

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ *BACILLUS SUBTILIS* ДЛЯ ВЕДЕННЯ ЕКОБЕЗПЕЧНОГО ТВАРИННИЦТВА (огляд літератури)

О. В. Тертична^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-1000-7946>,

Н. О. Кравченко¹, <https://orcid.org/0000-0003-1000-6947>,

О. В. Крапивний¹, <https://orcid.org/0009-0000-7227-0665>,

М. В. Якимович², <https://orcid.org/0009-0000-0632-4995>

¹Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН
вул. Шевченка, 97; м. Чернігів, 14030, Україна

²Інститут агроєкології та природокористування НААН
вул. Метрологічна, 12; м. Київ, 03140, Україна

e-mail: olyater@ukr.net

Мета. Здійснити аналітичний огляд наукових літературних джерел щодо властивостей і перспектив використання *Bacillus subtilis* в екобезпечному тваринництві. **Методи.** Для дослідження задекларованої проблеми застосовано порівняльний аналіз, емпіричний, функціональний і системний підходи, використання яких дає змогу комплексно розглядати складові елементи тематики. Використано загальнонаукові методи досліджень: інформаційно-бібліографічний, аналітичний, узагальнення результатів. **Результати.** В аналітичному огляді висвітлено генетичні, фізіологічні й біохімічні особливості *B. subtilis*. Широке використання *B. subtilis* охоплює різні галузі: ветеринарію, кормовиробництво, біотехнологію, сільське господарство (тваринництво й рослинництво), медицину, екологію. Вивчено потенціал практичної реалізації та запропоновано майбутні перспективи ведення екобезпечного тваринництва й біоремедіації навколишнього середовища. Розглянуто сучасні методика, такі як кластеризовані короткі паліндромні повтори та інтегративні обчислювальні методи. Такий підхід стане основою для розробки управлінських рішень із позицій сталого розвитку та регенеративного сільського господарства для розв'язання глобальних екологічних проблем. **Висновки.** Узагальнено особливості *B. subtilis* (генетична доступність, метаболічна універсальність і стійкість до стресів), проаналізовано застосування в «зеленій мікробіології». Огляд особливо акцентує увагу на сталому біопродукуванні, кормовиробництві й екологічній біоремедіації навколишнього середовища. Безперечним аргументом на користь впровадження концептуальних засад «зеленої мікробіології» є здатність *B. subtilis* виробляти ферменти, антибактеріальні речовини і інші корисні сполуки, що є альтернативою традиційним підходам до їх виробництва. Використання *B. subtilis* сприяє отриманню екобезпечної продукції тваринництва.

Ключові слова: спорові бактерії, екологічна безпека, сталий розвиток, «зелена мікробіологія», пробіотики, антагоністична активність, компостування.

Вступ. Інтенсивна життєдіяльність великої кількості мікроорганізмів є важливим фактором забезпечення динамічної рівноваги в біосфері. Важлива екологічна функція мікроорганізмів полягає у забезпеченні й підтримці кругообігу речовин у природі. Мік-

роорганізми беруть участь у трансформації вуглецю, азоту, сполук фосфору, сірки, заліза. Вони впливають на утворення органічних речовин і гумусу, а також на родючість ґрунтів. Саме мікроорганізми перетворюють недоступні для рослин сполуки в мобільні, оптимальні для метаболізму, є індикаторами екологічного стану ґрунту: оперативно реагують на забруднення, що відображається на біологічній активності, зокрема ферментативній [1].

Мікроорганізми є важливою функціональною частиною різних екосистем і біосфери загалом, до того ж мають важливий вплив на навколишнє природне середовище [2]. У контексті сучасних викликів і поглиблення екологічної кризи вивчення перспектив використання *B. subtilis* з метою екологізації сучасного тваринництва є надзвичайно актуальним. Реалії сьогодення, пріоритетність екологічної парадигми вимагає пошуку нових, ефективних і безпечних підходів для поліпшення стану навколишнього природного середовища в зонах виробництва продукції тваринництва, що зі свого боку забезпечує зниження витрат і підвищення рентабельності галузі [3; 4]. У виробників і споживачів продукції тваринництва зростає зацікавленість до застосування екологічно безпечних технологій у цій стратегічно важливій для продовольчої безпеки галузі, зокрема до зниження використання синтетичних добавок, антибіотиків, хімічних речовин та інших ксенобіотиків і поллютантів, які після використання мігрують еколого-трофічними ланцюгами в об'єкти довкілля. Це дає змогу отримувати здорову й безпечну продукцію для споживачів, що відповідає Статті 42 Конституції України: «Держава захищає права споживачів, здійснює контроль за якістю і безпечністю продукції та усіх видів послуг і робіт, сприяє діяльності громадських організацій споживачів» [5]. Галузь тваринництва в значною мірою впливає на структуру сільськогосподарського виробництва й рівень циркулярності економіки. Наразі в аспекті «парадигми циркулярної економіки» необхідно розглядати проблеми переробки відходів, відновлювальних джерел енергії, збереження природного середовища. Оцінювання динамічних процесів відтворення родючості ґрунтів, у яких визначальну роль відіграє біорізноманіття й функціональна

активність ґрунтових мікроорганізмів, є важливим науково-методологічним завданням з огляду на циркуляційні процеси функціонування агроєкосистем. Саме мікробіологічна складова забезпечує замкненість біогеохімічних циклів, трансформацію органічних залишків і повернення поживних елементів у ґрунт, що відповідає базовим принципам циркуляційної економіки в аграрному виробництві [6]. Екологічна безпека сучасного інтенсивного тваринництва передбачає гармонійний розвиток системи «виробництво — довкілля — людина». Екологічний імператив має визначати наслідки стрімкого зростання виробництва продукції тваринництва, що передбачає усвідомлення об'єктивної необхідності враховувати закони природи, забезпечувати умови біологічного існування людини та виключати будь-яку можливість руйнування природних екосистем [7].

Особливості будови, властивості, поширення *Bacillus subtilis*. *B. subtilis* вперше була виявлена світловою мікроскопією німецьким вченим Крістіаном Готфрідом Еренбергом у 1835 році. *B. subtilis* тоді ще не мала сучасної назви, але дослідник описав її як «*Vibrio subtilis*» або подібну морфологічну форму. Видатний німецький мікробіолог і ботанік Фердинанд Кох у 1872 році формально класифікував та назвав *Bacillus subtilis* у межах свого нового бактеріального таксономічного підходу. Він визначив родову назву «*Bacillus*» і охарактеризував *B. subtilis* як частину цієї групи. Також він описав формування ендоспор у бактерії, що стало важливим відкриттям у мікробіології. Вона широко розповсюджена в різноманітних середовищах, таких як ґрунт, рослини й травні тракти тварин, і вже понад 150 років є об'єктом наукових досліджень [8]. Це каталазопозитивні мікроорганізми, клітини яких мають паличкоподібну форму. Довжина таких клітин зазвичай становить приблизно 4–10 мікрометрів (мкм), діаметр — від 0,25 до 1,00 мкм, об'єм клітини — $4,6 \cdot 10^{-15}$ л у стаціонарній фазі. Бактерії роду *Bacillus* мають товсту клітинну стінку, яка складається з потовщеного шару пептидоглікану, що дозволяє їм витримувати високий внутрішньоклітинний тиск. У них є багато перитрихально розташованих джгутиків, що дозволяє швидко рухатися в рідинах [9; 10]. Згідно із сучасною таксономією *B. subtilis* належить до роду *Bacillus*

класу *Firmicutes* і характеризується грампозитивною клітинною стінкою та здатністю до утворення ендоспор — дві характеристики, що дозволяють представникам цього виду добре адаптуватися до суворих умов навколишнього середовища, таких як екстремальні температури, обмежене живлення та висихання [11–13]. Поширеність *B. subtilis* в об'єктах довкілля сприяє різноманітним екологічним дослідженням, а тривале вивчення робить перспективним об'єктом у майбутньому. Важливість таких досліджень нещодавно значно зросла з розвитком «зеленої мікробіології», метою якої є використання мікроорганізмів для сталих практик. Офіційно термін «зелена мікробіологія» ввів німецький мікробіолог і еколог Кен Тімміс. Він опублікував концептуальну статтю в журналі *Environmental Microbiology*, де сформулював засади «зеленої мікробіології» як нової парадигми для майбутнього мікробіології, орієнтованої на захист планети [14]. Також цей напрям задекларований у діяльності The Green Microbiology Lab (University of Birmingham, Велика Британія), науковці якої вивчали екологічні аспекти застосування *B. subtilis* у сільському господарстві. Біорізноманіття ґрунтових мікроорганізмів відіграє ключову роль у забезпеченні замкненості біогеохімічних циклів та відтворенні родючості ґрунтів в агроєкосистемах. У цьому контексті особливе значення мають модельні мікроорганізми, що дають змогу досліджувати механізми взаємодії між екологічними процесами й функціонуванням агроєкосистем. Серед таких модельних об'єктів *Bacillus subtilis* широко використовується для вивчення екологічно зумовлених процесів, які визначають стабільність мікробних угруповань, трансформацію органічної речовини й розвиток регенеративного сільського господарства [14; 15]. Серед ґрунтових мікроорганізмів особливу увагу приділяють бактеріям роду *Bacillus*, які відіграють важливу роль у регуляції мікробіологічних процесів агроєкосистем. Зокрема, *Bacillus subtilis* широко використовується як модельний і функціонально значущий мікроорганізм для дослідження механізмів підвищення доступності поживних елементів у ґрунті. Функціональна активність *B. subtilis* сприяє мінералізації органічної речовини, мобілізації макро- і мікроелементів та оптимізації поживного режи-

му ґрунту, що забезпечує підвищення продуктивності агроєкосистем і їхньої екологічної стійкості відповідно до принципів сталого й регенеративного сільського господарства [16].

Генетична доступність *B. subtilis* — властивість цього мікроорганізму легко піддаватися генетичним маніпуляціям, тобто можливість просто й ефективно вносити зміни в його геном. *B. subtilis* має природну здатність захоплювати ДНК із зовнішнього середовища і вбудовувати її у власний геном за допомогою гомологічної рекомбінації. Геном *B. subtilis* повністю секвенований, а регуляторні шляхи добре вивчені, що робить експерименти передбачуваними. Генетична доступність є одним із головних критеріїв, за якими *B. subtilis* обрали як модельний організм у мікробіології та молекулярній біології. Секвенування геному *B. subtilis* було завершено в 1997 р. у підсумку міжнародного наукового проекту. До нього входили науковці з Франції, Німеччини, Великої Британії, Японії та Кореї, і це стало одним із перших повних геномів прокариотів, які були розшифровані [17; 18]. Накопичений масив генетичної інформації щодо *Bacillus subtilis* забезпечує можливість поглибленого дослідження молекулярних і регуляторних механізмів адаптації цього виду до різних екологічних ніш, зокрема до взаємодії з рослинами. Наявність розвинених генетичних та молекулярно-біологічних інструментів дає змогу цілеспрямовано модифікувати штами *B. subtilis*, що розширює можливості аналізу екологічних процесів та обґрунтованого сталого використання цього мікроорганізму в агроєкосистемах. Стало відомо багато генетичної інформації, що дозволяє проводити глибокі дослідження молекулярного складу й регуляторних механізмів у *B. subtilis*, а також інструменти маніпулювання, які підтримують її модифікацію, даючи більше можливостей для розуміння екологічних процесів і сталого застосування цього мікроорганізму [19].

Екологічна лабільність *Bacillus subtilis* зумовлена його метаболічною універсальністю та високою стійкістю до абіотичних і біотичних стресових чинників, що дає змогу досліджувати специфічні гени, метаболічні шляхи й регуляторні мережі цього виду для виявлення молекулярних механізмів, екологічних функцій і адаптаційних стратегій. Їхню екологічну лабільність можна пояснити

метаболічною універсальністю та стійкістю до стресу — характеристикам, які дозволяють дослідникам вивчати специфічні гени, шляхи й регуляторні мережі в *B. subtilis*, щоб виявити складні молекулярні механізми, екологічні функції та адаптації. Бактерія відрізняється своєю здатністю адаптуватися та функціонувати в різноманітних середовищах, використовуючи різні джерела вуглецю для отримання енергії та має важливу роль у таких екологічних процесах, як колообіг поживних речовин, біоремедіація, управління відходами й утилізація відходів [20; 21]. *B. subtilis* демонструє вражаючу резистентність, що робить цей мікроорганізм цінним модельним організмом для вивчення того, як мікроорганізми реагують на екологічні виклики (обмежене постачання поживних речовин, глобальне потепління, коливання температури, вплив ксенбіотиків, полютантів, токсичних речовин, токсична експозиція та токсичні сполуки) [22–25].

Антибіотичні властивості. У зв'язку з інтенсифікацією і розвитком новітніх зооветеринарних підходів у тваринництві можлива наявність у побічній продукції та екскрементах сільськогосподарських тварин і птиці хімічних забруднювачів: залишків антибіотиків, регуляторів росту та ін. Це пов'язано з проведенням ветеринарно-санітарних, профілактичних і лікувальних заходів за умов утримання великої кількості птиці, свиней і великої рогатої худоби [26]. Антибіотики застосовуються на великих тваринницьких комплексах, де через щільне утримання тварин і птахів існує підвищений ризик поширення інфекційних хвороб. Крім того, свині в інтенсивних закритих системах можуть отримувати антибіотики протягом усього життя. Поросятам часто дають антибіотики профілактично внаслідок розвитку діареї після відлучення. Органічні свинарські ферми відлучають поросят пізніше і використовують значно нижчий рівень антибіотиків. У молочному скотарстві антибіотики зазвичай використовуються для «сухої терапії корів», з метою запобігання появі маститу під час «сухого» періоду. Така терапія здійснюється для всіх корів як профілактичний засіб — навіть тоді, коли відсутні ознаки захворювання. У птахівництві антибіотики використовують для лікування й профілактики респіраторних захворювань та інших бактері-

альних інфекцій. За промислових технологій виробництва харчових яєць курам застосовують антибіотики тетрациклінового та фторхінолонового рядів. Про це свідчать залишковий вміст доксицикліну, енрофлоксацину, або їх суміші в посліді курей. Залишковий вміст зазначених речовин у посліді курей коливається в межах 11,22–318,82 мкг/кг і 35,55–317,16 мкг/кг відповідно [27].

Одним із значущих аспектів використання *B. subtilis* є її здатність до синтезу антибактеріальних речовин, які можуть пригнічувати ріст патогенних мікроорганізмів, зокрема тих, які здатні викликати захворювання у тварин. Використання *B. subtilis* сприяє підвищенню стійкості сільськогосподарської птиці до інфекцій. Це дозволяє зменшити застосування антибіотиків, що насамперед знижує витрати на ветеринарне обслуговування. Вартість лікування птиці через використання антибіотиків може становити від 40 грн на одну особину залежно від захворювання. За рахунок профілактичного застосування *B. subtilis* можна зменшити потребу в лікуванні до 40–60 %. Для господарства зі 100 тис. голів птиці економія коштів становить від 120 000 грн на рік. За рахунок зменшення використання антибіотиків і хімічних добавок у птахівництві знижується кількість шкідливих речовин, які потрапляють в навколишнє середовище. Наприклад, дезодорація пташників *B. subtilis* може знизити рівень патогенних бактерій у відходах, що сприятиме зменшенню забруднення ґрунтів і водних ресурсів антибіотиками й іншими токсичними речовинами [28; 29]. Наразі питання надмірного застосування антибіотиків і розвитку антибіотикорезистентності є надзвичайно актуальними та потребують розв'язання на міжнародному рівні [30].

Результати досліджень науковців Інституту сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН (ІСМАВ) підтверджують, що представники роду *Bacillus* завдяки швидкій колонізації субстрату та здатності до антагоністичної дії можуть ефективно пригнічувати розвиток патогенних мікроорганізмів. Подібні механізми властиві й *B. subtilis*, яка продукує широкий спектр біологічно активних речовин і створює конкурентні умови, що обмежують розмноження патогенів. Це є перспективним

об'єктом для розробки пробіотиків і впровадження екологічно безпечних технологій у тваринництві [31].

Механізм антагоністичної дії. У цьому аспекті антагоністичні дії *Bacillus* spp. часто пов'язані із синтезом вторинних сполук, що мають антибіотичні властивості. Ці молекули зазвичай складаються з пептидів із низькою молекулярною масою, які виробляються або рибосомально (у випадку бактеріоцинів), або нерибосомально (ліпопептиди, пептиди та полікетиди). *Bacillus* spp. є однією з найбільш досліджуваних продуцентів антибіотичних сполук через виробництво циклічних ліпопептидів, які мають різні результати в боротьбі з різними захворюваннями [32]. Ліпопептидні сполуки мають унікальні властивості, які роблять їх важливими в біології, медицині й екології. Синтезуються вони за допомогою великих нерибосомальних пептидних синтетаз [33]. Основні механізми їхньої дії зазвичай передбачають взаємодію з клітинною мембраною патогенних організмів, що спричиняє зміни в її структурі та проникності через руйнування, розчинення або утворення іонних каналів [34].

Використання у компостуванні побічної продукції тваринництва. Дослідження, проведені в Інституті сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва Національної академії аграрних наук України (ІСМАВ НААН), підтвердили, що фізіологічні, біохімічні функції та екологічна лабільність представників роду *Bacillus* зумовлюють домінування на всіх етапах компостування органічної речовини. Це підтверджує значну роль бактерій роду *Bacillus* у процесах трансформації органічних залишків і відтворення поживного режиму ґрунту, що має практичне значення для оптимізації біокомпостування й підвищення ефективності регенеративних агроecosystem [35]. Внесення до компосту асоціації *B. subtilis*, *B. stearothermophilus*, *Candida utilis*, іммобілізованих на біовугіллі з кукурудзяних стебел, сприяє прискоренню процесів мінералізації органічної речовини, підвищенню температури компостної маси та покращенню якості кінцевого добрива завдяки активізації мікробіологічної деструкції складних сполук. Після збагачення компостної суміші корисними мікроорганізмами спостерігається зменшення

викидів NH_3 . Такий підхід, запропонований колективом авторів з Південно-Китайського сільськогосподарського університету (Гуанчжоу, Китай) та Відділом досліджень поведінки тварин (Західний Лафайет, США), має практичне впровадження завдяки іммобілізації мікробних агентів на спеціальному матеріалі-носії. У цьому випадку бактерії стають захищеними, адже уникають прямого контакту з екстремальним середовищем [36; 37]. Індійськими вченими (Department of Biotechnology, Bharathidasan University) розроблено ефективний процес компостування побічної продукції птахівництва за допомогою консорціуму трьох видів бактерій роду *Bacillus* (*B. flexus*, *B. cereus* та *B. subtilis*). Процес компостування скорочується до 30 днів. Результати випробування такого компосту підтвердили підвищення врожайності бобових та олійних культур, як порівняти з використанням хімічних добрив [38].

Угорськими дослідниками з Department of Food Science, Faculty of Agricultural and Food Sciences (Університет Sz'echenyi Istvan) відібрано три ефективні види *Bacillus* із 55 ізолятів з пташиного посліду. Один із цих штамів використано для розробки швидкого та ефективного процесу компостування. У сукупності консорціум має здатність до гідролізу целюлози, кератинолізу, окислення аміаку, нітритів і розчинення сполук фосфору при компостуванні посліду разом із добавками, що мають широке співвідношення C/N. Було перевірено ефективність компостування з рисовим лушпинням або тирсою при застосуванні консорціуму. Біохімічні й мікробіологічні аналізи показали, що ефективність компосту з тирсою та консорціумом була кращою від варіантів із рисовим лушпинням, що забезпечило скорочення циклу компостування до 30 діб [38; 39].

Використання як пробіотиків. Термін «пробіотики» (від грецького «pro bios» — «для життя»), «які нормалізують життя») вперше було вжито Ф. Верджіо в 1954 р. Він назвав пробіотиками речовини, які продукуються мікроорганізмами й прискорюють ріст інших мікроорганізмів. Згодом, у 1965 році, Деніел М. Ліллі і Розалі Г. Стілвелл уточнили визначення пробіотиків як «речовини, що стимулюють ріст інших мікроорганізмів» (на противагу антибіотикам — речовинам, що пригнічують ріст бактерій). Надалі цим

терміном стали називати й самі корисні бактерії. Так, у 1977 р. Л. Річард і Р. Паркер поняття «пробіотик» використовували для позначення живих мікроорганізмів і продуктів їхньої ферментації, що володіють антагоністичною активністю щодо патогенної мікробіоти. Поняття «пробіотик» вживається як антонім антибіотиків, тобто «промотор життя». За визначенням С. Фокс у 1988 р. пробіотики — це мікробіологічні харчові добавки, які позитивно впливають на господаря шляхом поліпшення мікробіологічного балансу його кишковика.

У 1989 р. британський вчений Р. Фуллер запропонував розуміти цей термін таким чином: «Пробіотики — це живі мікроорганізми, які при введенні в адекватних кількостях сприятливо впливають на здоров'я господаря, це жива мікробна кормова добавка, яка надає корисну дію на тварину-господаря шляхом поліпшення його кишкового мікробного балансу» [40–42].

За визначенням Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), пробіотики — це живі непатогенні та нетоксичні для людини мікроорганізми, які у відповідній кількості корисні для здоров'я людини, здатні відновлювати нормальну мікробіоту організму та негативно впливати на патогенні та умовно-патогенні бактерії [43]. У 2002 р. FAO надало пробіотикам статус GRAS (Generally Regarded As Safe) — цілком безпечних мікроорганізмів.

Зважаючи на те, що бактерії з роду *Bacillus* є одними з найрозповсюдженіших мікроорганізмів у природі (беруть участь у ґрунтоутворенні, часто персистують у повітрі й воді), вони постійно потрапляють у шлунково-кишковий тракт (ШКТ) та дихальні шляхи здорових людей через їжу, воду й повітря. У науковій літературі згадуються випадки виділення *B. subtilis* з ШКТ здорових дорослих і дітей. Кількість цих мікроорганізмів у ШКТ може сягати 10^7 КУО на 1 грам, що порівнюється з кількістю лактобактерій. Тому дослідники стверджують, що бактерії роду *Bacillus* є одними з домінуючих компонентів кишкової мікробіоти [44]. *B. subtilis*, *B. cereus* і *B. licheniformis* — це сапрофітні споруутворювальні бактерії, які на сьогодні вважаються найкращими кандидатами для створення 17 пробіотиків [45]. Пробіотики із сапрофітних бацил є недооці-

неними через те, що більшість із них створено на основі бактерій родів *Lactobacterium*, *Bifidobacterium*, але споруутворювальні бацили як пробіотики мають низку переваг. Науковцями інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України (ІМВ) наведено характеристику аеробних споруутворювальних бактерій роду *Bacillus* як продуцентів широкого спектру біологічно активних речовин, розглянуто принципи відбору штамів, перспективних для створення пробіотиків, проведено аналіз даних щодо біосинтетичної активності бацил, яка зумовлює їхню пробіотичну дію [46]. Для цих бактерій притаманна висока кислотостійкість і стабільність під час термічної обробки та зберігання за низьких температур. Також доведено, що вони володіють антиоксидантними, антимікробними й імуномодулювальними властивостями.

Необхідність розв'язання проблем виробництва якісної продовольчої продукції для населення відкриває значні перспективи у використанні пробіотиків у тваринництві [47]. Інтенсивна технологія утримання сільськогосподарських тварин, обмеження контактів тварин із ґрунтом, рослинами й іншими природними чинниками, нераціональне застосування антимікробних засобів (особливо антибіотиків) спричиняють порушення мікробних екосистем травного тракту і виникнення дисбактеріозів. Зі свого боку це зумовлює порушення процесів травлення, обміну речовин, зниження резистентності та продуктивності тварин, розвитку шлунково-кишкових хвороб, особливо у молодняку. Взаємодія комплексу стрес-факторів у молодняку всіх видів тварин призводить до виникнення сальмонельозів, колібактеріозів, клостридіозів, інших кишкових інфекцій, оскільки після згасання материнського імунітету стабільність набутого залежить виключно від складу нормальної мікробіоти кишковика.

Перспективність застосування пробіотичних препаратів у тваринницькій галузі не викликає сумніву. Останні десятиліття для профілактики й лікування захворювань шлунково-кишкового тракту широко застосовують препарати-пробіотики на основі живих мікробних культур споруутворювальних бактерій. Крім того, на відміну від методів лікування й профілактики інфекційних хвороб, що базуються на використанні антибіотиків,

застосування пробіотиків сприяє відновленню нормоценозу й одержанню екологічно безпечної продукції тваринництва.

Застосування пробіотиків у годівлі й ветеринарії дозволяє підвищити економічну ефективність роботи тваринницьких підприємств, помітно поліпшити епізоотичну та екологічну обстановку в районах виробництва тваринницької продукції, отримати високоякісну продукцію, вільну від сальмонельозу, антибіотиків, хіміотерапевтичних препаратів, слідів дезінфектантів для системи здорового харчування населення [48].

Необхідність розв'язання проблем виробництва якісної продовольчої продукції для населення відкриває значні перспективи у використанні пробіотиків у тваринництві [47].

За класифікацією пробіотиків (за їхнім складом) препарати на основі спорових бацил належать до таких, що самоелімінуються з організму. В ІМВ та ІСМАВ розроблено низку пробіотичних препаратів, безпека, висока ферментативна й антагоністична активність яких підтверджені під час виробничих випробувань [49; 50]. Найбільша ефективність пробіотиків на основі культур спороутворювальних бактерій відзначається при профілактиці інфекційних захворювань шлунково-кишкового тракту, особливо молодняку сільськогосподарських тварин. При потрапленні у складі препарату бацили залишаються життєздатними у шлунково-кишковому тракті тварин, де пригнічують та знищують шкідливі мікроорганізми, сприяючи зростанню кількості корисних бактерій, таких як молочнокислі, відновленню та підтриманню здорового балансу кишкової мікробіоти [51]. Дослідниками також було доведено протимікробну дію різних штамів сінної палички щодо патогенних для тварин мікроорганізмів (*Salmonella*, *Shigella* та *Staphylococcus* [52; 53] і фітопатогенних грибів [54] і стимулювальний вплив метаболітів і компонентів мікробних клітин *Bacillus subtilis* на антагоністичну активність молочнокислих бактерій [55]. Важливо, що при використанні пробіотичних препаратів збільшується приріст живої маси й збереженість молодняку, знижуються витрати корму, підвищується продуктивність тварин і птиці. Ефективність впливу пробіотиків на процеси травлення зумовлена високою ферментативною активністю, здатністю доповнювати раціон неза-

мінними амінокислотами, вітамінами, які в процесі травлення за участі бактерій синтезуються *de novo*.

Відомий в Україні препарат БПС-44 на основі штаму *Bacillus subtilis* 44-р активізує процеси травлення: у рубці телят дослідних груп зростає чисельності амілолітичних, целюлозолітичних і молочнокислих бактерій. До того ж зафіксовано зростання середньодобових приростів живої маси тварин проти контролю на 13–33,2 % залежно від віку й раціону [56].

Варто зазначити, що існує взаємозв'язок між імунітетом і мікроценозом макроорганізму, оскільки нормальна мікробіота бере участь у формуванні захисних функцій господаря, тому корекція патологічних станів імунної системи можлива за їхньої участі [57]. Доведено, що застосування пробіотичних препаратів на основі спороутворювальних бактерій сприяє ефективному функціонуванню антиоксидантної системи, підвищенню фагоцитарної активності крові молодняку великої рогатої худоби, свиней [58; 59]. Дослідження останніх років свідчать, що в умовах промислової технології свинарства найбільш перспективні пробіотичні препарати — створені на основі спороутворювальних мікроорганізмів, які стійкі до впливу високої температури та вологості й не втрачають життєздатності в процесі приготування кормів.

В умовах експериментального гіпотиреозу встановлено зміни у кишковій мікробіоті кролів: зниження кількості анаеробної мікрофлори та підвищення умовно-патогенних мікроорганізмів. Введення пробіотика на фоні гіпотиреоїдного стану забезпечувало корекцію у складі кишкового мікроценозу [60].

Зважаючи на те, що ефект досягається від застосування незначних доз препаратів, а їх собівартість невисока, використання пробіотиків є рентабельним для виробників. Перспективним вбачається застосування пробіотиків і в кормовиробництві. Їх використовують для кращого зберігання сіна за умови високої вологості та для силосування кормів. При силосуванні пробіотики мають значні переваги над хімічними консервантами. Застосуванням останніх пригнічується нормальна мікробіота, а передозування може призвести до отруєння тварин. Використання пробіотичних препаратів для силосування

сприяє збереженню і покращенню якості кормів: підвищується вміст молочної та оцтової кислот, амілаз, редуруючих цукрів, вітамінів, пригнічується розвиток гнилісних і маслянокислих бактерій. Водночас силос набуває виразних пробіотичних властивостей: його згодовування сприяє народженню здорового приплоду, зниженню захворюваності молодняку шлунково-кишковими хворобами й підвищенню продуктивності тварин. Співробітниками ІСМАВ проведено виділення, вивчення властивостей та ідентифікація штамів пробіотичних мікроорганізмів виду *B. subtilis*. На основі селекціонованих штамів розроблено силосні добавки для консервування зелених кормів, що мають здатність до пригнічення патогенів, та ферментації кормів [61; 62].

Отримані результати підтверджують дані попередніх досліджень, у яких показано здатність представників роду *Bacillus* швидко колонізувати субстрат і проявляти антагоністичну активність щодо широкого спектра патогенних мікроорганізмів [63–65]. Подібні властивості характерні й для *B. subtilis*, який синтезує широкий набір біологічно активних метаболітів, зокрема ліпопептиди (ітурини, сурфактини, фенгіцини), що створюють конкурентні умови й обмежують розвиток патогенної мікрофлори [66]. Якщо в рослинництві ці механізми реалізуються у захисті ризосфери від фітопатогенів [67], то в тваринництві *B. subtilis* розглядається як ефективний пробіотик, здатний стабілізувати кишкову мікробіоту, підвищувати неспецифічний імунітет, знижувати наслідки теплового стресу й бути альтернативою традиційним антимікробним засобам [68–70]. Отже, перспективи використання *B. subtilis* у тваринництві безпосередньо пов'язані з упровадженням екологічно безпечних технологій, що узгоджується із сучасними тенденціями зменшення залежності від антибіотиків.

Варто зазначити, що представники окремих видів *Bacillus* є одними з найбільш досліджуваних агентів біологічного контролю. Вони можуть інгібувати ріст патогенів через різні механізми, зокрема конкуренцію за поживні речовини та місце, виробництво антибіотиків, гідролітичних ферментів, сидерофорів або індукцію системної стійкості [71]. У біологічному контролі визначається також пріоритетність *B. subtilis*. Найпоширеніший

підхід до біологічного контролю — це вибір антагоністичних мікроорганізмів, оцінка їхніх механізмів дії та розробка біопрепаратів. У цьому аспекті їх використовують як корисні організми для зменшення негативного впливу патогенів і стимулювання позитивних реакцій [72]. Крім того, *B. subtilis* можна модифікувати для виробництва ферментів, біопалива чи інших цінних сполук, зменшуючи залежність від невідновлюваних матеріалів та неекологічних джерел енергії [73]. Водночас широке використання цього модельного організму в сучасних дослідженнях потребує дотримання біоетичних принципів.

Висновки. Проведений критичний аналіз наукових джерел дає підстави стверджувати, що *B. subtilis* є перспективним об'єктом не лише мікробіологічних, а й екологічних досліджень. Завдяки здатності до швидкої колонізації субстрату, антагоністичній активності проти широкого спектра патогенних мікроорганізмів і синтезу біологічно активних метаболітів, ці спорові бактерії розглядаються як універсальний інструмент для вивчення біологічних процесів і розробки практичних рішень у сфері сталого розвитку. Особливої уваги заслуговує застосування пробіотиків на основі *B. subtilis* у тваринництві, де вони здатні стабілізувати кишкову мікробіоту, підвищувати імунітет, зменшувати негативний вплив стресових факторів і бути екологічно безпечною альтернативою традиційним антимікробним препаратам. Це не лише сприяє покращенню здоров'я і продуктивності тварин, а й знижує ризики розвитку антибіотикорезистентності, що є однією з ключових проблем сучасної ветеринарії та медицини. Пробиотики на основі *B. subtilis* можуть стати важливою складовою частиною стратегії сталого розвитку в тваринництві, оскільки вони сприяють покращенню здоров'я тварин без шкоди для навколишнього середовища. Отже, використання *B. subtilis* можна розглядати як перспективний напрям формування нових біотехнологічних підходів у тваринництві, які поєднують підвищення ефективності виробництва з мінімізацією екологічних ризиків. У довгостроковій перспективі такі біопрепарати здатні стати важливою складовою інтегрованих стратегій сталого розвитку аграрного сектору, забезпечуючи баланс між продуктивністю, безпекою харчових продуктів й охороною довкілля.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Волкогон В. В., Надкернична О. В., Токмакова Л. М., Мельничук Т. М., Чайковська Л. О. Експериментальна ґрунтова мікробіологія: підручник. Київ : Аграрна наука, 2010. 464 с.
2. Патица В. П., Омелянець Т. Г., Гриник І. В., Петриченко В. Ф. Екологія мікроорганізмів: посібник. Київ : Основа, 2007. 192 с.
3. Park S. O. Application strategy for sustainable livestock production with farm animal algorithms in response to climate change up to 2050: a review. *Czech Journal of Animal Science*. 2022. Vol. 67. P. 425–441. <https://doi.org/10.17221/172/2022-CJAS>
4. Kogut I., Ryabukha G., Vilar A. P., Pereló V. C. Regenerative economy: principles and practice of implementation. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2023. № 2(34). P. 65–76. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-2\(34\)-65-76](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-2(34)-65-76)
5. Конституція України: Закон України від 28 червня 1996 р. № 254к/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-вр> (дата звернення: 21.03.2025).
6. Москаленко А. М., Колоша В. П. Парадигма циркуляційної економіки в сучасних дослідженнях. *Агроекологічний журнал*. 2025. № 3. С. 91–99. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333826>
7. Пінчук О. В., Тертична О. В., Бородай В. П. Перспективні напрями екологічних досліджень у галузі тваринництва. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 2. С. 44–48. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220105>
8. Errington J., Wu L. J. Cell cycle machinery in *Bacillus subtilis*. *Subcellular Biochemistry*. 2017. Vol. 84. P. 67–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53047-5_3
9. Смирнов В. В., Резник С. Р., Василевская И. А. *Спорообразующие аэробные бактерии — продуценты биологически активных веществ*. Киев : Наукова думка, 1982. 280 с.
10. Weng Y., Yao J., Sparks S., Wang K. Natokinase: an oral antithrombotic agent for the prevention of cardiovascular disease. *International Journal of Molecular Sciences*. 2017. Vol. 18. 523. <https://doi.org/10.3390/ijms18030523>
11. Vijay R., Tarika K. Microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) using kitchen waste as an inexpensive carbon source. *Bioscience Biotechnology Research Asia*. 2019. Vol. 16. P. 155–166. <https://doi.org/10.13005/bbra/2733>
12. Belda E., Sekowska A., Le Fèvre F., Morgat A., Mornico D., Ouzounis C. ... Danchin A. An updated metabolic view of the *Bacillus subtilis* 168 genome. *Microbiology*. 2013. Vol. 159. P. 757–770. <https://doi.org/10.1099/mic.0.064691-0>
13. Etesami H., Jeong B. R., Glick B. R. Potential use of *Bacillus* spp. as an effective biostimulant against abiotic stresses in crops — a review. *Current Research in Biotechnology*. 2023. Vol. 5. 1001285. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100128>
14. Timmis K., Stahl D. The birth of Environmental Microbiology. *Environmental Microbiology*. 1999. Vol. 1, № 1. P. 1–2. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.1999.00020>
15. Akinsemolu A. A., Onyeaka H., Odion S., Adebajo I. Exploring *Bacillus subtilis*: ecology, biotechnological applications, and future prospects. *Journal of Basic Microbiology*. 2024. Vol. 64. 2300614. <https://doi.org/10.1002/jobm.202300614>
16. Basit A., Bashir M. A., Hassan F. U., Khan K. A., Kainat M., Ullah M. A. *Bacillus subtilis* impacts nutrient availability to enhance agricultural and environmental sustainability. *Journal of Agriculture and Livestock Farming*. 2024. Vol. 1, № 2. <https://doi.org/10.61577/jalf.2024.100008>
17. Kunst F., Ogasawara N., Moszer I., Albertini A. M., Alloni G., Azevedo V. ... Danchin A. The complete genome sequence of the Gram-positive bacterium *Bacillus subtilis*. *Nature*. 1997. Vol. 390. P. 249–256. <https://doi.org/10.1038/36786>
18. Song Y., He S., Jopkiewicz A., Setroikromo R., van Merkerk R., Quax W. J. Development and application of CRISPR-based genetic tools in *Bacillus* species and *Bacillus* phages. *Journal of Applied Microbiology*. 2022. Vol. 133. P. 2280–2298. <https://doi.org/10.1111/jam.15704>
19. Hu G., Wang Y., Blake C., Nordgaard M., Liu X., Wang B., Kovács Á. Parallel genetic adaptation of *Bacillus subtilis* to different plant species. *Microbial Genomics*. 2023. Vol. 9, № 7. 001064. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.001065>
20. Miljaković D., Marinković J., Balešević-Tubić S. The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8. 1037. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>
21. Nordgaard M., Blake C., Maróti G., Hu G., Wang Y., Strube M. L., Kovács Á. Experimental evolution of *Bacillus subtilis* on *Arabidopsis thaliana* roots reveals fast adaptation and improved root colonization. *Science*. 2022. Vol. 25. 104406. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104406>
22. Martins S. J., Medeiros F. H. V., Lakshmanan V., Bais H. P. Impact of seed exudates on growth and biofilm formation of *Bacillus amyloliquefaciens* ALB629 in common bean. *Frontiers in Microbiology*. 2018. Vol. 8. 2631. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02631>
23. Morrison M. D., Fajardo-Cavazos P., Nicholson W. L. Comparison of *Bacillus subtilis* transcriptome profiles from two separate missions to the International Space Station. *NPJ Microgravity*. 2019. Vol. 5. 111. <https://doi.org/10.1038/s41526-018-0061-0>
24. Su Y., Liu C., Fang H., Zhang D. *Bacillus subtilis*: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial Cell*

- Factories*. 2020. Vol. 19. 173. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01436-8>
25. Mahapatra S., Yadav R., Ramakrishna W. Bacillus subtilis impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. *Journal of Applied Microbiology*. 2022. Vol. 132, № 5. С. 3543–3562. <https://doi.org/10.1111/jam.15480>
26. Закон України «Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною». *Відомості Верховної Ради України*. 2015. № 24. С. 171
27. Доброжан Ю. В., Шевченко Л. В. Вміст антибіотиків у посліді курей промислового стада за інтенсивної технології виробництва продукції птахівництва. *Ветеринарна біотехнологія*. 2018. Т. 32, № 2. С. 122–129. [https://doi.org/10.31073/vet_biotech32\(2\)-14](https://doi.org/10.31073/vet_biotech32(2)-14)
28. Zhang X., Li J., Shao L., Huan H., Qin F., Zhai P. ... Pan X. Effects of manure removal frequencies and deodorants on ammonia and GHG concentrations in livestock house atmosphere. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, № 7. 1033. <https://doi.org/10.3390/atmos13071033>
29. Hidayat C., Purwanti S., Komarudin S., Rahman M. Reducing air pollution from broiler farms. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 788. 012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012150>
30. Symochko L., Mariyuchuk R., Demyanyuk O., Symochko V. Antibiotics in agroecosystems: soil microbiome and resistome. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 4. Р. 85–92. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2019.189463>
31. Шевченко Л. А., Сасіна Т. С. Антагоністична активність бактерій роду Bacillus, виділених із поверхні гранул мінеральних добрив. *Збалансоване природокористування*. 2025. № 1. С. 118–123. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.324367>
32. Stülke J., Gruppen A., Bramkamp M., Pelzer S. Bacillus subtilis, a Swiss army knife in science and biotechnology. *Journal of Bacteriology*. 2023. Vol. 205. <https://doi.org/10.1128/jb.00102-23>
33. Kobayashi K. Diverse LXG toxin and anti-toxin systems specifically mediate intraspecies competition in Bacillus subtilis biofilms. *PLoS Genetics*. 2021. Vol. 17. e1009682. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009682>
34. Gaballa A., Antelmann H., Aguilar C., Khakh S. K., Song K. B., Smaldone G. T., Helmann J. D. The Bacillus subtilis iron-sparing response is mediated by a Fur-regulated small RNA and three small, basic proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2008. Vol. 105. Р. 11927–11932. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711752105>
35. Шевченко Л. А., Рябуха Г. І. Біокомпостування курячого посліду за участі інтродукованих мікроорганізмів. *Сільськогосподарська мікробіологія*. 2023. Вип. 37. С. 3–22. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.37.3-22>
36. Zhang H., Marchant-Forde J. N., Zhang X., Wang Y. Effect of cornstalk biochar immobilized bacteria on ammonia reduction in laying hen manure composting. *Molecules*. 2020. Vol. 25. 1560. <https://doi.org/10.3390/molecules25071560>
37. Li J., Wang X., Cong C., Wan L., Xu Y., Li X., Wang L. Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting. *3 Biotech*. 2020. Vol. 10. 128. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2127-4>
38. Selvamani K., Annadurai V., Soundarapandian S. Improved co-composting of poultry manure with complementary consortium of indigenous Bacillus spp. *3 Biotech*. 2019. Vol. 9. 215. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1745-1>
39. Greff B., Szigeti J., Nagy Á., Lakatos E., Varga L. Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: A review. *J Environ Manage*. 2022. Vol. 302 (Pt B). 114088. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114088>
40. Fox S. M. Probiotics: Intestinal inoculants for production animals. *Veter Med (Edwardsville)*. 1988. Vol. 83, № 8. Р. 806–810.
41. Lilly D. M., Stilwell R. H. Probiotics: growth promoting factors produced by microorganisms. *Science*. 1965. Vol. 147. Р. 747–748. <https://doi.org/10.1126/science.147.3659.747>
42. Collins M. D., Gibson G. R. Probiotics, prebiotics, and synbiotics: approaches for modulating the microbial ecology of the gut. *Clin Nutr*. 1999. Vol. 69, № 5. Р. 1052–1057. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.5.1052s>
43. WHO. Publications. URL: <https://www.who.int/ukraine/uk/publications/97892415168227> (дата звернення: 11.11.2025).
44. Elshaghabe F., Rokana N., Gulhane R., Sharma C., Panwar H. Bacillus As Potential Probiotics: Status, Concerns, and Future Perspectives. *Front Microbiol*. 2017. Vol. 8. Р. 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01490>
45. Тесля А., Охмат О. Пробиотичний потенціал бактерій роду Bacillus. *Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації*. 2023. № 97. С. 21–23.
46. Сафронова Л. А., Ляш В. М. Біосинтектична активність бацил, що обумовлює пробиотичний ефект. *Мікробіологічний журнал*. 2017. Т. 79, № 6. С. 120–136. <https://doi.org/10.15407/microbiolj79.06.120>
47. Park S. O. Impact of the Combination of Probiotics and Digital Poultry System on Behavior, Welfare Parameters, and Growth Performance in Broiler Chicken. *Microorganisms*. 2023. Vol. 11, № 9. 2345. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092345>

48. Yaqoob M. U., Wang G., Wang M. An updated review on probiotics as an alternative of antibiotics in poultry. *Anim Biosci.* 2022. Vol. 35. P. 1109–1125. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0485>
49. Смольський О. С., Смольська Т. М., Агеєв В. О., Дерев'яно С. В., Божок Л. В. Стан антиоксидантної системи організму коропа за дії пробіотики БПС-44. *Науковий вісник Львівської національної академії ветеринарної медицини імені С. З. Гжицького.* 2004. Т. 6, № 3 (Ч. 3). С. 196–203.
50. Смірнов В. В., Патица В. П., Підгорський В. С., Іутинська Г. О., Антипчук А. Ф. Мікробні біотехнології в сільському господарстві. *Агроекологічний журнал.* 2002. № 3. С. 3–85.
51. Loi P., Iuso D., Czernik M., Zacchini F., Ptak G. Towards storage of cells and gametes in dry form. *Trends Biotechnol.* 2013. Vol. 31, № 12. P. 688–695. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.09.004>
52. Moore T., Globa L., Barbaree J., Vodyanov V., Sorokulova I. Antagonistic Activity of Bacillus Bacteria against Food-Borne Pathogens. *Probiotics Health.* 2013. Vol. 1. 110. <https://doi.org/10.4172/2329-8901.1000110>
53. Das B., Neha Nidhi R., Roy P., Muduli A. K., Swain P., Mishra S. S., Jayasankar P. Antagonistic activity of cellular components of Bacillus subtilis AN11 against bacterial pathogens. *Int J Curr Microbiol Appl Sci.* 2014. Vol. 3, № 5. P. 795–809.
54. Afrin S., Bhuiyan M. N. I. Antagonistic activity of Bacillus amyloliquefaciens subsp. amyloliquefaciens against multidrug resistant Serratia rubidaea. *Curr Res Microbial Sci.* 2023. Vol. 5. 100206. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2023.100206>
55. Kravchenko N. O. Microbial regulation of the antagonistic activity of lactic acid bacteria strains under the influence of transient bacilli of the Bacillus genus. *Agricultural Science and Practice.* 2015. Vol. 2, № 2. P. 45–49. <https://doi.org/10.15407/agrisp2.02.045>
56. Янович В. Г. Симбіоз жуйних із мікроорганізмами передшлунків. *Вісник аграрної науки.* 2002. № 7. С. 41–44.
57. Федоровская Е. А., Немировская Л. Н. Взаимосвязь микробных экосистем и иммунитета человека. *Мікробіологічний журнал.* 1999. Т. 61, № 5. С. 85–96.
58. Агеєв В. О., Дерев'яно С. В., Божок Л. В., Прокопенко О. І. Антиоксидантний та імунний статус молодняку ВРХ за дії пробіотичних препаратів БПС-44 та БПС-Л. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького.* 2008. Т. 10, № 3 (Ч. 1). С. 10–17.
59. Агеєв В. О., Дерев'яно С. В., Дяченко Г. М., Божок Л. В., Прокопенко О. І. Стан антиоксидантної та імунної систем молодняку свиней за дії пробіотичних препаратів. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького.* 2009. Т. 11, № 2 (Ч. 1). С. 3–8.
60. Кривцова М. В., Ніколайчук В. І. Вплив пробіотику із бактерій роду Bacillus на показники мікрофлори кишечника лабораторних тварин за умов експериментального гіпотиреозу. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія.* 2007. № 20. С. 239–242.
61. Спосіб консервування плющеного вологого зерна кукурудзи: пат. 148107 Україна. МПК А23К30/10, А23К30/15, С12Н1/20, С12R1/125, С12R1/25, Н. О. Кравченко, О. М. Дмитрук, М. Г. Передерій; заявник і патентовласник: Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. № u202007017; заявл. 02.11.2020; опубл. 07.07.2021, бюл. № 27.
62. Спосіб консервування сінажу з люцерни: пат. 157322 Україна. МПК А23К30/15, С12Н1/20, С12Н1/25, С12R1/125, Н. О. Кравченко, О. М. Дмитрук, Н. М. Фурс; заявник і патентовласник: Інститут сільськогосподарської мікробіології та агропромислового виробництва НААН. № u2024 00324; заявл. 19.01.2024; опубл. 02.10.2024, бюл. 40.
63. Sharma S., Singh P., Sharma R., Chhabra S., Sharma J. G., Chaudhary R., Singh N. Molecular characterization and antifungal activity of lipopeptides produced from Bacillus subtilis against plant fungal pathogen Alternaria alternata. *BMC Microbiol.* 2023. Vol. 23. 226. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02922-w>
64. Zhang X., Xu S., Liu Z., Yang W., Yan M., Yang Y. Antagonistic Activity and Potential Mechanisms of Endophytic Bacillus subtilis YL13 in Biocontrol of Camellia oleifera Anthracnose. *Forests.* 2023. Vol. 14, № 5. 886. <https://doi.org/10.3390/f14050886>
65. Gurung N., Ray S., Bose S., Rai V. Antagonistic and plant-growth promoting novel Bacillus species from long-term organic farming soils from Sikkim, India. *BMC Microbiology.* 2019. Vol. 19. 71. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1448-3>
66. Caulier S., Nannan C., Gillis A., Krawczyk B., Raaijmakers J. M., de Rode X., Bragard C. Bioactive Secondary Metabolites from Bacillus subtilis: A Comprehensive Review. *Journal of Natural Products.* 2019. Vol. 82, № 7. P. 2038–2053. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00110>
67. Pan S., Wu H., Huang J., Xu R., Wang Y. Lipopeptide Biosurfactants from Bacillus spp.: Types, Production, Biological Activities, and Applications in Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.* 2022. Vol. 21, № 5. P. 4750–4780. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12986>
68. Wu Y., Wang W., Zhu S., Zhang S., Liu C., Chen B. ... Xu J. Dietary probiotic based on a dual-strain Bacillus subtilis improves immunity, intestinal health, and growth performance of broiler chickens.

Poultry Science. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103690>

69. Xu C., Wang J., Li H., Liu W., Xu P., Yin W. ... Wang D. Effect of supplementing a *Bacillus subtilis*-based probiotic on performance, intestinal integrity, and serum antioxidant capacity in pigs under heat stress. *Journal of Animal Science*. 2024. <https://doi.org/10.1093/jas/skae011>

70. Mikkelsen L., Nielsen M., Pedersen A., Rung M., Sørensen T., Canibe N. The Effect of a *Bacillus*-Based Probiotic on Sow and Piglet Performance in Two Production Cycles. *Animals*. 2023. Vol. 13, № 20. 3163. <https://doi.org/10.3390/ani13203163>

71. Beneduzi A., Ambrosini A., Passaglia L. M. P. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genet Mol Biol*. 2012. Vol. 35. P. 1044–1051. <https://doi.org/10.1590/s1415-47572012000600020>

72. Alabouvette C., Olivain C., Steinberg C. Biological control of plant diseases: the European situation. *Eur J Plant Pathol*. 2006. Vol. 114. P. 329–341.

73. Karlapudi A. P., Venkateswarulu T. C., Tammineedi J., Kanumuri L., Ravuru B. K., Dirisala V., Talluri V. S. R. Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution — a review. *Petroleum*. 2018. Vol. 4. 241. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.03.007>

Отримано: 12.08.2025

Прийнято до друку: 29.09.2025

Опубліковано онлайн: 29.12.2025

<https://doi.org/10.35868/1997-3004.42.94-109>

UDC 579:636

PROSPECTS FOR THE USE OF *BACILLUS SUBTILIS* IN ENVIRONMENTALLY SAFE LIVESTOCK FARMING (a review)

O. V. Tertychna^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0003-1000-7946>,

N. O. Kravchenko¹, <https://orcid.org/0000-0003-1000-6947>,

O. V. Krapyvnyi¹, <https://orcid.org/0009-0000-7227-0665>,

M. V. Yakymovych², <https://orcid.org/0009-0000-0632-4995>

¹Institute of Agricultural Microbiology and Agroindustrial Manufacture, NAAS, Chernihiv

²Institute of Agroecology and Environmental Management, NAAS, Kyiv

e-mail: olyater@ukr.net

Objective. To provide an analytical review of scientific literature on the properties and prospects of using *Bacillus subtilis* in environmentally safe livestock farming. **Methods.** To investigate and study the stated problem, the following methodological approaches were applied: comparative analysis, empirical, functional and systemic approaches, which allow a comprehensive examination of the key aspects of the subject. General scientific research methods were used, including information-bibliographic, analytical, and result generalization methods. **Results.** The analytical review highlights the genetic, physiological, and biochemical characteristics of *B. subtilis*. Its broad application covers various fields: veterinary medicine, feed production, biotechnology, agriculture (livestock and crop production), medicine, and ecology. The practical implementation potential has been analyzed, and future prospects for environmentally safe livestock farming and environmental bioremediation have been proposed. **Conclusions.** The review summarizes the features of *B. subtilis* (genetic accessibility, metabolic versatility, and stress resistance) and analyzes its applications in “green microbiology.” Special emphasis is placed on sustainable bioproduction, feed production, and ecological bioremediation of the environment. A compelling argument in favor of introducing the conceptual foundations of “green microbiology” is the ability of *B. subtilis* to produce enzymes,

antibacterial substances, and other beneficial compounds, serving as an alternative to traditional production approaches. The use of *B. subtilis* contributes to obtaining environmentally safe livestock products.

Key words: *spore-forming bacteria, livestock farming, environmental safety, sustainable development, “green microbiology”, probiotics, antagonistic activity, composting.*

REFERENCES

1. Volkohon, V. V., Nadkernychna, O. V., Tokmakova, L. M., Melnychuk, T. M., & Chaikovska, L. O. (2010). Eksperymentalna gruntova mikrobiolohiia: monohrafiia [Experimental soil microbiology: monograph]. V. V. Volkohon (Ed.). Kyiv: Aharna nauka [in Ukrainian].
2. Patyka, V. P., Omelyanets, T. H., Hrynyk, I. V., & Petrychenko, V. F. (2007). Ekolohiia mikroorganizmiv: posibnyk [Ecology of microorganisms: manual]. V. P. Patyka (Ed.). Kyiv: Osnova [in Ukrainian].
3. Park, S. O. (2022). Application strategy for sustainable livestock production with farm animal algorithms in response to climate change up to 2050: a review. *Czech Journal of Animal Science*, 67, 425–441. <https://doi.org/10.17221/172/2022-CJAS>
4. Kogut, I., Ryabukha, G., Vilar, A. P., & Perelló, V. C. (2023). Regenerative economy: principles and practice of implementation. *Problemy i perspektyvy ekonomiky ta upravlinnia — Problems and Prospects of Economy and Management*, 2(34), 65–76. [https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-2\(34\)-65-76](https://doi.org/10.25140/2411-5215-2023-2(34)-65-76)
5. Konstytutsiia Ukrainy: Zakon Ukrainy vid 28 chervnia 1996 r. № 254k/96-VR [Constitution of Ukraine: Law of Ukraine of June 28, 1996 № 254k/96-VR] [in Ukrainian]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254k/96-вр>
6. Moskalenko, A. M., Kolosha, V. P. (2025). Paradyhma tsyrkuliatsiinoi ekonomiky v suchasnykh doslidzhenniakh [The paradigm of circular economy in modern research]. *Ahroekolohichniy zhurnal — Agroecological Journal*, 3, 91–99 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2025.333826>
7. Pinchuk, O. V., Tertychna, O. V., & Borodai, V. P. (2017). Perspektyvni napriamy ekolohichnykh doslidzhen u haluzi tvarynnytstva [Promising directions of ecological research in the field of animal husbandry]. *Ahroekolohichniy zhurnal — Agroecological Journal*, 2, 44–48 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2017.220105>
8. Errington, J., Wu, L. J. (2017). Cell cycle machinery in *Bacillus subtilis*. *Subcellular Biochemistry*, 84, 67–101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53047-5_3
9. Smirnov, V. V., Reznik, S. R., & Vasilevs-kaya, I. A. (1982). *Sporoobrazuyushchie aerobnye bakterii — produtsenty biologicheskii aktivnykh veshchestv* [Spore-forming aerobic bacteria — producers of biologically active substances]. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
10. Weng, Y., Yao, J., Sparks, S., & Wang, K. (2017). Nattokinase: an oral antithrombotic agent for the prevention of cardiovascular disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, 523. <https://doi.org/10.3390/ijms18030523>
11. Vijay, R., Tarika, K. (2019). Microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) using kitchen waste as an inexpensive carbon source. *Bio-science Biotechnology Research Asia*, 16, 155–166. <https://doi.org/10.13005/bbra/2733>
12. Belda, E., Sekowska, A., Le Fèvre, F., Morgat, A., Mornico, D., Ouzounis, C. ... Danchin, A. (2013). An updated metabolic view of the *Bacillus subtilis* 168 genome. *Microbiology*, 159, 757–770. <https://doi.org/10.1099/mic.0.064691-0>
13. Etesami, H., Jeong, B. R., & Glick, B. R. (2023). Potential use of *Bacillus* spp. as an effective biostimulant against abiotic stresses in crops — a review. *Current Research in Biotechnology*, 5, 1001285. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2023.100128>
14. Timmis, K., Stahl, D. (1999). The birth of Environmental Microbiology. *Environmental Microbiology*, 1(1), 1–2. <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.1999.00020.x>
15. Akinsemolu, A. A., Onyeaka, H., Odion, S., & Adebajo, I. (2024). Exploring *Bacillus subtilis*: ecology, biotechnological applications, and future prospects. *Journal of Basic Microbiology*, 64, 2300614. <https://doi.org/10.1002/jobm.202300614>
16. Basit, A., Bashir, M. A., Hassan, F. U., Khan, K. A., Kainat, M., & Ullah, M. A. (2024). *Bacillus subtilis* impacts nutrient availability to enhance agricultural and environmental sustainability. *Journal of Agriculture and Livestock Farming*, 1(2). <https://doi.org/10.61577/jalf.2024.100008>
17. Kunst, F., Ogasawara, N., Moszer, I., Albertini, A. M., Alloni, G., Azevedo, V. ... Danchin, A. (1997). The complete genome sequence of the Gram-positive bacterium *Bacillus subtilis*. *Nature*, 390, 249–256. <https://doi.org/10.1038/36786>
18. Song, Y., He, S., Jopkiewicz, A., Setroikromo, R., van Merkerk, R., & Quax, W. J. (2022). Development and application of CRISPR-based genetic tools in *Bacillus* species and *Bacillus* phages. *Journal of Applied Microbiology*, 133, 2280–2298. <https://doi.org/10.1111/jam.15704>
19. Hu, G., Wang, Y., Blake, C., Nordgaard, M., Liu, X., Wang, B., & Kovács, Á. (2023). Parallel genetic adaptation of *Bacillus subtilis* to different

- plant species. *Microbial Genomics*, 9(7), 001064. <https://doi.org/10.1099/mgen.0.001065>
20. Miljaković, D., Marinković, J., & Balešević-Tubić, S. (2020). The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. *Microorganisms*, 8, 1037. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>
21. Nordgaard, M., Blake, C., Maróti, G., Hu, G., Wang, Y., Strube, M. L., & Kovács, Á. (2022). Experimental evolution of *Bacillus subtilis* on *Arabidopsis thaliana* roots reveals fast adaptation and improved root colonization. *Science*, 25, 104406. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02631>
22. Martins, S. J., Medeiros, F. H. V., Lakshmanan, V., & Bais, H. P. (2018). Impact of seed exudates on growth and biofilm formation of *Bacillus amyloliquefaciens* ALB629 in common bean. *Frontiers in Microbiology*, 8, 2631. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02631>
23. Morrison, M. D., Fajardo-Cavazos, P., & Nicholson, W. L. (2019). Comparison of *Bacillus subtilis* transcriptome profiles from two separate missions to the International Space Station. *NPJ Microgravity*, 5, 111. <https://doi.org/10.1038/s41526-018-0061-0>
24. Su, Y., Liu, C., Fang, H., & Zhang, D. (2020). *Bacillus subtilis*: a universal cell factory for industry, agriculture, biomaterials and medicine. *Microbial Cell Factories*, 19, 173. <https://doi.org/10.1186/s12934-020-01436-8>
25. Mahapatra, S., Yadav, R., & Ramakrishna, W. (2022). *Bacillus subtilis* impact on plant growth, soil health and environment: Dr. Jekyll and Mr. Hyde. *Journal of Applied Microbiology*, 132(5), 3543–3562. <https://doi.org/10.1111/jam.15480>
26. Закон України “Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людьми” [Law of Ukraine “On animal by-products not intended for human consumption”] (2015). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy — Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 24, 171 [in Ukrainian].
27. Dobrozhan Yu. V., Shevchenko L. V. (2018). Vmist antybiotykyv u poslidi kurei promyslovoho stada za intensyvnoi tekhnologii vyrobnytstva produktsii ptakhivnytstva [Content of antibiotics in the manure of industrial flock chickens under intensive technology of poultry production]. *Veterynarna biotekhnologhiia — Veterinary Biotechnology*, 32(2), 122–129 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.31073/vet_biotech32\(2\)-14](https://doi.org/10.31073/vet_biotech32(2)-14)
28. Zhang, X., Li, J., Shao, L., Huan, H., Qin, F., Zhai, P. ... Pan, X. (2022). Effects of manure removal frequencies and deodorants on ammonia and GHG concentrations in livestock house atmosphere. *Atmosphere*, 13(7), 1033. <https://doi.org/10.3390/atmos13071033>
29. Hidayat, C., Purwanti, S., Komarudin, S., & Rahman, M. (2021). Reducing air pollution from broiler farms. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788, 012150. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012150>
30. Symochko, L., Mariychuk, R., Demyanyuk, O., & Symochko, V. (2019). Antibiotics in agroecosystems: soil microbiome and resistome. *Ahroekolohichniy zhurnal — Agroecological Journal*, 4, 85–92. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2019.189463>
31. Shevchenko, L. A., Sasina, T. S. (2025). Antagonistychna aktyvnist bakterii rodu *Bacillus*, vydilynykh iz poverkhni hranul mineralnykh dobryv [Antagonistic activity of *Bacillus* bacteria isolated from the surface of mineral fertilizer granules]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia — Balanced Nature Management*, 1, 118–123 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2025.324367>
32. Stülke, J., Gruppen, A., Bramkamp, M., & Pelzer, S. (2023). *Bacillus subtilis*, a Swiss army knife in science and biotechnology. *Journal of Bacteriology*, 205. <https://doi.org/10.1128/jb.00102-23>
33. Kobayashi, K. (2021). Diverse LXG toxin and antitoxin systems specifically mediate intraspecies competition in *Bacillus subtilis* biofilms. *PLoS Genetics*, 17, e1009682. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009682>
34. Gaballa, A., Antelmann, H., Aguilar, C., Khakh, S. K., Song, K. B., Smaldone, G. T., Hellmann, J. D. (2008). The *Bacillus subtilis* iron-sparing response is mediated by a Fur-regulated small RNA and three small, basic proteins. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 105, 11927–11932. <https://doi.org/10.1073/pnas.0711752105>
35. Shevchenko, L. A., Riabukha, H. I. (2023). Biokompostuvannia kuriachoho poslidu za uchasti introdukovanykh mikroorhanizmiv [Biocomposting of chicken manure with the participation of introduced microorganisms]. *Silskohospodarska mikrobiologhiia — Agricultural Microbiology*, 37, 3–22 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35868/1997-3004.37.3-22>
36. Zhang, H., Marchant-Forde, J. N., Zhang, X., & Wang, Y. (2020). Effect of cornstalk biochar immobilized bacteria on ammonia reduction in laying hen manure composting. *Molecules*, 25, 1560. <https://doi.org/10.3390/molecules25071560>
37. Li, J., Wang, X., Cong, C., Wan, L., Xu, Y., Li, X., & Wang, L. (2020). Inoculation of cattle manure with microbial agents increases efficiency and promotes maturity in composting. *3 Biotech*, 10, 128. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-2127-4>
38. Selvamani, K., Annadurai, V., & Soundarapandian, S. (2019). Improved co-composting of poultry manure with complementary consortium of

- indigenous *Bacillus* spp. *3 Biotech*, 9, 215. <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1745-1>
39. Greff, B., Szigeti, J., Nagy, Á., Lakatos, E., & Varga, L. (2022). Influence of microbial inoculants on co-composting of lignocellulosic crop residues with farm animal manure: A review. *Journal of Environmental Management*, 302(Pt. B), 114088. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114088>
40. Fox, S. M. (1988). Probiotics: Intestinal inoculants for production animals. *Veterinary Medicine (Edwardsville)*, 83(8), 806–810.
41. Lilly, D. M., & Stilwell, R. H. (1965). Probiotics: growth promoting factors produced by microorganisms. *Science*, 147(3663), 747–748. <https://doi.org/10.1126/science.147.3659.747>
42. Collins, M. D., & Gibson, G. R. (1999). Probiotics, prebiotics, and synbiotics: approaches for modulating the microbial ecology of the gut. *Clinical Nutrition*, 69(5), 1052–1057. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.5.1052s>
43. WHO (n. d.). Publications. Retrieved November 11, 2025, from <https://www.who.int/ukraine/uk/publications/97892415168227>
44. Elshaghabe, F., Rokana, N., Gulhane, R., Sharma, C., Sahare, R., Singh, O. P., & Panwar, H. (2017). *Bacillus* As Potential Probiotics: Status, Concerns, and Future Perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01490>
45. Teslia, A., & Okhmat, O. (2023). Probiotychnyi potentsial bakterii rodu *Bacillus* [Probiotic potential of bacteria of the genus *Bacillus*]. *Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii — Trends and prospects for the development of science and awareness in the minds of globalization*, 97, 21–23 [in Ukrainian].
46. Safronova, L. A., & Iliash, V. M. (2017). Biosyntetychna aktyvnist' batsyl, shcho obumovluie probiotychnyi efekt [Biosynthetic activity of bacilli that determine the probiotic effect]. *Mikrobiolohichnyi zhurnal — Microbiological Journal*, 79(6), 120–136 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/microbiolj79.06.120>
47. Park, S. O. (2023). Impact of the Combination of Probiotics and Digital Poultry System on Behavior, Welfare Parameters, and Growth Performance in Broiler Chicken. *Microorganisms*, 11(9), 2345. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11092345>
48. Yaqoob, M. U., Wang, G., & Wang, M. (2022). An updated review on probiotics as an alternative of antibiotics in poultry. *Animal Bioscience*, 35(7), 1109–1125. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0485>
49. Smol's'kyi, O. S., Smol's'ka, T. M., Aheiev, V. O., Derevianko, S. V., & Bozhok, L. V. (2004). Stan antyoksydantnoi systemy orhanizmu koropa za dii probiotyky BPS-44 [The state of the antioxidant system of the carp organism under the action of the probiotic BPS-44]. *Naukovyi visnyk L'vivs'koi natsional'noi akademii veterynarnoi medytsyny — Scientific Bulletin of the Lviv National Academy of Veterinary Medicine*, 6(3, Pt. 3), 196–203 [in Ukrainian].
50. Smirnov, V. V., Patyka, V. P., Pidhors'kyi, V. S., Kotsiumbas, I. Ia., Hvozdiak, R. V., & Vol'vah, S. I. (2002). Mikrobnii biotekhnolohii v sil's'komu hospodarstvi [Microbial biotechnologies in agriculture]. *Ahroekolohichnyi zhurnal — Agroecological Journal*, 3, 3–85 [in Ukrainian].
51. Loi, P., Iuso, D., Czernik, M., Zacchini, F., & Ptak, G. (2013). Towards storage of cells and gametes in dry form. *Trends in Biotechnology*, 31(12), 688–695. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.09.004>
52. Moore, T., Globa, L., Barbaree, J., Vodyanoy, V., & Sorokulova, I. (2013). Antagonistic Activity of *Bacillus* Bacteria against Food-Borne Pathogens. *Probiotics and Health*, 1(2). <https://doi.org/10.4172/2329-8901.1000110>
53. Das, B., Neha Nidhi, R., Roy, P., Muduli, A., Swain, P., Mishra, S., & Jayasankar, P. (2014). Antagonistic activity of cellular components of *Bacillus subtilis* AN11 against bacterial pathogens. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 3(5), 795–809.
54. Afrin, S., & Bhuiyan, M. N. I. (2023). Antagonistic activity of *Bacillus amyloliquefaciens* subsp. *amyloliquefaciens* against multidrug resistant *Serratia rubidaea*. *Current Research in Microbial Sciences*, 5, 100206. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2023.100206>
55. Kravchenko, N. O. (2015). Microbial regulation of the antagonistic activity of lactic acid bacteria strains under the influence of transient bacilli of the *Bacillus* genus. *Agricultural Science and Practice*, 2(2), 45–49. <https://doi.org/10.15407/agrisp2.02.045>
56. Ianovych, V. H. (2002). Symbioz zhuiinykh iz mikroorhanizmamy peredshlunkiv [Ruminant symbiosis with forestomach microorganisms]. *Visnyk ahrarnoi nauky — Bulletin of Agricultural Science*, 7, 41–44 [in Ukrainian].
57. Fedorovskaya, E. A. (1999). Vzaimosvyaz' mikrobnyykh ekosistem i immuniteta cheloveka [Interrelation of microbial ecosystems and human immunity]. *Mikrobiologicheskii zhurnal — Microbiological Journal*, 61(5), 85–96 [in Russian].
58. Aheiev, V. O., Derevianko, S. V., Bozhok, L. V., & Prokopenko, O. I. (2008). Antyoksydantnyi ta imunnyi status molodniaku VRKh za dii probiotychnykh preparativ BPS-44 ta BPS-L [Antioxidant and immune status of young cattle under the action of probiotic preparations BPS-44 and BPS-L]. *Naukovyi visnyk L'vivs'koho natsional'noho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Hzhys'koho — Scientific Bulletin of the S. Z. Gzhysky Lviv National University of Veteri-*

nary Medicine and Biotechnology, 10(3, Pt. 1), 10–17 [in Ukrainian].

59. Aheiev, V. O., Derevianko, S. V., Diachenko, H. M., Bozhok, L. V., & Prokopenko, O. I. (2009). Stan antyoksydantnoi ta imunnoi system molodniaku svynei za dii probiotychnykh preparativ [The state of antioxidant and immune systems of young pigs under the action of probiotic preparations]. *Naukovyi visnyk L'vivs'koho natsional'noho universytetu veterynarnoi medytsyny ta biotekhnologii imeni S. Z. Hzhys'tkoho — Scientific Bulletin of the S. Z. Gzhysky Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology*, 11(2, Pt. 1), 3–8 [in Ukrainian].

60. Kryvtsova, M. V., & Nikolaichuk, V. I. (2007). Vplyv probiotyku iz bakterii rodu Bacillus na pokaznyky mikroflory kyshechnyku laboratornykh tvaryn za umov eksperymental'noho hipotyreozu [Influence of a probiotic from Bacillus genus bacteria on microflora indicators of laboratory animals' intestines under experimental hypothyroidism]. *Naukovyi visnyk Uzhhorods'koho universytetu — Scientific Bulletin of Uzhhorod University*, 20, 239–242 [in Ukrainian].

61. Pat. 148107 UA, MPK A23K30/10, A23K30/15, C12N1/20, C12R1/125, C12R1/25. Sposib konservuvannia pliushchenoho volohoho zerna kukurudzy [Method for preserving flattened wet corn grain], Kravchenko, N. O., Dmytruk, O. M., Pederedii, M. H., Publ. 07.07.2021 [in Ukrainian].

62. Pat. 157322 UA, MPK A23K30/15, C12N1/20, C12N1/25, C12R1/125. Sposib konservuvannia sinazhu z liutserny [Method for preserving alfalfa haylage], Kravchenko, N. O., Dmytruk, O. M., Furs, N. M., Publ. 02.10.2024 [in Ukrainian].

63. Sharma, S., Singh, P., Sharma, R., Chhabra, S., Sharma, J. G., Chaudhary, R., & Singh, N. (2023). Molecular characterization and antifungal activity of lipopeptides produced from Bacillus subtilis against plant fungal pathogen Alternaria alternata. *BMC Microbiology*, 23(1), 226. <https://doi.org/10.1186/s12866-023-02922-w>

64. Zhang, X., Xu, S., Liu, Z., Yang, W., Yan, M., & Yang, Y. (2023). Antagonistic Activity and Potential Mechanisms of Endophytic Bacillus subtilis YL13 in Biocontrol of Camellia oleifera Anthracnose. *Forests*, 14(5), 886. <https://doi.org/10.3390/f14050886>

65. Gurung, N., Ray, S., Bose, S., & Rai, V. (2019). Antagonistic and plant-growth promoting novel Bacillus species from long-term organic farming soils from Sikkim, India. *BMC Microbiology*, 19(1), 71. <https://doi.org/10.1186/s12866-019-1448-3>

66. Caulier, S., Nannan, C., Gillis, A., Krawczyk, B., Raaijmakers, J. M., de Rode, X., & Bragard, C. (2019). Bioactive Secondary Metabolites from Bacillus subtilis: A Comprehensive Review. *Journal of Natural Products*, 82(7), 2038–2053. <https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b00110>

67. Pan, S., Wu, H., Huang, J., Xu, R., & Wang, Y. (2022). Lipopeptide Biosurfactants from Bacillus spp.: Types, Production, Biological Activities, and Applications in Food. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(5), 4750–4780. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12986>

68. Wu, Y., Wang, W., Zhu, S., Zhang, S., Liu, C., Chen, B. ... Xu, J. (2024). Dietary probiotic based on a dual-strain Bacillus subtilis improves immunity, intestinal health, and growth performance of broiler chickens. *Poultry Science*, 103(6), 103690. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.103690>

69. Xu, C., Wang, J., Li, H., Liu, W., Xu, P., Yin, W. ... Wang, D. (2024). Effect of supplementing a Bacillus subtilis-based probiotic on performance, intestinal integrity, and serum antioxidant capacity in pigs under heat stress. *Journal of Animal Science*, 102(4). <https://doi.org/10.1093/jas/skae011>

70. Mikkelsen, L., Nielsen, M., Pedersen, A., Rung, M., Sørensen, T., & Canibe, N. (2023). The Effect of a Bacillus-Based Probiotic on Sow and Piglet Performance in Two Production Cycles. *Animals*, 13(20), 3163. <https://doi.org/10.3390/ani13203163>

71. Beneduzi, A., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents. *Genetics and Molecular Biology*, 35(4), 1044–1051.

72. Alabouvette, C., Olivain, C., & Steinberg, C. (2006). Biological control of plant diseases: the European situation. *European Journal of Plant Pathology*, 114(3), 329–341.

73. Karlapudi, A. P., Venkateswarulu, T. C., Tammineedi, J., Kanumuri, L., Ravuru, B. K., Dirisala, V., & Talluri, V. S. R. (2018). Role of biosurfactants in bioremediation of oil pollution — a review. *Petroleum*, 4(3), 241–249.

Received: 12.08.2025

Accepted: 29.09.2025

Published online: 29.12.2025