

ДАНКЕВИЧ Л. А. 
ЗАРУДНЯК М. І. 

Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України,
Україна, 03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 154
 ldankevich@ukr.net

ГЕТЕРОГЕННІСТЬ ПОПУЛЯЦІЇ ЗБУДНИКІВ БАКТЕРІАЛЬНИХ ХВОРОБ ГОРІХА ВОЛОСЬКОГО В УКРАЇНІ ЗА ЧУТЛИВІСТЮ ДО РІЗНИХ СПОЛУК МІДІ

Мета. Метою досліджень була оцінка гетерогенності популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні за чутливістю до різних сполук міді. **Методи.** У дослідженні використано мікробіологічні і статистичні методи досліджень. **Результати.** Виявлено гетерогенність популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні за чутливістю до різних сполук міді. Найбільш чутливим до всіх сполук міді є збудник бактеріального опіку, коричневого апікального некрозу та вертикального виразкового раку волоського горіха *Xanthomonas arboricola* pv. *juglandis*. Натомість поліфаги *Agrobacterium tumefaciens* (Smith et Townsend) Conn (рак коренів горіха волоського) та *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* (плямистість листя горіха волоського) мають менший рівень чутливості до різних хімічних сполук міді. Найбільш чутливими усі збудники виявилися до комбінації хлорокису міді (861 г/кг) та гідроксиду міді (236,64 г/л) і сульфату міді. Натомість збудники бактеріальних хвороб горіхів волоського є не чутливими до хлорокису міді (861 г/кг) та варіюють за чутливістю до фосфонату міді (250 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л). **Висновки.** Отримані нами результати є лише початковим кроком у дослідженнях гетерогенності популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні. Дослідження можуть бути корисними для аграріїв при розробці систем захисту насаджень горіха волоського.

Ключові слова: збудники бактеріальних хвороб горіха волоського, сполуки міді, гетерогенність популяції.

У природі рослини завжди перебувають під загрозою ураження шкідників та патогенів. Патогенні бактерії є однією з ключових причин хвороб різноманітних рослин, що призводить до негативного впливу на їх ріст та врожайність (Patyka et al., 2017). Використання міді є важливим аспектом для живих організмів. Завдяки легкому процесу перетворення між відновленою Cu(I) та окисленою Cu(II) з низьким споживанням енергії, мідь служить кофактором для багатьох ключових ферментів, які беруть участь у важливих біохімічних та фізіологічних процесах, включаючи транспорт електронів, реакцію на окисдаційний стрес, денітрифікацію, дихання та фотосинтез. Однак іони міді є токсичними при перевищенні порогового значення в клітинах. Механізми токсичності пояснюються утворенням високо реактивних гідроксильних радикалів, що впливають на такі біомолекули, як пептиди, ДНК та ліпіди. Надлишок міді також може зв'язуватися з додатковими ділянками в білках, порушуючи структуру білка та інактивуючи функцію шляхом витіснення нативних іонів металів (Fan et al., 2022). Організми розробили складні механізми стійкості для боротьби зі шкідливими реакціями, викликаними надлишком міді, одночасно забезпечуючи постачання для внутрішньоклітинних біологічних процесів, що потребують міді. У системі мікроорганізм-рослина мідь має неоднозначну роль. З одного боку показано, що іони міді використовуються рослинами-господарями для захисту від бактеріальних інфекцій, запускаючи імунні реакції шляхом активації захисних сигнальних



© 2026 Данкевич Л. А. Зарудняк М. І. This work is licensed under CC BY 4.0.
To view a copy of this license, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

шляхів. З іншого хімічні речовини на основі міді широко використовуються для боротьби з хворобами, спричиненими бактеріями (Fan et al., 2022, Cesari et al., 2017). Так, наприклад, бордоська суміш, є шостим у світі препаратом для рослинництва за продажем. Але завдяки широкому використанню препаратів на основі міді у фітопатогенних бактерій розвинулася стійкість до сполук даного металу за рахунок індуквання різних систем резистентності. З моменту першого відкриття у 1987 році механізму резистентності до міді *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* у багатьох фітопатогенних бактерій було виявлено генетично детерміновані системи стійкості до міді, що різняться розміром генів, генетичною та молекулярною регуляцією. Тобто, фітопатогенні бактерії розвинули різні механізми реакцій стійкості до міді через різні екологічні ніші існування, біологію та механізми взаємодії з рослиною (Fan et al., 2022, Cesari et al., 2017, Kolleh et al., 2024).

Тому метою наших досліджень була оцінка гетерогенності популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні за чутливістю до різних сполук міді.

Матеріали і методи

Відбір зразків уражених зразків дерев проводили з наладжень волоського горіха віком 5–40 років, розташованих у 13 областях України, що охоплюють природно-кліматичні зони Українського Полісся, Лісостепу та Степу. Об'єктами досліджень були ізольовані з різних клімато-географічних зон та попередньо ідентифіковані штами фітопатогенних бактерій (Dankevych, 2019, Dankevych et al., 2024). Зокрема, у дослідженнях використали наступні ізольовані штами фітопатогенних бактерій: *A. Agrobacterium tumefaciens* (Smith et Townsend) Conn 1gop, 3gop, 8gop; *Xanthomonas arboricola* pv. *juglandis* 1op, 3op, 1nut, 2 nut, 3 nut, 4 nut, 6 nut, 7 nut, 8 nut, 11 nut, 12 nut, 13 nut, 14 nut, 15 nut, 17 nut; *P. syringae* pv. *syringae* 4n, 5n, 5 nut, 9 nut, 10 nut, 16 nut. Для порівняння також у роботі використані колекційні та типові штами видів *A. tumefaciens*, *X. arboricola* pv. *juglandis* та *P. syringae* pv. *syringae* ізольовані як з горіха волоського, так і інших деревних культур. Для оцінки гетерогенності популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського використовували різні хімічні сполуки міді, а саме: сульфат міді (мідний купорос), гідроксид міді (770 г/кг), хлорокис міді (861 г/кг), комбі-

націю оксиду (239,36 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л), а також фосфонат міді (250 г/л). Сполуки міді використовували у дозах рекомендованих виробниками. Чутливість фітопатогенних бактерій до сполук міді здійснювали диск-дифузійним методом. На поверхню агаризованого живильного середовища наносили суцільний посів тест-культури, після чого розміщували стерильні паперові диски, просочені робочими розчинами досліджуваних препаратів. Робочі розчини готували безпосередньо перед використанням у концентраціях, рекомендованих виробниками для практичного застосування. Контрольні варіанти включали диски, просочені стерильною дистильованою водою. Чашки Петрі інкубували при температурі 26–28 °C протягом 24–48 год, після чого вимірювали діаметр зон затримки росту бактерій у міліметрах. Інтерпретацію результатів проводили за величиною зон інгібування: до 5 мм – відсутня чутливість, 5–10 мм – низька чутливість, 11–20 мм – середня чутливість, понад 20 мм – висока чутливість (Patyka et al., 2017). Статистичну достовірність отриманих результатів вираховували за допомогою методом найменшої істотної різниці (Patyka et al., 2017).

Результати та обговорення

Найбільш чутливими до різних форм міді виявився збудник бактеріального опіку, коричневого апікального некрозу та вертикального виразкового раку волоського горіха *X. arboricola* pv. *juglandis* (100% штамів). Натомість поліфаги, що здатні уражувати широке коло рослин господарів *A. tumefaciens* (рак коренів горіха волоського) (50% штамів) та *P. syringae* pv. *syringae* (плямистість листя горіха волоського) (100% штамів) мають менший рівень чутливості до різних хімічних сполук міді (рис.).

Слід також наголосити, що збудники бактеріальних хвороб горіха волоського різнилися за чутливістю до різних сполук міді. Так збудник бактеріального опіку, коричневого апікального некрозу та вертикального виразкового раку волоського горіха *X. arboricola* pv. *juglandis* виявився чутливим до комбінації оксиду (239,36 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л), гідроксиду міді (236,64 г/л) та сульфату міді (мідний купорос). Натомість даний збудник є нечутливим до фосфонату міді (250 г/л) та хлорокису міді (861 г/кг). Зокрема, 64% штамів *X. arboricola* pv. *juglandis* є низькочутливими, а 36% середньочутлими до комбінації оксиду

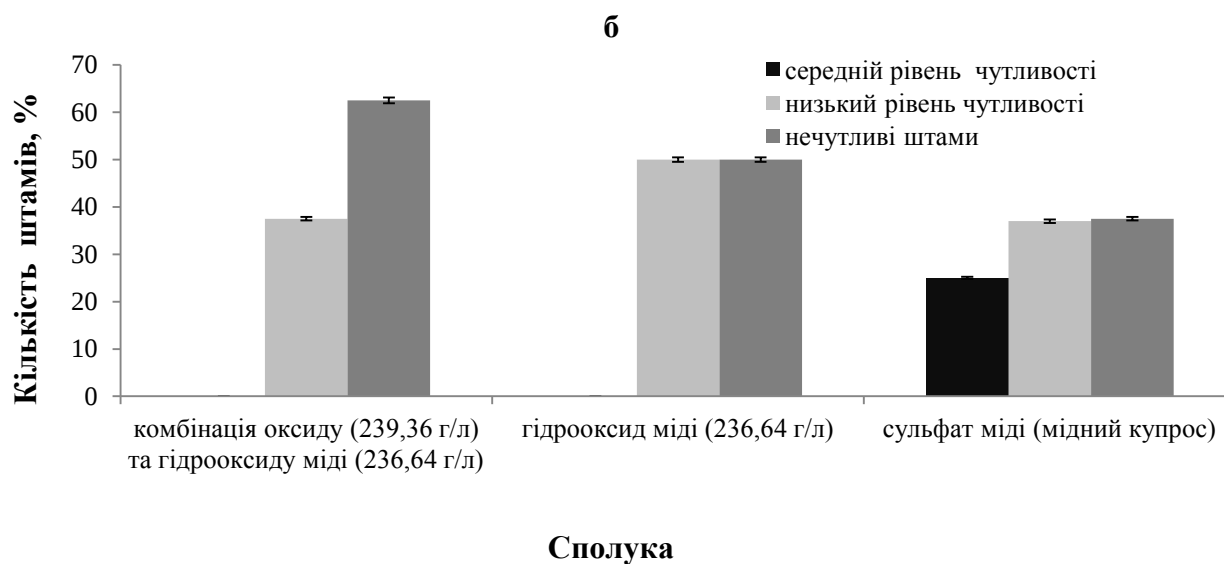
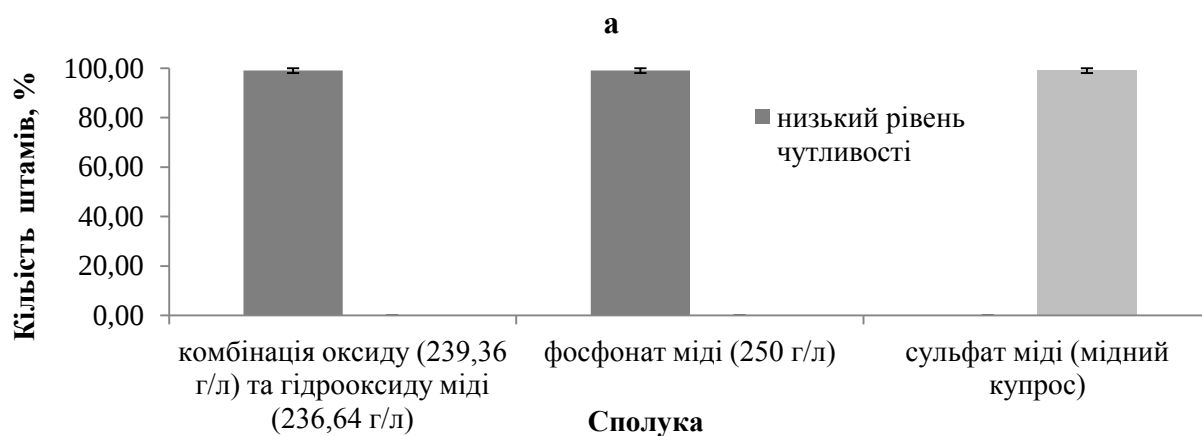
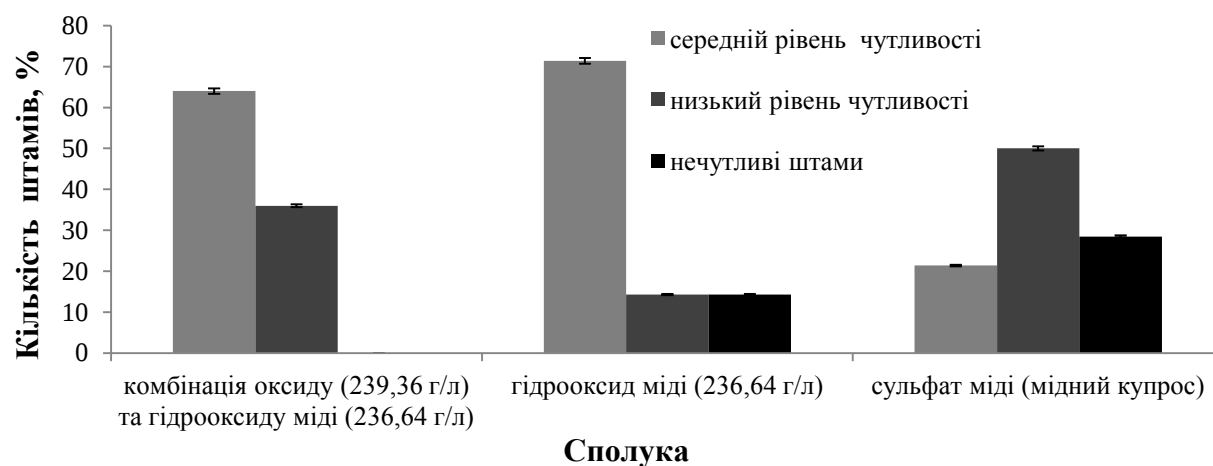


Рис. Чутливість популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського до мідьвмісних сполук: а – *X. arboricola* pv. *juglandis*, б – *P. syringae* pv. *syringae*, в – *A. tumefaciens*.

(239,36 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л); 14,3% штамів *X. arboricola* pv. *juglandis* є нечутливими, 14,3% – низькочутливими, а 71,4% – середньочутливими до гідроксиду міді (236,64 г/л); 28,5% штамів *X. arboricola* pv. *juglandis* є нечутливими, 21,4% – низькочутливими, а 50% штамів середньочутливими до сульфату міді (мідний купорос). Усі штами *X. arboricola* pv. *juglandis* є нечутливими до фосфонату міді (250 г/л) та хлорокису міді (861 г/кг) (рис. 1 а).

Натомість збудник плямистості листя горіха волоського *P. syringae* pv. *syringae* є нечутливим до дії хлорокису міді (861 г/кг) та гідроксиду міді (236,64 г/л). Всі штами *P. syringae* pv. *syringae* (100%) є низькочутливими до комбінації оксиду (239,36 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л) і гідроксиду міді (236,64 г/л). Популяція збудника плямистості листя горіха волоського в Україні (100%) є середньочутливою до сульфату міді (мідний купорос) (рис. 1 б).

Цікаво, що характер чутливості збудника бактеріального раку коренів горіха волоського *A. tumefaciens* до мідьвмісних препаратів є подібним до аналогічного у збудника бактеріального опіку, коричневого апікального некрозу та вертикального виразкового раку волоського горіха *X. arboricola* pv. *juglandis*. Так популяція збудника бактеріального раку коренів горіха волоського *A. tumefaciens* є нечутливою до фосфонату міді (250 г/л) та хлорокису міді (861 г/кг). Також виявлено, що 62,5% штамів *A. tumefaciens* є нечутливими, а 37,5% штамів *A. tumefaciens* є низькочутливими до комбінації оксиду (239,36 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л); 50% є нечутливими і така ж кількість низькочутливими до гідроксиду міді (236,64 г/л). Найбільш чутливим збудник бактеріального раку коренів горіха волоського *A. tumefaciens* виявився до сульфату міді (мідний купорос). Так по 37% штамів *A. tumefaciens* є нечутливими і стільки ж низькочутливими, а 25% – середньочутливими до сульфату міді (рис. 1 в).

Така мозаїчність реакції узгоджується з уявленнями про фенотипову гетерогенність фітопатогенних бактерій та наявність у популяціях субпопуляцій із різною стійкістю до стресорів, а також із даними про багаторічний селекційний тиск мідьвмісних сполук в агроценозах і пов'язане з цим зниження ефективності окремих форм міді. Додатково відомі механізми бактеріальної толерантності до міді та мобільність генетичних детермінант резистентності можуть пояснювати як відмінності між препара-

тами, так і відмінності між штамми в межах одного виду (Fan et al., 2022). З літератури відомо, що у *P. syringae* pv. *syringae* гени (copABCD) відповідальні за стійкість до міді присутні в нуклеоїдній ДНК та подібні гени детектовано в плазміді розміром 62 kb. Крім того, у ДНК нуклеоїду даного поліфагу виявлено транспозон Tn7, що містить гени стійкості до міді (COARS) (Cesari et al., 2017). У фітопатогенних бактерій роду *Xanthomonas* було виявлено три різні системи стійкості до міді. Зокрема, охарактеризовано добре відому мідь-індуковану хромосомну систему cohABCD та систему copLAB локалізовану на плазміді. Крім того, у окремих представників даного роду *Xanthomonas*, а саме *X. citri* subsp. *citri*, *X. gardneri* та *X. euvesicatoria* також мають локалізовану на плазміді систему cus-AB/smmD, що також пов'язують зі стійкістю до міді (Fan et al., 2022, Kolleh et al., 2024). Згідно з літературними даними, *X. arboricola* pv. *juglandis* містить лише нуклеоїд-локалізований комплекс генів cohABCD та гени copLAB, що мають плазмідне розташування (Fan et al., 2022, Cesari et al., 2017, Kolleh et al., 2024). Отже, різна локалізація та наявність різних наборів генетичних детермінант відповідальних за стійкість фітопатогенних бактерій до міді забезпечує різноманітність їх стійкості до мідьвмісних сполук. Крім того, виявлення мідьрезистентних штамів підтверджує глобальну тенденцію зниження ефективності традиційних схем хімічного контролю. Це створює серйозні виклики для горіхівництва та потребує впровадження нових підходів до захисту багаторічних насаджень.

Висновки

Отже, виявлено гетерогенність популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні за чутливістю до різних сполук міді. Найбільш чутливими усі збудники виявилися до комбінації хлорокису міді (861 г/кг) та гідроксиду міді (236,64 г/л) та сульфату міді. Натомість збудники бактеріальних хвороб горіха волоського є нечутливими до хлорокису міді (861 г/кг) та варіюють за чутливістю до фосфонату міді (250 г/л) та гідроксиду міді (236,64 г/л). Найбільш чутливим до всіх сполук міді є збудник бактеріального опіку, коричневого апікального некрозу та вертикального виразкового раку волоського горіха *X. arboricola* pv. *juglandis*. Натомість поліфаги *A. tumefaciens* (рак коренів горіха волоського) та *P. syringae* pv. *syringae* (плямистість листя горіха волоського)

мають менший рівень чутливості до різних хімічних сполук міді. Отримані нами результати є лише початковим кроком у дослідженнях гетерогенності популяції збудників бактеріальних хвороб горіха волоського в Україні. Дослідження можуть бути корисними для аграріїв при

розробці систем захисту насаджень горіха волоського.

Інформація про фінансову підтримку, подяки: відсутня.

Конфлікт інтересів: автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Список використаних джерел

1. Cesari E., Marocchi F., L'Aurora A., Pucci N., Scala V., Loreti S., Scortichini M. Occurrence of copper-resistant *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* strains isolated from rain and kiwifruit orchards also infected by *P. s.* pv. *actinidiae*. *European Journal of Plant Pathology*. 2017. Vol. 149, No. 4. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10658-017-1246-1>.
2. Dankevych L. A. Identification of causative agents of brown bacterial spotting of lupine by the presence of the syringomycin secretion gene (*syr D*). *Factors of experimental evolution of organisms*. 2019. Vol. 25. P. 122–125. <https://doi.org/10.7124/FEEO.v25.1151>. [in Ukrainian]
3. Dankevych L. A., Zarudniak M. I., Patyka V. P., Dankevych A. E., Mychnik F. V. Phenotypical characteristics of walnut's (*Juglans* sp.) bacterial diseases agent. *Mikrobiolohichniy Zhurnal*. 2024. Vol. 86, No. 5. P. 20–31. <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.05.020>.
4. Fan X., Saleem T., Zou H. Copper resistance mechanisms in plant pathogenic bacteria. *Phytopathologia Mediterranea*. 2022. Vol. 61, No. 1 P. 129–138. <https://doi.org/10.36253/phyto-13282>.
5. Kolleh R. L., Basim H. Investigation of resistance of some lettuce varieties against lettuce bacterial leaf spot disease agent *Xanthomonas hortorum* pv. *vitians* and the susceptibility of the disease agent to copper. *Black sea journal of agriculture*. 2024. Vol. 7, No. 6. P. 603–612. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1501121>.
6. Patyka V. P., Pasichnik L. A., Gvozdiak R. I., Petrychenko V. F., Korniyuchuk O. V., Kalinichenko A. V., Butsenko L. M., Zhytkovich N. V., Dankevich L. A., Litvinchuk O. O., Kyrylenko L. V., Gulyaeva G. B., Hnatyuk T. T., Kharkhota M. A., Tomashuk O. V. Phytopathogenic bacteria. Methods. Vinnytsia : Vindruk LLC, 2017. 432 p. [in Ukrainian]

DANKEVYCH L. A., ZARUDNIAK M. I.

Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, 03143, Kyiv, Zabolotnogo str., 154

POPULATION HETEROGENEITY OF WALNUT'S BACTERIAL DISEASES AGENT IN UKRAINE TO SENSITIVITY TO VARIOUS COPPER COMPOUNDS

Aim. The investigation of population heterogeneity of walnut's bacterial diseases agents in Ukraine to sensitivity to various copper compounds. **Methods.** The studies used microbiological and statistical research methods. **Results.** The population heterogeneity of walnut's bacterial diseases agents in Ukraine to sensitivity to various copper compounds was revealed. The most sensitive to all copper compounds is the pathogen of bacterial burn, brown apical necrosis and vertical ulcerative cancer of walnut *Xanthomonas arboricola* pv. *juglandis*. In contrast, the polyphages *Agrobacterium tumefaciens* (walnut root cancer) and *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* (walnut leaf spot) have a lower level of sensitivity to various chemical copper compounds. All bacterial diseases agents were most sensitive to the combination of copper oxychloride (861 g/kg) and copper hydroxide (236.64 g/l) and copper sulfate. In contrast, pathogenic for walnut bacteria are not sensitive to copper oxychloride (861 g/kg) and vary by sensitivity to copper phosphonate (250 g/l) and copper hydroxide (236.64 g/l). **Conclusions.** The results obtained by us are only an initial step in studying the population heterogeneity of walnut's bacterial diseases agents in Ukraine. The research may be useful for farmers in developing protection systems for walnut plantations.

Keywords: walnut's bacterial diseases agents, copper compounds, population heterogeneity.

Надходження статті: 1 березня 2026 р.

Прийняття до друку після рецензування: 20 квітня 2026 р.

Публікація: 30 червня 2026 р.