect on plant growth. A correlation between bacterial survival in the peri-seed zone on the moisture level and the inoculant strain was revealed.

When bacterization was combined with PBC, bacterial survival was higher, which was accompanied by a greater mass of nodules and higher nitrogen fixation. It was determined that all indicators of the functioning of the *R. leguminosarum* – *Pisum sativum* symbiosis during drought decreased compared to optimal conditions.

The most effective was the inoculation of pea seeds of the Tsarevich variety with the *R. legumino-*

sarum G222 strain in combination with PBC, which provided the greatest increase in the number and mass of nodules, as well as high nitrogen fixation rates both under optimal and insufficient moisture.

Key words: *Rhizobium leguminosarum*, biological nitrogen fixation, legume-rhizobial symbiosis, artificial drought, polysaccharide-protein complex (PPC).



Copyright: Вороная О.В., Козар С.Ф. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Вороная О.В.

Козар С.Ф.

<https://orcid.org/0000-0001-6029-4758>

<https://orcid.org/0000-0003-1341-5603>