

ЕКОНОМІЧНІ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ СІРКОВІСНИХ БІОПРЕПАРАТІВ У СУЧАСНОМУ АГРОВИРОБНИЦТВІ

ШИЯН А.В. – аспірант

orcid.org/0009-0001-6093-2446

Національний університет «Львівська політехніка»

МОНЬКА Н.Я. – кандидат хімічних наук, доцент

orcid.org/0000-0002-6084-7671

Національний університет «Львівська політехніка»

Постановка проблеми. Сірка є важливим елементом для рослин, оскільки входить до складу амінокислот (метіоніну, цистеїну), вітамінів, глутатіону, коензиму А та інших сполук. Вона бере участь в утворенні дисульфідних зв'язків, регуляції білків і ферментів, а також забезпечує захист клітин від окисного пошкодження. Дефіцит сірки призводить до низької якості та врожайності сільськогосподарських культур. На жаль, дефіцит сірки став більш поширеним в останні роки через зменшення надходження сірки з атмосфери. Зниження промислових викидів унаслідок екологічного регулювання призвело до меншого надходження сірки в ґрунт. Також до причин належать широке використання безсіркових або низьосіркових добрив і пестицидів та інтенсивне вирощування високоврожайних культур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кілька досліджень показують, що дефіцит сірки впливає на біомасу, загальну морфологію, врожайність та поживну цінність рослин. Наприклад, у *Eruca sativa* L. (рукола) дефіцит сірки призводить до зміни виробництва біомаси та синтезу хлорофілу. Дослідження також показали вплив добавок сірки на врожайність зерна та вихід білка агрономічно важливих культур. Відомо, що існує ряд ґрунтових грибів, таких як арбускулярні мікоризні гриби (АМФ), які колонізують корені рослин і покращують доступність і засвоєння сірки в ґрунті.

Незважаючи на доведену ефективність мікробної мобілізації мікроелементів, комплексний вплив поєднання мікроорганізмів та елементарної сірки на економічну стабільність агропідприємств та макроекономічні біотехнологічні перспективи потребує подальшого систематичного висвітлення.

Метою дослідження є комплексний аналіз економічних та екологічних аспектів використання сірковмісних біопрепаратів у сучасному агровиробництві, а також оцінка їхнього впливу на біоремедіацію ґрунтів та формування нових джерел харчового білка.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконано на основі аналізу вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій, присвячених випуску сірковмісних біопрепаратів в агровиробництві. Вивчення потенціалу біоремедіації здійснювалося шляхом аналізу фізіолого-біохімічних механізмів взаємодії досліджуваних

мікробів із організованими обґрунтуваннями та їх впливу на стресостійкість сільськогосподарських культур в умовах абіотичного та біотичного стресу. Синергетичний ефект сіркоокиснювальних мікроорганізмів у поєднанні з азотними добривами оцінюється з позицій оптимізації внутрішнього живлення рослин.

Інноваційний напрям дослідження передбачав аналіз науково-технічних перспектив використання сіркоокиснювальних бактерій як біотехнологічної основи для виробництва альтернативного харчового білка з урахуванням актуальних даних щодо ефективності відповідних біотехнологічних процесів.

Результати досліджень. Сірка є важливим елементом для рослин, оскільки входить до складу амінокислот (метіоніну, цистеїну), вітамінів, глутатіону, коензиму А та інших сполук. Вона бере участь в утворенні дисульфідних зв'язків, регуляції білків і ферментів, а також забезпечує захист клітин від окисного пошкодження та є необхідною для росту, розвитку та фізіологічних процесів рослин. Потреба в ній залежить від виду рослини та стадії розвитку, особливо зростаючи під час вегетативного росту й формування насіння. Сполуки, що містять сірку, беруть участь у фотосинтезі, енергетичному обміні та метаболічних реакціях.

Основним джерелом сірки для рослин є неорганічний сульфат (SO_4^{2-}), який поглинається та транспортується спеціальними транспортерами. Асиміляція сульфату переважно відбувається в хлоропластах молодого листя, де синтезується цистеїн, хоча цей процес можливий також у коренях і насінні. Крім того, сірка бере участь у регуляції стійкості рослин до біотичних та абіотичних стресів.

У ґрунті сірка міститься переважно в органічній речовині, яка становить близько 95% її загального вмісту. Під час розкладання органічної речовини сірка мінералізується до сульфату (SO_4^{2-}), доступного для рослин.

Джерелом сірки також є ґрунтові мінерали, під час вивітрювання яких утворюються сульфати. Крім того, сірка надходить у ґрунт із атмосфери у вигляді діоксиду сірки (SO_2), що утворюється під час спалювання палива та потрапляє з дощовою водою. Значна кількість сірки можуть надходити з пестицидами та мінеральними добривами.



Також, якщо розглядати дефіцит сірки, то він призводить до низької якості та врожайності сільськогосподарських культур. Незначний дефіцит сірки може мати незначний вплив на врожайність, але суттєвий вплив на якість. Таким чином, у ґрунті, що обмежує вміст сірки, синтезуються білки з низьким вмістом сірки, такі як омега-гліадин та високомолекулярні субодиниці глютеніну, за рахунок багатих на сірку білків пшениці.

Дефіцит сульфату призводить до зниження синтезу ферменту *Rubisco* (рибулозо-1,5-біфосфаткарбоксилази/оксигенази), який впливає на швидкість засвоєння CO_2 , що зрештою призводить до уповільненого синтезу вуглеводів і викликає хлороз молодого листя. Кілька досліджень показують, що дефіцит сірки впливає на біомасу, загальну морфологію, врожайність та поживну цінність рослин. Наприклад, у *Eruca sativa L.* (рукола) дефіцит сірки призводить до зміни виробництва біомаси та синтезу хлорофілу.

Крім того, дослідження показали вплив добавок сірки на врожайність зерна та вихід білка агрономічно важливих культур. Середній вихід білка різних сортів збільшився з 0,018 до 0,024 кг/м², а середній вихід зерна – з 0,20 до 0,29 кг/м².

Та, на жаль, дефіцит сірки став більш поширеним в останні роки через зменшення надходження сірки з атмосфери. Зниження промислових викидів унаслідок екологічного регулювання призвело до меншого надходження сірки в ґрунт. Також до причин належать широке використання безсіркових або низькосіркових добрив і пестицидів та інтенсивне вирощування високоврожайних культур. Зменшення концентрації SO_2 в атмосфері також вплинуло на баланс сірки в агроєкосистемах.

Не варто забувати, що важливу роль відіграють ґрунтові фактори: основним джерелом сірки є органічна речовина, тому низький її вміст у ґрунті призводить до дефіциту. Сірка стає доступною для рослин через мінералізацію, яку здійснюють мікроорганізми, і цей процес залежить від температури та вологості ґрунту. За несприятливих умов мікробна активність знижується, що зменшує доступність сірки [1].

Існує ряд ґрунтових грибів, таких як арбускулярні мікоризні гриби (АМФ) – це гриби, які колонізують корені рослин. Вони утворюють арбускули, везикули та гіфи всередині кореня, а також розростаються в ґрунті (ризосфері). Завдяки цьому АМФ покращують поглинання води та мінеральних елементів і діють як природне біодобриво. До грибів, які опосередковано або прямо покращують доступність і засвоєння сірки в ґрунті, належать ендомікоризні гриби (*Serendipita indica*), ектомікоризні гриби (роди *Pisolithus*, *Hebeloma*, *Suillus*) та сапротрофні гриби (*Trichoderma*, *Aspergillus*, *Penicillium*), які беруть участь у мінералізації органічної сірки та покращенні живлення рослин. Саме здатність цих сапротрофних грибів до мінералізації органічної сірки лежить в основі розробки сучасних біопрепаратів, що дозволяють ефективніше використовувати природний потенціал ґрунту.

АМФ формують симбіоз із різними групами рослин (покритонасінні, голонасінні, тощо). Вони мають внутрішньокореневі та зовнішні гіфи: внутрішні забезпечують розвиток гриба в тканинах кореня, а зовнішні

відповідають за поглинання поживних речовин, освоєння ґрунту та утворення спор.

Однією з ключових функцій АМФ є покращення засвоєння сірки. Гіфи значно збільшують площу поглинання порівняно з кореневою системою, що дозволяє ефективніше захоплювати сульфат (SO_4^{2-}), особливо в умовах його дефіциту. У зоні навколо кореня формується «зона виснаження» сульфату, яку гіфи АМФ швидко колонізують, забезпечуючи рослину сіркою. АМФ також впливають на експресію транспортерів сульфату в рослині, підвищуючи ефективність його засвоєння.

Важливу роль відіграє взаємодія АМФ із мікроорганізмами ґрунту. На поверхні гіф і в мікоризній зоні виявляють бактерії, які беруть участь у мобілізації органічної сірки. Зокрема, це сульфонат-десульфуризуючі бактерії, наприклад представники родів *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Arthrobacter* та *Rhodococcus*. Вони здатні розщеплювати органічні сірковмісні сполуки (сульфонати), роблячи сірку доступною для рослин.

Таким чином формується функціональна система «рослина-АМФ-бактерії», яка покращує кругообіг сірки в ґрунті та підвищує ефективність її засвоєння.

Крім того, у мікоризній зоні (гіпосфері) підвищується мікробна активність, що додатково стимулює мобілізацію сірковмісних сполук. Інокуляція АМФ може посилювати розвиток цих мікробних угруповань і, відповідно, покращувати живлення рослин.

Різні мембранні транспортери забезпечують поглинання сульфату рослинами з ґрунту та його внутрішньоклітинний розподіл. Перенесення через плазматичну мембрану відбувається за рахунок протонного градієнта, який підтримується протонною АТФазою, через механізм симпорту $\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$. Транспорт через тонопласт визначається електрохімічним градієнтом між цитоплазмою і вакуолею.

У хлоропластах перенесення сульфату здійснюється за участі $\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$ транспортерів внутрішньої мембрани. Основна частина поглинутого сульфату відновлюється до сульфіді та включається в цистеїн – ключову сірковмісну амінокислоту. Процес відбувається переважно в хлоропластах у три етапи: активація сульфату до аденозин-5'-фосфосульфату (APS) за участі АТФ-сульфурилази; відновлення APS до сульфіту (APS-редуктаза, глутатіон); подальше відновлення сульфіту до сульфіді (сульфітредуктаза, ферредоксин).

Сульфід включається в синтез цистеїну через реакцію з О-ацетилсеріном, який утворюється під дією серин-ацетилтрансферази; цей етап пов'язаний із цистеїнсинтазним комплексом.

Синтез цистеїну є важливою точкою зв'язку метаболізму сірки та азоту в рослинах. Регуляція сульфатредукційного шляху значною мірою контролюється активністю APS-редуктази, яка є одним із ключових регуляторних ферментів. Її активність і експресія швидко змінюються у відповідь на дефіцит або надлишок відновлених форм сірки та регулюються такими метаболітами, як цистеїн, глутатіон, сульфід і О-ацетилсерин.

Навіть за умов дефіциту сірки в рослинах може зберігатися певний рівень сірковмісних сполук. Цистеїн є попередником для синтезу метіоніну та інших

сірковмісних амінокислот через шлях транссульфування, а також для утворення глутатіону, фітохелатинів і вторинних метаболітів. Сульфгідрильні групи цистеїну в білках відіграють важливу роль у ферментативному каталізі, формуванні метал-сірчаних кластерів (наприклад, у фередоксинах) та регуляції білків (наприклад, тіоредоксинів) [1].

Сірководокиснювальні бактерії суттєво підвищують стійкість рослин до солі, важких металів і посухи. Наприклад, інокуляція солелюбних галофітів *Halothiobacillus halophilus* подвійно покращує їхні адаптаційні реакції на Cd- та NaCl-стрес: у дослідях довжина стебла зросла в 2 рази, індекс ростової толерантності – у 3 рази, а вміст фотосинтетичних пігментів – на ~20% порівняно з контролем. Під дією сірководокиснювальних мікроорганізмів у рослинах збільшується вміст S та похідних (цистеїн, глутатіон), що стимулює синтез фенольних сполук (фенілпропаноїдів, флавонолів) і проліну, як осмопротекторів. Виявлено також значне зниження перекисного окислення ліпідів (індикатор – малоновий діальдегід) після інокуляції сірководокиснювальних, що свідчить про захист мембран від оксидативного пошкодження [2].

Інокуляція ґрунту елементарною сіркою разом із сірководокиснювальними мікроорганізмами сприяє тривалому покращенню ґрунтових властивостей. Біотичний цикл сірки стабілізує агрегати ґрунту, підвищуючи його структуру і водопроникність. Додавання сірчаних мінералів і органічної маси (гній, компост) стимулює вибухове розмноження корисної мікрофлори: зростає частка *Thiobacillus* та споріднених бактерій, а також таксонів-лізаторів складних органіки роду *Pseudoxanthomonas*. Це пришвидшує розклад лігніну/целюлози і стабілізує співвідношення C:N у ґрунті, запобігаючи накопиченню токсичних фенолів гниття. В цілому, сірководокиснювальними мікроорганізмами покращують гумусоутворення, сприяють стабілізації агрегації та кругообігу елементів, що позитивно впливає на родючість. Водночас важливо пам'ятати про конкуренцію: сірководокиснювальні бактерії використовують азот тієї ж форми, що й рослини (часто NH_4^+) і можуть тимчасово імунобілізувати N під час активного окислення великих доз S. Тому в практиці слід узгоджувати строки внесення азоту та сірки, щоб уникнути короточасного дефіциту N через інтенсивну мікробну мінералізацію [3].

Одним з ключових екологічних ефектів сірковмісних препаратів є фітопротекція. Елементарна сірка давно відома як природний фунгіцид: розсипна сірка сублімується, виділяючи пару S_2 , які інгібують проростання спор збудників (спори оїдіуму, парші, борошнистої роси, іржі, кореневих гнилей тощо) ще до інфікування. Біопрепарати на основі ризобактерій та грибів підсилюють цей ефект: кореневі бактерії конкурентно витісняють патогенів, займаючи екологічну нішу і споживаючи поживні ресурси. Більш того, вони індукують системний імунітет рослини і виділяють у ризосферу власні антимікробні метаболіти – природні антибіотики, сидерофори та літичні ферменти (хітинази, глюканази), що руйнують клітинні стінки грибів.

Таким чином поєднання прямого хімічного (пари сірки) та опосередкованого біологічного ефекту дозволяє значно знизити використання токсичних фунгіцидів у господарстві [4].

Впровадження мікробіологічних технологій вимагає точного математичного та економічного моделювання на рівні окремого агропідприємства. Основний економічний важіль технології полягає в оптимізації засвоєння високовартісних азотних добрив. Відповідно до агрохімічного закону мінімуму Лібіха, азот і сірка діють у жорсткій синергії під час біосинтезу рослинного білка. Оскільки типове фізіологічне співвідношення N:S у рослинних тканинах становить приблизно 15:1, навіть незначний дефіцит сірки блокує метаболізм азоту. У такому випадку внесені фермером дорогі азотні добрива не засвоюються рослиною і перетворюються на фінансовий збиток та екологічний баласт (який згодом вимивається у вигляді нітратів у ґрунтові води або випаровується у вигляді парникового закису азоту).

Використання біодобрив суттєво підвищує загальний коефіцієнт використання мінерального живлення з добрив та ґрунтового пулу. Виробники заявляють, що за умови використання хелатних форм сірки або активної мікробіологічної підтримки рівень засвоєння може сягати 97–99%. В аграрних дослідженнях встановлено чіткі економічні оптимуми внесення комплексів.

При вирощуванні нуту на складних карбонатних ґрунтах досліджувалися різні норми азоту та сірки з сірководокиснювальними мікроорганізмами. Було доведено, що використання надмірних доз азоту без сірки є економічно збитковим. Натомість система удобрення $\text{N80}+\text{S50}$ (80 кг/га азоту та 50 кг/га сірки + бактерії) була визнана найбільш раціональною з точки зору економічної ефективності: вона дозволила заощадити значні кошти на азотних добривах при досягненні максимальної фінансової рентабельності від реалізації збільшеного врожаю.

Загалом, доведено, що введення біопрепаратів до технологічної карти дозволяє скоротити використання стандартних мінеральних добрив (N, P, K) на врожаючі 20–40% без жодного зниження планової врожайності. Це вивільняє колосальні оборотні кошти агропідприємств.

Додатковою, не менш важливою статтею економії є зниження витрат на засоби захисту рослин (ЗЗР). Оскільки мікроорганізми та пари елементарної сірки індукують системний імунітет рослин та фізично пригнічують патогени (такі як збудники борошнистої роси, парші чи рослиноїдні павутинні кліщі), господарства можуть безпечно зменшити частоту профілактичних фунгіцидних та акарицидних обробок тракторними обприскувачами. Це не лише економить кошти на купівлі самих пестицидів, але й зменшує витрати на дизельне паливо, амортизацію техніки та оплату праці механізаторів [5].

Український ринок агрохімії та мікробіології швидко адаптується до нових реалій, пропонуючи широку палітру сірковмісних рішень, що забезпечує необхідну гнучкість у виборі технологій для господарств з різним бюджетом та інтенсивністю виробництва. Комерційні пропозиції чітко сегментуються на три основні категорії.

Таблиця 1

Економічна модель вигоди від впровадження сіркоокиснювальних мікробних комплексів у порівнянні з традиційною технологією

Стаття витрат / доходів агропідприємства	Традиційна хімічна система живлення	Інтегрована мікробіологічна система (Мінеральні добрива + сіркоокиснювальні мікроорганізми)	Економічний результат та ефект (на 1 гектар)
Витрати на азотні добрива	Внесення 100% базової, часто надлишкової норми	Зменшення норми на 20–30% через оптимізацію N:S балансу	Пряма економія фінансів на закупівлі добрив, зберіганні та логістиці.
Витрати на фосфорні добрива	Високі незворотні втрати через фіксацію карбонатами	Локальне підкислення S+SOB мобілізує нерухомий фосфор з ґрунту	Зниження норми внесення комерційних P-добрив на 15–20%.
Витрати на фунгіцидний захист	3–4 обробки поля жорсткими хімічними препаратами	Скорочення на 1–2 обробки (завдяки індукованому імунітету та парам S)	Суттєве зниження сумарних витрат на дорогі ЗЗР, воду та паливно-мастильні матеріали.
Приріст загальної врожайності (напр. Ріпак)	Базовий, середньостатистичний рівень (напр., 2.5 т/га)	+ 47–79% реального приросту маси товарного насіння	Кардинальне збільшення валового доходу від реалізації зібраного врожаю.
Додаткова премія за якість продукції	Стандартні, базові показники олійності/білковості	+ 5–6% олійності (ріпак, соняшник), вищий клас білка	Отримання преміум-ціни від трейдерів за продукцію екстракласу.

Позиціонується як класичне добриво-меліорант (наприклад, продукція ТМ «Агроресурс» чи інші аналоги). Вона вимагає наявності природної ґрунтової мікрофлори для повільного переходу у сульфатну форму. Використовується фермерами переважно для довгострокового вирівнювання і стабілізації рН, особливо під час закладання багаторічних плантацій лохини (де сірка перемішується з торфом безпосередньо у посадковій ямі) та інших кислотолюбних культур. Вона також забезпечує пролонговану фунгіцидну дію навколо кореневої шийки. Заявлений виробниками приріст урожаю за умови правильного внесення становить 30–40% [6].

Хелатні рідкі добрива з високим вмістом сірки – високотехнологічні препарати, розроблені спеціально для швидкого позакореневого (листового) підживлення обприскувачами. Яскравим прикладом є продукт «LF-БІОСІРКА 200», який містить високу концентрацію елементів (200 г/л сірки, 100 г/л азоту та мікродози міді при рН6). Такі продукти забезпечують миттєве зняття гострого дефіциту під час вегетації. Роздрібна ціна на такі препарати коливається орієнтовно на рівні 137 грн за літр, що робить їх економічно привабливими для широкого кола аграріїв, враховуючи високий (до 99%) відсоток засвоєння [7].

Мікробіологічні препарати (інокулянти та біофунгіциди) – продукти, що безпосередньо містять живі мікроорганізми або їхні спори у стабілізованій формі. Інокулянти для обробки насіння або сірковмісні фунгіциди з мікробіологічною дією («Мікротіол Спеціаль», «Кумулюс ДФ», «Тіовіт Джет», вартість яких складає близько 142–157 грн за кілограм). Вони цілеспрямовано формують стійкий ризосферний мікробіом навколо насінини, покращуючи структуру ґрунту, стимулюючи накопичення гумусу, і водночас створюючи нездоланний бар'єр для розвитку патогенних кореневих гнилей [8, 9, 10] (табл. 1).

Окрім традиційного використання в землеробстві, унікальні метаболічні здібності сіркоокиснювальних бактерій відкривають абсолютно нові, несподівані горизонти в біотехнології та харчовій промисловості на макроекономічному рівні. Зважаючи на безперервне зростання чисельності населення планети та загальний соціально-економічний розвиток (покращення стандартів життя в країнах, що розвиваються), глобальний попит на харчовий і кормовий білок прогнозовано зросте на катастрофічні 70% до 2050 року. Недостатнє споживання білка вже сьогодні призводить до білково-енергетичної недостатності у вразливих груп населення (дітей та літніх людей).

Традиційні сільськогосподарські джерела протеїну, такі як соєві боби, стають дедалі вразливішими до непередбачуваних кліматичних аномалій. Показовим є приклад 2023 року, коли Аргентина, один із найбільших світових експортерів сої, постраждала від жорстокої посухи, що призвело до падіння врожайності з гектара на рекордні 37% (найнижчий показник з 2000 року) [11]. Більше того, традиційне виробництво рослинних білків вимагає залучення колосальних площ орних земель (спричиняючи вирубку лісів) та величезних обсягів прісної води.

У цьому глобальному контексті хемолітоавтотрофні сіркоокиснювальні мікроорганізми серйозно розглядаються інвесторами та науковцями як перспективні індустріальні продуценти так званого одноклітинного білка (Single-Cell Protein, SCP).

Висновки. Використовуючи дешеву, відновлену сірку як джерело енергії (яку можна отримувати з промислових відходів), ці бактерії здатні безперервно фіксувати CO₂ у величезних біореакторах. Це створює ідеальну замкнену економіку: відбувається одночасна декарбонізація промислових викидів та синтез бактеріальної біомаси з надзвичайно високим вмістом критично важливої амінокислоти метіоніну. Такий

бактеріальний протеїн може бути використаний як ідеальна, високопоживна добавка до кормів для сільськогосподарських тварин і птиці, кардинально знімаючи навантаження зі світових орних земель. І хоча наразі енергетична ефективність і рентабельність цього промислового процесу дещо поступається виробництву білкової біомаси за допомогою гетеротрофних бактерій та мікроводоростей, подальша метаболічна регуляція та оптимізація біореакторів можуть перетворити сіркоокиснювальні мікроорганізми на фундамент економіки альтернативних білків XXI століття.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Narayan O. P., Kumar P., Yadav B., Dua M., Johri A. K. Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*. 2022. Vol. 18, № 1. P. 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Koźmińska A., Kamińska I., Hanus-Fajerska E. Sulfur-Oxidizing Bacteria Alleviate Salt and Cadmium Stress in Halophyte *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobroc. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25, № 5. P. 2455. <https://doi.org/10.3390/ijms25052455>
- Maffia A., Scotti R., Wood T., Muscolo A., Lepore A., Acocella E., Celano G. Transforming Agricultural and Sulfur Waste into Fertilizer: Assessing the Short-Term Effects on Microbial Biodiversity via a Metagenomic Approach // *Life*. 2024. Vol. 14, № 12. P. 1633. URL: <https://www.mdpi.com/2075-1729/14/12/1633> (дата звернення: 29.05.2026).
- Sulfur, organic fungus control, but use with caution. *Nature & Garden*: website URL: <https://www.nature-and-garden.com/gardening/sulfur.html> (дата звернення: 29.05.2026).
- Patel K., Kapadia C., Patel N., Patel D., Parmar P.R., Datta R., Alharbi S.A., Ansari M.J.. Effect of supplementing Sulphur-oxidizing bacteria with different Sulphur sources on the growth and development of chickpea (*Cicer arietinum*). *Plant Stress*. 2024. Vol. 12. P. 100433. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100433>
- Агроресурс – Сільгосптехніка. Посівний матеріал. Засоби захисту рослин. *AGRS Group*: вебсайт. URL: <https://www.agrs.group/> (дата звернення: 29.05.2026).
- Купити мікродобриво Біо Сірка 200. Сірчане добриво в Україні: ціна, застосування, опис Агроексперт-Трейд: вебсайт. URL: <https://agroexp.com.ua/uk/helatnoe-mikroudobrenie-lf-biosera-200> (дата звернення: 29.05.2026).
- Мікротіол Спеціаль. *UPL Україна* : вебсайт. URL: <https://www.uplcorp.com/ua/%D0%9E%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96-%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D0%BC%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BE%D0%BB-%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%86%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%8C> (дата звернення: 29.05.2026).
- Кумулюс® ДФ – Аграрні рішення. *BASF Україна* : вебсайт. URL: <https://www.agro.basf.ua/uk/Products/overview/%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%B3%D1%96%D1%86%D0%B8%D0%B4%D0%B8/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8E%D1%81-%D0%94%D0%A4.html> (дата звернення: 29.05.2026).
- Тіовіт Джет® для дач та городів. *Сингента Україна* : вебсайт. URL: <https://www.syngenta.ua/tiovit-dzhet-dlya-dach-ta-gorodiv> (дата звернення: 29.05.2026).
- Zulauf C., Colussi J., Janzen J. An Alternative Look at the 2022–2023 Corn and Soybean Markets: Red Flags Waving. *farmdoc daily*. 2023. URL: <https://farmdocdaily.illinois.edu/2023/06/an-alternative-look-at-the-2022-2023-corn-and-soybean-markets-red-flags-waving.html>
- Li L., Zhao X., Wang L. Sulfur-Oxidizing Bacteria: Potential Contributors to High-Quality Protein Production Coupled with CO₂ Utilization. *Environmental Science & Technology*. 2025. Vol. 59, № 22. P. 10781–10787. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c11669>

REFERENCES:

- Narayan, O. P., Kumar, P., Yadav, B., Dua, M., Johri, A. K. (2022). Sulfur nutrition and its role in plant growth and development. *Plant Signaling & Behavior*, 18(1), 2030082. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2030082>
- Koźmińska, A., Kamińska, I., Hanus-Fajerska, E. (2024). Sulfur-oxidizing bacteria alleviate salt and cadmium stress in halophyte *Tripolium pannonicum* (Jacq.) Dobroc. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(5), 2455. <https://doi.org/10.3390/ijms25052455>
- Maffia, A., Scotti, R., Wood, T., Muscolo, A., Lepore, A., Acocella, E., Celano, G. (2024). Transforming agricultural and sulfur waste into fertilizer: Assessing the short-term effects on microbial biodiversity via a metagenomic approach. *Life*, 14(12), 1633. <https://doi.org/10.3390/life14121633>
- Sulfur, organic fungus control, but use with caution. *Nature & Garden*: website URL: <https://www.nature-and-garden.com/gardening/sulfur.html> (date of inquiry: 29.05.2026).
- Patel, K., Kapadia, C., Patel, N., Patel, D., Parmar, P. R., Datta, R., Alharbi, S. A., Ansari, M. J. (2024). Effect of supplementing sulphur-oxidizing bacteria with different sulphur sources on the growth and development of chickpea (*Cicer arietinum*). *Plant Stress*, 12, 100433. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100433>
- AGRS Group.(2026) Ahroresurs – Silhosptekhnika. Posivnyi material. Zasoby zakhystu roslyn [AgroResource – Agricultural Equipment. Seed. Plant Protection Products]. from <https://www.agrs.group/>. Retrieved May 29, 2026. [In Ukrainian].
- Agroexpert-Trade. (2026). Kupyty mikrodobryvo Bio Sirkha 200. Sirchane dobrovyo v Ukraini: tsina, zastosuvannia, opys [Buy Bio Sulfur 200 microfertilizer. Sulfur fertilizer in Ukraine: price, uses, description]. <https://agroexp.com.ua/uk/helatnoe-mikroudobrenie-lf-biosera-200>. Retrieved May 29, 2026. [In Ukrainian].
- UPL Ukraina. (2026). Mikrotiol Spetsial [Microtiol Special] URL: <https://www.uplcorp.com/ua/%D0%9E%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%96-%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D0%BC%D1%96%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%82%D1%96%D0%BE%D0%BB-%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%86%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%8C>. Retrieved May 29, 2026. [In Ukrainian].
- BASF Ukraina. (2026). Kumulus® DF [Cumulus® DF.]. URL: <https://www.agro.basf.ua/uk/Products/overview/%D0%A4%D1%83%D0%BD%D0%B3%D1%96%D1%86%D0%B8%D0%B4%D0%B8/%D0%9A%D1%83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8E%D1%81-%D0%94%D0%A4.html>

- 83%D0%BC%D1%83%D0%BB%D1%8E%D1%81-%D0%94%D0%A4.html Retrieved May 29, 2026. [In Ukrainian].
10. Syngenta Ukraina. (2026). Tiovit Dzhet® dlia dach ta horodiv [Thiovit Jet® for summer cottages and vegetable gardens]. URL: <https://www.syngenta.ua/tiovit-dzhet-dlya-dach-ta-gorodiv>. Retrieved May 29, 2026. [In Ukrainian].
11. Zulauf, C., Colussi, J., Janzen, J. (2023, June 15). *An alternative look at the 2022–2023 corn and soybean markets: Red flags waving. farmdoc daily*. <https://farmdocdaily.illinois.edu/2023/06/an-alternative-look-at-the-2022-2023-corn-and-soybean-markets-red-flags-waving.html> (date of inquiry: 29.05.2026).
12. Li, L., Zhao, X., Wang, L. (2025). Sulfur-oxidizing bacteria: Potential contributors to high-quality protein production coupled with CO₂ utilization. *Environmental Science & Technology*, 59(22), 10781–10787. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c11669>

Шиян А.В., Монька Н.Я. Економічні та екологічні аспекти використання сірковмісних біопрепаратів у сучасному агровирибництві

Мета – комплексний аналіз економічних та екологічних аспектів застосування сірковмісних біопрепаратів в агровирибництві, оцінка їхнього впливу на біоремедіацію ґрунтів і формування нових джерел харчового білка.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконано на основі аналізу вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій, присвячених випуску сірковмісних біопрепаратів в агровирибництві. Вивчення потенціалу біоремедіації здійснювалося шляхом аналізу фізіолого-біохімічних механізмів взаємодії досліджуваних мікробів із організованими обґрунтуваннями та їх впливу на стресостійкість сільськогосподарських культур в умовах абіотичного та біотичного стресу. Синергетичний ефект сіркоокиснювальних мікроорганізмів у поєднанні з азотними добривами оцінюється з позицій оптимізації внутрішнього живлення рослин.

Інноваційний напрям дослідження передбачав аналіз науково-технічних перспектив використання сіркоокиснювальних бактерій як біотехнологічної основи для виробництва альтернативного харчового білка з урахуванням актуальних даних щодо ефективності відповідних біотехнологічних процесів. **Результати.** Хемолітоавтотрофні сіркоокиснювальні бактерії дедалі більше привертають увагу інвесторів і дослідників як потенційні промислові виробники одноклітинного білка (Single-Cell Protein, SCP). Ці мікроорганізми здатні використовувати відновлену сірку з промислових відходів як джерело енергії та безперервно засвоювати СО₂ у великих біореакторах. Завдяки цьому формується замкнений виробничий цикл: промислові викиди вуглекислого газу утилізуються, а натомість синтезується бактеріальна біомаса з високим вмістом незамінної амінокислоти метіоніну. Отриманий протеїн є цінною кормовою добавкою для тваринництва та птахівництва, що дозволяє суттєво знизити тиск на сільськогосподарські угіддя. **Висновки.** Незважаючи на те, що енергетична ефективність і економічна привабливість даного підходу наразі дещо поступаються традиційним технологіям виробництва білкової біомаси

на основі гетеротрофних бактерій і мікроводоростей, перспективи його розвитку залишаються значними. Вдосконалення метаболічних процесів та оптимізація конструкції біореакторів здатні докорінно змінити ситуацію, перетворивши сіркоокиснювальні мікроорганізми на ключовий елемент індустрії альтернативних білків у найближчі десятиліття.

Ключові слова: сірка, сталий розвиток, сіркоокиснювальні бактерії, агровирибництво, біопрепарат.

Shyian A.V., Monka N.Ya. Economic and ecological aspects of using sulfur-containing biopreparations in modern agricultural production

Purpose: to conduct a comprehensive analysis of the economic and environmental aspects of using sulphur-containing biological products in agricultural production, and to assess their impact on soil bioremediation and the development of new sources of dietary protein.

Methods. The study was conducted based on the analysis of domestic and foreign scientific publications devoted to the development of sulfur-containing biopreparations for use in agricultural production. The bioremediation potential was examined through an analysis of the physiological and biochemical mechanisms of interaction between the studied microorganisms and contaminated soils, as well as their effect on the stress tolerance of agricultural crops under abiotic and biotic stress conditions. The synergistic effect of sulfur-oxidizing microorganisms in combination with nitrogen fertilizers was evaluated from the perspective of optimizing nutrient uptake in plants.

The innovative direction of the study involved the analysis of scientific and technical prospects for the use of sulfur-oxidizing bacteria as a biotechnological basis for the production of alternative food protein, taking into account current data on the efficiency of the corresponding biotechnological processes.

Results. Chemolithoautotrophic sulphur-oxidising bacteria are attracting increasing attention from investors and researchers as potential industrial producers of single-cell protein (SCP). These microorganisms are capable of utilising reduced sulphur from industrial waste as an energy source and continuously assimilating CO₂ in large bioreactors. This creates a closed production cycle: industrial carbon dioxide emissions are utilised, whilst bacterial biomass with a high content of the essential amino acid methionine is synthesised in return.

The protein obtained is a valuable feed supplement for livestock and poultry farming, which helps to significantly reduce the pressure on agricultural land.

Conclusions. Although the energy efficiency and economic viability of this approach are currently somewhat inferior to traditional technologies for producing protein biomass based on heterotrophic bacteria and microalgae, its prospects for development remain considerable. Improvements to metabolic processes and optimisation of bioreactor design have the potential to radically change the situation, transforming sulphur-oxidising microorganisms into a key element of the alternative protein industry in the coming decades.

Key words: sulphur, sustainable development, sulphur-oxidising bacteria, agricultural production, biological product.

Дата першого надходження статті до видання: 02.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026