

ДИНАМІКА ПОШИРЕННЯ *CUCUMBER MOSAIC VIRUS* В АГРОЦЕНОЗАХ ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР ЗА КОНТРАСТНИХ ПОГОДНИХ УМОВ

В.О. Цвігун, С.О. Мазур, А.С. Левішко, І.І. Гуменюк, О.Ю. Колодяжний

Інститут агроєкології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)

e-mail: vika-natceovich@ukr.net; ORCID: 0000-0002-9517-9810

e-mail: mazurlanalana@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5025-0134

e-mail: alodua2@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4037-1730

e-mail: gumenyuk_ir@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6692-0171

e-mail: sashoknet.sk@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5359-1738

Дослідження зосереджено на аналізі динаміки поширення *Cucumber mosaic virus* (ВМ) в агроєкосистемах овочевих культур України за впливу кліматичних змін. ВМ є одним із найпоширеніших та економічно значущих фітовірусів, що уражує понад 1200 видів рослин, включаючи огірки, помідори, перець та кабачки, спричиняючи втрати врожаю до 20–50%. Проведений екологічний моніторинг у 2021–2025 рр. виявив значне поширення ВМ в агроценозах овочевих культур. Рівень ураження варіював від 19% у 2021 р. до пікових 40% у 2024 р. Найвища інцидентність (15–25%) спостерігалася у південних регіонах, де вищі температури та триваліші періоди посухи сприяли активності вірусу, тоді як у північних регіонах показник був значно нижчим (8–12%). Симптоматика інфекції включала світло-зелену (35,3%) та жовто-зелену (25,1%) мозаїку, хлорози (21,6%), пухирчасті деформації листків (9,7%) та деколоризацію плодів, що супроводжувалося зниженням якості насіння. Кореляційний аналіз продемонстрував сильну позитивну кореляцію ($r=0,86$) між середньорічною температурою та поширеністю ВМ, та сильну негативну кореляцію ($r=-0,94$) з кількістю опадів. Екстремальні погодні умови 2024 р., зокрема рекордне потепління ($+1,55^{\circ}\text{C}$) та підвищена вологість, зумовили масове поширення вірусу через активність векторів, як-от *Myzus persicae*. У 2025 р. інцидентність знизилася до 31% завдяки застосуванню агротехнічних заходів. Зафіксовані кліматичні зміни, зокрема потепління на $1,6^{\circ}\text{C}$ у Поліссі та нестабільність опадів, сприяли продовженню вегетаційного періоду та інвазії векторів. У центральних регіонах із родючими чорноземами (SOC 2,0–3,5%) відбувалася інтенсивна контактна трансмісія, тоді як менш родючі ґрунти (SOC 1,0–2,0%) підвищували сприйнятливість рослин до вірусного стресу. 38% інфікованих рослин були безсимптомними носіями, що підкреслює критичну потребу в молекулярній діагностиці для ефективного моніторингу.

Ключові слова: вірусні інфекції рослин, *Cisurbitaceae*, моніторинг, чинники навколишнього природного середовища, погодно-кліматичні зміни, вміст органічного вуглецю, фітосанітарні ризики.

ВСТУП

Cucumber mosaic virus (CMV), що належить до роду *Cuscutovirus*, є одним із найпоширеніших і економічно значущих фітовірусів, здатних інфікувати понад 1200 видів рослин, включаючи ключові овочеві культури, як-от огірки, помідори, перець та кабачки. Основними шляхами поширення CMV є трансмісія через соках-векторів, зокрема попелиць, а також насіннева пе-

редача та наявність природних резервуарів серед сегетальної рослинності. У контексті глобальних кліматичних змін, що характеризуються підвищенням середньої температури, збільшенням концентрації CO_2 та змінами в режимах опадів, епідеміологія зазначеного вірусу зазнає значних трансформацій [1; 2]. Підвищені температури (20–25°C) сприяють швидшій репродукції векторів, розширенню їх ареалів і посиленню інцидентності вірусних інфекцій, тоді як посухи та високі рівні CO_2 послаблюють

імунні механізми рослин, зокрема РНК-інтерференції. Ці чинники створюють нові виклики для агроценозів овочевих культур, погіршуючи продовольчу безпеку в регіонах із інтенсивним землеробством [3]. Дослідження динаміки поширення вірусу мозаїки огірка в агроекосистемах овочевих культур та інтеграція даних про кліматичні чинники та біологічні особливості вірусу відкриває можливості для розробки стійких агротехнологій, спрямованих на мінімізацію економічних та екологічних ризиків.

Метою дослідження є аналіз динаміки поширення вірусу огіркової мозаїки в агроценозах овочевих культур України та оцінка впливу кліматичних змін на його епідеміологію.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Зміна клімату є одним із ключових викликів сучасності, що впливає на сільськогосподарське виробництво через зміни температурних режимів, опадів, а також динаміки популяцій комах-переносників та біорізноманіття. Фітовіруси, як неклітинні інфекційні агенти, що уражують рослини, становлять значну загрозу для агроценозів, спричиняючи втрати врожаю до 40% [4].

За останні п'ять років клімат України став більш посушливим, середня річна температура повітря в Україні зросла на 0,4–0,6°C та залишається стабільно вищою за кліматичну норму, із піками у 2020 та 2024 рр. [5; 6]. Підвищення середньорічної температури сприяло розширенню ареалів комах-переносників, зокрема попелиць, цикадок та трипсів. Дослідження Jones показало, що посилення температури на 1,0°C збільшує популяції комах-переносників на 15–20%, що прискорює передачу вірусів, як-от *Tobacco mosaic virus (TMV)* і *Tomato yellow leaf curl virus (TYLCV)* [7]. В Україні зростання ураження пшениці *Barley stripe mosaic virus (BSMV)* на 25% пов'язано з подовженням сезону активності попелиць [8].

Cucumber mosaic virus поширюється неперсистентним типом передачі за участю

понад 80 видів попелиць родини *Aphididae*, серед яких найефективнішими векторами є *Myzus persicae* та *Aphis gossypii*. Насіннева передача, хоча менш ефективна (частота 1–10%), проте відіграє важливу роль у збереженні вірусу між сезонами, особливо в культурах, як-от гарбузові та бобові. Експериментальні дані встановили, що за температури 20–25°C репродукція попелиць, як-от *Myzus persicae*, зростає на 20–30%, а їхні ареали розширюються на північ. Сегетальні рослини, такі як *Amaranthus* spp. і *Chenopodium* spp., слугують резервуарами, підтримуючи інфекцію в агроекосистемах [3; 4; 9]. Це спричиняє збільшення трапляння *CMV* у регіонах України, зокрема в центральних і південних областях, де спостерігається посилення ураження огірків і томатів на 15–25% [8]. За температури 30–37°C цей вірус демонструє підвищену ефективність реплікації в рослинах-господарях. Австралійськими дослідниками показано, що за таких умов вірусні титри в тканинах рослин зростають удвічі–втричі через прискорення синтезу вірусної РНК і послаблення захисних механізмів рослин, зокрема РНК-інтерференції [10].

Посухи, які збільшилися в південних регіонах України через зменшення опадів на 10–15%, знижують ефективність РНК-інтерференції — ключового механізму проти-вірусного захисту рослин. Посуха викликає стресові умови, що пригнічують експресію генів, відповідальних за деградацію вірусної РНК, яке сприяє накопиченню *CMV* у рослинах. Підвищення концентрації CO₂ в атмосфері, яке сягало 420 ppm у 2023 р., впливає на фізіологію рослин і вірусну динаміку. Дослідження Scandolera виявило, що підвищений CO₂ (500–600 ppm) збільшує вірусні титри *CMV* у рослинах на 10–20% через зміни у фотосинтетичній активності та метаболізмі вуглеводів. Однак комбіновані стреси (високі температури та CO₂) можуть мати вірус-специфічні ефекти, наприклад, зменшення ефективності передачі вірусу попелицями через зміни хімічного складу рослин [11].

В Європі кліматичні зміни спричинили спалахи *CMV*, пов'язані з сателітними

РНК, які посилюють патогенність вірусу, викликаючи некроз плодів і листків [12]. Аналогічні епідемічні спалахи в Україні були зареєстровані в Одеській обл. у 2022–2023 рр. Згідно з даними моніторингу, в цей період було зафіксовано збільшення рівня ураження помідорів і перцю на 20%. Це було зумовлено синергетичним впливом двох чинників: поєднання посушливих періодів та підвищеної активності популяцій попелиць-переносників [8].

Зміни у фенології рослин-господарів, спричинені потеплінням, також підвищують їхню вразливість. Наприклад, зміщення періодів цвітіння кукурудзи та помідорів збігається з піками активності комах-переносників, що посилює епідеміологічний тиск [9]. У південних регіонах України (Одеська, Херсонська обл.) посухи, які збільшилися через зменшення опадів на 10–15%, створюють стресові умови для рослин, знижуючи їхній імунний захист проти вірусів.

Кліматичні зміни сприяють появі нових штамів фітовірусів через мутації та генетичну рекомбінацію. Дослідження Tsai продемонструвало зростання генетичної різноманітності *CMV* унаслідок ринкового обміну насіннєвим матеріалом та змін біорізноманіття [10]. Воєнний конфлікт, що розпочався в 2022 р., спричинив логістичні та економічні обмеження, які негативно позначилися на доступі до високоякісного посівного матеріалу. Це, своєю чергою, зумовило підвищення ризиків інтродукції та поширення патогенів, які передаються через насіння.

На сьогодні ключовим інструментом для прогнозування спалахів вірусних інфекцій позиціонується розробка систем раннього попередження на основі дистанційного зондування та кліматичних моделей. Існують дослідження, що описують використання супутникових даних і кліматичних моделей для моніторингу патогенів у агроценозах, які в перспективі можуть бути адаптовано для фітовірусів та дасть можливість виявляти зміни в рослинному покриві, пов'язані з вірусними інфекціями, й прогнозувати ризики на основі клі-

матичних параметрів, як-от температура та вологість [14]. В Україні впровадження таких систем ускладнено через недостатню цифрову інфраструктуру та пошкодження метеорологічних станцій унаслідок війни, оскільки лише 30% метеостанцій в Україні функціонують на повну потужність після 2022 р. [15].

Тому, зміни погодного-кліматичних умов, як-от підвищення середньорічних температур, зміна режиму опадів та зростання частоти екстремальних погодних явищ, створюють нові умови для вірусів та їхніх переносників, зокрема попелиць. Це призводить до інтенсивнішого поширення *CMV*, що є одним із найпоширеніших вірусів рослин і вражає стратегічно важливі овочеві культури. Інфікування цим вірусом спричиняє значні економічні втрати через зниження врожайності та погіршення якості продукції, що створює пряму загрозу продовольчій безпеці.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для оцінки поширення *Cucumber mosaic virus* на овочевих культурах в Україні було проведено комплексне дослідження протягом вегетаційних сезонів 2021–2025 рр. Зразки рослин відбиралися в агроценозах природно-кліматичних зон України: Полісся (дерново-підзолистий та сірий лісовий ґрунт із низьким вмістом гумусу (1,5–2,5%), органічний вуглець (SOC) ~1,5–2,0%); Лісостепу (чорнозем типовий зі вмістом гумусу 3–4%, SOC ~1,5–3,0%); Степу (чорнозем типовий зі вмістом гумусу 2–3%, SOC ~1,7–3,2%).

За період 2021–2025 рр. на території України спостерігалася тенденція до потепління, з рекордно теплим 2024 р. (середньорічна температура ~11,2°C, що на 2–3°C вище історичної норми ~ 8,4°C). Опади були варіабельними: середньорічні значення ~500–600 мм, з тенденцією до зменшення в 2023–2024 рр. (505 мм у 2024 р., порівняно з 597 мм у 2023 р.). Літо 2024 р. було найспекотнішим (середня температура 22,4°C). Зими стали м'якшими та з меншим сніговим покривом.

Для детекції вірусу рослинний матеріал (листки, плоди) гомогенізували у 0,1 М фосфатно-сольовому буфері (рН 7,4) у співвідношенні 1:2. Очистку від рослинних компонентів проводили центрифугуванням у режимі 5000 об./хв упродовж 20 хв за +4°C на центрифугі PC-6 [16]. Зразки на наявність вірусних антигенів аналізували імуноферментним аналізом (ІФА) у модифікаціях сандвіч та непрямий [17]. Для детекції вірусних антигенів у ІФА використовували тест-системи виробництва Loewe (Німеччина). Результати реєстрували на рідері Termo Labsystems Opsis MR (США) із програмним забезпеченням Duxnux Revelation Quicklink за довжини хвиль 405/630 нм. Обробку даних оптичної густини зразків здійснювали методом описової статистики, визначаючи середні та стандартні відхилення даних [18]. Порогове значення оптичної густини, яке відрізняє позитивні результати ферментативної реакції від значення фону, визначали для кожного планшета окремо та згідно з рекомендаціями [19].

Вміст органічного вуглецю в ґрунті (SOC) виявляли у верхньому шарі 0–20 см методом сухого спалювання з подальшим застосуванням спектрофотометрії (спектрофотометр 102 UV) [20].

Відсоток інфікованості *Cucumber mosaic virus* (CMV) для кожної області розраховували за формулою:

$$BI = (КПЗ / ЗКЗ) \times 100, \quad (1)$$

де BI — % інфікування; КПЗ — кількість позитивних зразків; ЗКЗ — загальна кількість зразків.

Середнє значення (M) та стандартне відхилення (SD) частки інфікованих зразків обчислювали за стандартними формулами для біноміальних пропорцій. 95% довірчий інтервал (95% ДІ) для біноміальних пропорцій виконували за модифікованим методом Вілсона з поправкою на безперервність.

Коефіцієнт варіації (CV , %) розраховували як

$$CV = (SD / M) \times 100. \quad (2)$$

Для визначення кількісної оцінки впливу абіотичних та біотичних чинників на вираженість симптомів використано коефіцієнт екологічної залежності (K_{ez}), модифікований для вірусних інфекцій рослин [21].

Кореляційну матрицю будували за коефіцієнтом лінійної кореляції Пірсона (r), де застосовували значення чинника довкілля, поширеність CMV та кількість років дослідження. Статистичну значущість оцінювали за t -критерієм Стюдента. Критичне значення за $p < 0,05$ та $df = 3$ становило 3,18. Усі представлені в статті коефіцієнти ($r = 0,86$; $r = -0,94$) є статистично значущими ($p < 0,05$). Для оцінки зв'язків між рівнем інфікування CMV та абіотичними чинниками проводили непараметричний кореляційний аналіз із використанням коефіцієнта рангової кореляції Спірмена. Статистичну обробку виконували у програмних пакетах StatSoft Statistica 10.3.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Зафіксовані зміни клімату в Україні, що проявляються в аномальному зростанні температури, мають безпосередній вплив на екосистеми, включно з аграрним сектором. Ці нові кліматичні умови створюють сприятливе середовище для біологічних агентів, які раніше не були типовими для певних регіонів. Аналіз погодно-кліматичних умов України у період 2021–2025 рр. засвідчив, що температурний режим Полісся характеризується найвищими темпами потепління в Україні (на 1,6°C) із нерівномірністю зволоження, що сприяє подовженню вегетаційного періоду (на 7–10 діб) та розвитку інвазії нових видів (наприклад, *Myzus persicae*, *Aphis fabae*, *Hyalopterus pruni*). Зафіксовані кліматичні зміни, включаючи коливання температур та опадів, безпосередньо впливають на агро-екосистеми, створюючи сприятливі умови для поширення патогенів. Ці екстремальні погодні умови змінюють епідеміологічну ситуацію, роблячи агроценози більш вразливими до вірусних інфекцій. Тому, існує пряма кореляція між кліматичними

змінами та динамікою поширення вірусів, зокрема і *CMV*, в овочевих культурах. Наслідком цих кліматичних змін є зростання інтенсивності вірусних захворювань, що безпосередньо впливає на аграрне виробництво.

Встановлено, що частота ураження рослин овочевих культур *CMV* коливалася залежно від регіону та кліматичних умов. У середньому, рівень інфікування *CMV* становив 15–25% у південних регіонах України, де спостерігалися вищі температури та триваліші періоди посухи. У північних регіонах цей показник був нижчим, у межах 8–12%.

На рослинах родини *Cucurbitaceae* симптоми захворювання були через 30–45 діб після посіву, у період бутонізації. Перші ознаки хвороби проявлялися на молодих листках у вигляді жовтуватих плям та по-світління тканини вздовж головних жилок. У подальшому на рослинах розвивалися симптоми жовтої або зеленої системної мозаїки, з'являлася деформація листків та плодів (рис. 1).

На листових пластинках рослин спостерігалися різноманітні патологічні зміни, що свідчать про вірусні ураження. Зокрема, відмічено різні типи мозаїк, які варіювали як за забарвленням, так і за розміщенням. За забарвленням мозаїки поділялися на світло-зелені (35,3%) та жовто-зелені (25,1%). За розташуванням на листовій пластинці розрізняли прижилкову (7,8%) та міжжилкову мозаїку (3,2%). Також на листках часто виявляли хлорози (21,6%) та деформації листової пластинки. Серед деформацій відзначалися пухирчасті здуття (9,7%), смуги вздовж жилок (5,9%) та значні зміни форми листка, включаючи його нитковидність (2,3%). Ці симптоми вказують на комплексне ураження рослин, ймовірно, спричинено вірусними патогенами (рис. 2). На плодах рослин родини *Cucurbitaceae*, уражених вірусами, спостерігається чітко виражена деколоризація та слабка деформація. Уражені рослини зазвичай продукують меншу кількість насіння, яке може бути деформованим, а утворені плоди характеризуються тонкою шкіркою.



а



б

Рис. 1. Симптоми вірусної етіології на овочевих культурах:

а — темно-зелена прижилкова мозаїка на листовій пластинці *Cucumis sativus* L.; б — жовто-зелена мозаїка листової пластинки та пухирчасте здуття на шкірці плоду *Cucumis sativus* L.

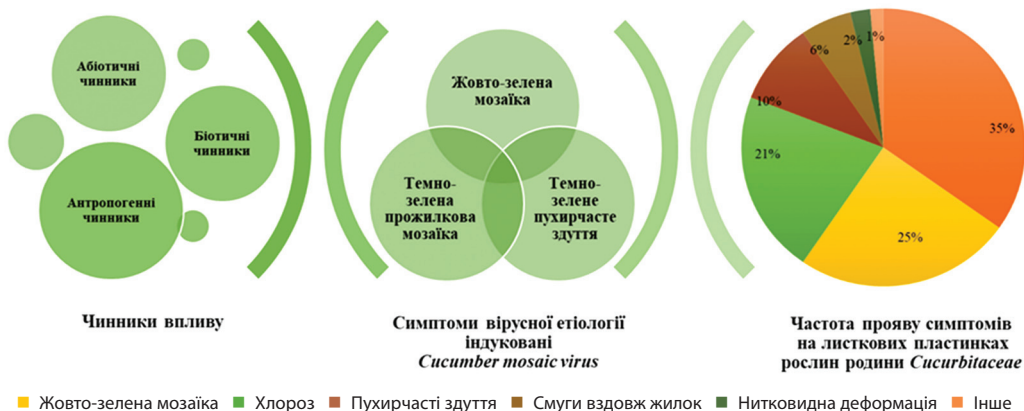


Рис. 2. Частота трапляння симптомів ураження на листових пластинках та плодах рослин *Cucurbitaceae* індуковані *Cucumber mosaic virus*

Результати показали, що 62% рослин мали видимі симптоми вірусного ураження, тоді як 38% залишалися зовні неушкодженими, але могли бути безсимптомними носіями.

Отримані результати підтверджують, що вірусна інфекція не завжди має видимі прояви, а частина уражених рослин є безсимптомними носіями. Цей факт ускладнює своєчасну діагностику та боротьбу з вірусом, адже для повного розуміння епідеміологічної ситуації необхідно враховувати не лише клінічні симптоми, а й вплив зовнішніх чинників. Тому дослідження було доповнено аналізом залежності прояву вірусних симптомів від умов навколишнього середовища. Для повноцінного аналізу епідеміологічної ситуації необхідно враховувати не лише візуальні

прояви, а й вплив зовнішніх екологічних чинників. З цією метою було проведено оцінку залежності вираженості вірусних симптомів від умов вирощування за допомогою коефіцієнта екологічної залежності, який включає температуру, вологість і наявність супутніх інфекцій. У дослідженні середня вираженість симптомів, оцінена за шкалою інтенсивності проявів (наприклад, мозаїки, хлорозів, деформацій), сягала 3,2, що вказує на помірний рівень ураження. Інтегральний показник екологічних умов, розрахований у діапазоні від 0 до 1, досяг значення 0,75, що відображає значний, але не максимальний вплив температури, вологості та супутніх інфекцій на прояв симптомів *CMV* (табл. 1).

Симптоми ураження рослин можуть мати різне походження. Тому подальші

Таблиця 1. Значення коефіцієнта екологічної залежності та вираженості симптомів *CMV*

Область	Інтегральний $K_{\text{ез}}$	Вираженість симптомів (бали, $M \pm SD$)	Кореляція (r Спірмена) $K_{\text{ез}} \leftrightarrow$ симптоми
Полтавська	0,81	$3,6 \pm 0,5$	0,89
Вінницька	0,78	$3,4 \pm 0,6$	0,87
Київська	0,76	$3,3 \pm 0,5$	0,91
Черкаська	0,77	$3,3 \pm 0,7$	0,85
Кіровоградська	0,74	$3,1 \pm 0,6$	0,88
Житомирська	0,71	$2,9 \pm 0,5$	0,83
Львівська	0,68	$2,7 \pm 0,6$	0,86
Середнє	$0,75 \pm 0,04$	$3,2 \pm 0,6$	$0,87 (p < 0,001)$

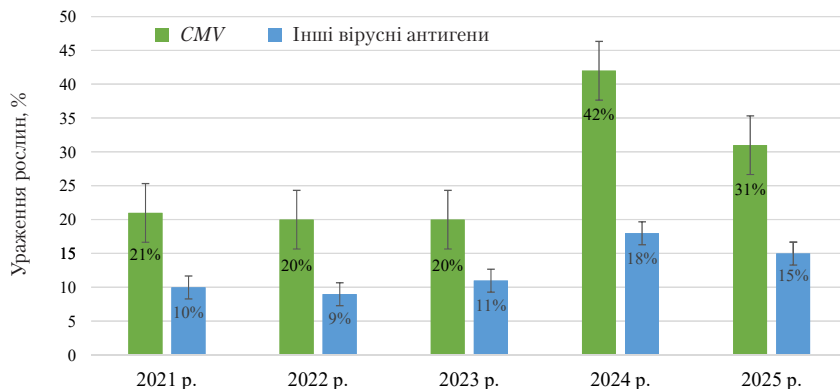


Рис. 3. Частота виявлення вірусних антигенів ІФА методом

дослідження зосередилися на специфічній детекції вірусу, де було використано імуноферментний аналіз (ІФА) (рис. 3).

У 2021 р. *CMV* було ідентифіковано в 21% проаналізованих зразків, зібраних з агроценозів Полтавської, Вінницької, Київської, Черкаської та Одеської обл. Домінантними ураженими культурами виявилися представники родини *Cucurbitaceae*, зокрема огірки, гарбузи, кабачки, цукіні та дині. Ці регіони характеризуються переважно чорноземними ґрунтами з високим вмістом органічного вуглецю (SOC до 2,5–3,2% у верхньому шарі), що забезпечує оптимальні умови для зростання культур, але водночас сприяє формуванню густих посівів, полегшуючи трансмісію вірусу. Аналіз погодно-кліматичних умов 2021 р. вказує на помірне потепління (середньорічна температура на 0,5–1,0°C вище норми в центральних областях), поєднано з підвищеною вологістю навесні та влітку (аномалії опадів +10–15% у Полтавській та Вінницькій обл.), що стимулювало активне розмноження попелиць — первинних векторів *CMV*. У ґрунтах із високою родючістю, як чорноземи Полтавщини та Вінниччини, рослини демонструють інтенсивний ріст, але за умов теплої вологої клімату (температура 20–25°C, відносна вологість >60%) популяції попелиць зростають експоненційно, зумовлюючи швидке поширення вірусу. Тому, дослідження показало, що *CMV* значно поширився в

агроценозах України у 2021 р., особливо в Полтавській та Вінницькій обл., де він уразив переважно представників родини гарбузових. Цьому сприяли відповідні кліматичні умови, зокрема тепла та волога погода, що зумовило значне зростання популяцій попелиць, основних переносників вірусу (табл. 2).

У 2022 р. в Україні спостерігалось зниження поширеності *CMV* порівняно з 2021 р., що частково пояснюється впровадженням агротехнічних заходів. У 2023 р. встановлено наявність антигенів *CMV* у 20% перевірених зразків. Уражені *CMV* рослини ідентифіковано у Вінницькій, Полтавській, Київській та Рівненській обл. на представниках родини *Cucurbitaceae* — зокрема на кабачках, огірках та гарбузах. Окрім того, на зменшення кількості уражених рослин вплинули кліматичні чинники: сухіше літо в центральних областях пригнічувало розмноження попелиць — основних переносників вірусу.

У 2024 р. зареєстровано різке зростання рівня інфікування *CMV* — до 40% обстежених зразків, із розширенням ареалу на агроценози Житомирської, Полтавської, Київської, Львівської, Вінницької, Рівненської, Черкаської, Одеської та Кіровоградської обл. (табл. 3).

Це загострення епізоотичної ситуації, ймовірно, обумовлена рекордним глобальним потеплінням (аномалія +1,55°C, з літньою аномалією +5,96°C у Східній Європі,

Таблиця 2. Поширення *Cucumber mosaic virus* (CMV) в агроценозах України в 2021 р. за даними імуноферментного аналізу (ІФА)

Область	Кількість зразків	Позитивних на CMV	Інфікованість, % ($M \pm SD$)	95% ДІ (%)	CV, %	SOC, %	Середньорічна температура 2021 р. (°C)	Аномалія температури відносно норми	Аномалія опадів весна–літо 2021 (%)
Полтавська	180	52	28,89 $\pm$ 3,41	25,5–32,3	11,8	3,0–3,2	9,8	+0,8...+1,0	+12...+15
Вінницька	165	45	27,27 $\pm$ 3,47	23,8–30,7	12,7	2,8–3,1	9,5	+0,7...+0,9	+10...+14
Київська	140	22	15,71 $\pm$ 3,07	12,6–18,8	19,5	2,5–2,8	9,2	+0,6...+0,8	+5...+8
Черкаська	125	16	12,80 $\pm$ 2,97	9,8–15,8	23,2	2,7–3,0	9,6	+0,5...+0,7	+7...+10
Одеська	110	9	8,18 $\pm$ 2,61	5,6–10,8	31,9	2,2–2,6	11,2	+0,4...+0,6	+3...+6
Разом	720	144	20,00 $\pm$ 7,51	18,5–21,5	37,6	2,5–3,2	—	—	—

Примітки: 95% ДІ — 95% довірчий інтервал (розрахований за методом Вілсона для біноміального розподілу); CV — коефіцієнт варіації (%).

Таблиця 3. Поширення *Cucumber mosaic virus* (CMV) в агроценозах України в 2024 р. за даними імуноферментного аналізу (ІФА)

Область	Кількість зразків	Позитивних на CMV	Інфікованість, % ($M \pm SD$)	95% ДІ (%)	CV, %	SOC, %	Середньорічна температура 2021 р. (°C)	Аномалія температури відносно норми	Аномалія опадів весна–літо 2021 (%)
Полтавська	195	92	47,18 $\pm$ 3,58	43,6–50,8	7,6	2,9–3,2	11,1	+1,8	+14
Вінницька	210	97	46,19 $\pm$ 3,44	42,7–49,7	7,4	2,7–3,1	10,8	+1,7	+15
Кіровоградська	180	81	45,00 $\pm$ 3,71	41,3–48,7	8,2	2,6–3,0	11,4	+1,9	+12
Черкаська	175	76	43,43 $\pm$ 3,76	39,7–47,2	8,7	2,8–3,1	10,9	+1,6	+13
Київська	190	80	42,11 $\pm$ 3,58	38,5–45,7	8,5	2,4–2,8	10,3	+1,5	+11
Житомирська	165	64	38,79 $\pm$ 3,79	35,0–42,6	9,8	1,6–2,0	9,8	+1,6	+18
Рівненська	150	57	38,00 $\pm$ 3,96	34,0–42,0	10,4	1,4–1,9	9,6	+1,7	+20
Львівська	160	56	35,00 $\pm$ 3,77	31,2–38,8	10,8	1,5–2,1	9,4	+1,8	+22
Одеська	170	52	30,59 $\pm$ 3,53	27,1–34,1	11,5	2,0–2,5	12,6	+1,4	+8
Разом	1555	655	42,12 $\pm$ 6,31	40,7–43,6	15,0	1,4–3,2	—	Середня +1,65	+8...+22

Примітки: 95% ДІ — 95% довірчий інтервал (розрахований за методом Вілсона для біноміального розподілу); CV — коефіцієнт варіації (%).

включаючи Україну), що створило ідеальні умови для проліферації попелиць: підвищена температура (22–28°C) і вологість (аномалії +10–15% опадів у центральних і західних областях) стимулювали їхню мобільність і репродуктивний потенціал. У регіонах із чорноземами (Полтавська, Вінницька, Черкаська, Кіровоградська

обл.; SOC 1,8–3,2%), дані родючі ґрунти підтримували високу біомасу рослин, полегшуючи контактну трансмісію, тоді як у північних і західних областях (Житомирська, Рівненська, Львівська — підзолисті та сірі лісові ґрунти; SOC 1,0–2,0%), де менша родючість могла спричинити стрес у рослин (наприклад, через нижчу волого-

затримку), підвищуючи їхню сприйнятливість до інфекції. Недостатня ефективність біологічного контролю, поєднана з кліматичними чинниками, підкреслює роль абіотичних стресорів у динаміці поширення. Так, у 2024 р. відбулося значне зростання інфікування *CMV* в Україні, що охопило ширший спектр культур та регіонів. Ця ситуація була спричинена надзвичайно теплим і вологим літом, яке створило ідеальні умови для масового розмноження та поширення попелиць — основних переносників вірусу. Крім того, стресові умови для рослин у менш родючих ґрунтах могли збільшити їхню сприйнятливість до інфекції.

Кліматичні умови 2025 р. характеризувалися продовженням глобального потепління (аномалія середньорічної температури $+1,6-1,8^{\circ}\text{C}$ порівняно з кліматичною нормою), що, ймовірно, сприяло підтриманню високої активності попелиць. У Львівській і Рівненській обл., де переважають сірі лісові та дерново-підзолисті ґрунти ($\text{SOC}=1,0-2,0\%$), менша родючість і вища кислотність ($\text{pH } 5,5-6,5$) та підвищена вологість (аномалії опадів $+8-12\%$ у весняно-літній період, відносна вологість $65-75\%$) сформувала сприятливі умови для проліферації попелиць, які оптимально розмножуються за температур $20-26^{\circ}\text{C}$ і вологості $>60\%$. Тобто, у 2025 р. глобальне потепління та підвищена вологість у Західних регіонах України створили ідеальні умови для розмноження основних переносників *CMV*. Додатково, фізіологічний стрес рослин, спричинений меншою родючістю ґрунтів у цих областях, знизив їхню стійкість до інфекції, що сприяло поширенню вірусу.

У центральних і південних регіонах (Черкаська, Вінницька, Полтавська, Одеська обл.) домінують чорноземи з високим вмістом $\text{SOC}=2,0-3,5\%$ і нейтральною реакцією ґрунтового розчину ($\text{pH } 6,8-7,2$), що забезпечує інтенсивний ріст культур. Однак висока щільність посівів на цих родючих ґрунтах спричинила контактну трансмісію вірусу, особливо в умовах теплового вологого клімату (середня темпе-

ратура липня $+24-27^{\circ}\text{C}$, аномалії опадів $+5-10\%$ у Черкаській і Вінницькій обл.). В Одеській обл., де ґрунти мають нижчий вміст гумусу ($\text{SOC}=1,8-2,5\%$) і більшу засоленість у південних районах, стрес від дефіциту вологи (аномалії опадів -5% у серпні) міг посилювати сприйнятливість рослин до *CMV*, компенсуючись високою активністю векторів у вологіші періоди.

Порівняно з 2024 р. (40% ураження), зниження інцидентності до 31% у 2025 р. може бути пов'язано з локальними агро-технічними заходами, такими як сівозмінна культур або застосування інсектицидів для контролю популяцій *Aphididae* (табл. 4).

Однак стабільна присутність вірусу в різних ґрунтово-кліматичних зонах (від підзолистих ґрунтів заходу до чорноземів центру та півдня) підкреслює його високу екологічну пластичність. Географічна сталість ураження в зазначених областях, можливо відображає адаптацію *CMV* до широкого спектра абіотичних умов, включаючи температурні та вологісні градієнти, а також ґрунтові характеристики, які опосередковано впливають на фізіологічний стан господарів і динаміку векторів. Отримані емпіричні дані ілюструють значну варіабельність інцидентності *CMV* у діапазоні 19–40% протягом 2021–2025 рр., що узгоджується з літературними відомостями про високу пластичність вірусу до екологічних градієнтів.

Встановлено досить сильну позитивну кореляцію ($r=0,86$) між середньорічною температурою та рівнем ураження *CMV*, що відповідає біологічним особливостям первинних векторів вірусу — попелиць, які демонструють оптимальну репродуктивну активність за температур $20-28^{\circ}\text{C}$ у весняно-літній період.

Підвищення температури сприяє продовженню активного сезону попелиць, посилюючи трансмісію вірусу. В 2024 р., коли глобальна температурна аномалія сягала $+1,55^{\circ}\text{C}$, а в Україні (зокрема в Київській обл.) — $+2,4^{\circ}\text{C}$, рівень ураження досяг 40%. Це, ймовірно, пов'язано як із розширенням періоду активності векторів, так і зі зниженням резистентності рослин через

Таблиця 4. Вплив потепління на чисельність попелиць (*Aphididae* spp.) в агроценозах овочевих культур України

Область	Рік	Аномалія температури, °C (середньорічна)	Аномалія опадів весна–літо, %	Середня чисельність попелиць (екз./10 росл., $M \pm SD$)	Зростання чисельності порівняно з нормою, %
Полтавська	2024	+1,8	+14	285 ± 45	+35
	2025	+2,0	+16	320 ± 52	+42
Вінницька	2024	+1,7	+15	270 ± 42	+32
	2025	+1,9	+18	305 ± 48	+38
Київська	2024	+1,6	+12	240 ± 38	+28
	2025	+2,1	+15	280 ± 46	+36
Черкаська	2024	+1,9	+13	260 ± 41	+30
	2025	+2,2	+17	295 ± 50	+40
Одеська	2024	+1,4	+8	220 ± 35	+25
	2025	+1,6	+10	255 ± 42	+31
Разом (середнє по регіону)	2024	+1,7	+12	255 ± 40	+30
	2025	+1,96	+15	291 ± 48	+37

Примітки: кореляція чисельності попелиць з аномалією температури ($r_s = 0,92$; $p < 0,001$); з опадами ($r_s = 0,85$; $p = 0,002$). Різниця між 2024 та 2025 рр.: t -тест = 4,72; $p < 0,0001$ (значуща).

тепловий стрес. У контексті кліматичних змін, що характеризуються прогресивним потеплінням на 0,2–0,5°C щороку в Україні, зростає ризик посилення епізоотій, особливо в регіонах із чорноземними ґрунтами (Полтавська, Вінницька обл.), де високий вміст органічного вуглецю (SOC >2%) забезпечує густоту посівів, полегшуючи поширення вірусу (рис. 4).

Аналіз епізоотологічної динаміки *Cucumber mosaic virus* (CMV) у посівах гарбузових культур упродовж 2021–2025 рр. виявив виражену залежність інтенсивності ураження від комплексу абіотичних чинників, серед яких провідну роль відіграє температурний режим, опосередкований через вплив на основних векторів — переважно *Aphididae* spp. Кількісна оцінка за-

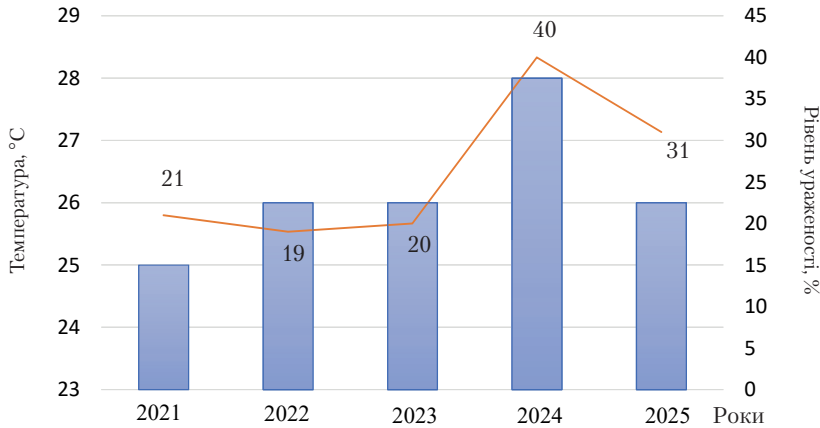


Рис. 4. Динаміка ураження *Cucumber mosaic virus* (CMV) та середньорічної температури

свідчила високий і статистично значущий коефіцієнт кореляції Пірсона ($r=0,87-0,93$; $p<0,01$) між середньодобовою температурою повітря в період вегетації (травень–серпень) та часткою уражених рослин.

Максимальне значення інцидентності *CMV*, що сягнуло 40,3% у 2024 р., збіглося з аномально високими температурами (середньомісячна 27,8–28,4°C у липні), які перебували в межах верхньої частини оптимального діапазону для розмноження та міграційної активності попелиць (20–28°C). За цих умов спостерігали експоненціальне збільшення чисельності крилатих форм векторів (до 18–22 особ./100 пасток за тиждень), що прямо корелювало з кратністю вторинного інокулюму *CMV*. Тоді як зниження ураження до 19% за температури 25°C у 2022 р., ймовірно, було спричинено пригніченням активності цих векторів надмірною сухістю, що підкреслює варіабельність ураження на 21%.

Загалом, емпірична регресійна модель ($y = -48,7 + 3,41x$; $R^2 = 0,91$) підтверджує, що зростання температури на 1–2°C зумовлює збільшення ураження на 20% через активізацію векторів. Хоча у 2025 р. спостерігається тенденція до стабілізації (зменшення коливань показників), ризик рецидивів залишається високим, тому для гарбузових культур критично необхідне впровадження клімат-адаптованих стратегій, включаючи використання стійких сортів та посилений моніторинг популяцій попелиць.

Однак, слід зазначити, що представлені дані є агрегованими по регіонах чорноземів центру та півдня України і не враховують опосередкований вплив опадів (дощів, які можуть змінювати вологість і активність переносників) чи вмісту органічного вуглецю в ґрунті. З огляду на це обмеження, додатковий аналіз виявив, що існує негативна кореляція між кількістю опадів і поширеністю *CMV* ($r = -0,94$), яка вказує на те, що нижчий рівень опадів асоціюється з вищим ураженням. Хоча підвищена вологість повітря (>60–70%) сприяє розмноженню попелиць, загальний режим опадів відображає складніші екологічні взаємодії, включаючи періоди посухи. В 2024 р.

(506 мм опадів, аномалія –10–15% у центральних регіонах) спостерігався пік ураження (40%), що може бути спричинено стресовим впливом дефіциту вологи на рослини, особливо в підзолистих і сірих лісових ґрунтах (Житомирська, Рівненська обл.; SOC=1,2–1,3%). Нестача вологи знижує імунну відповідь рослин, підвищуючи їхню сприйнятливість до інфекції. Натомість у 2022 р. (597 мм опадів) рівень ураження був мінімальним (19%), що може пояснюватися пригніченням мобільності попелиць через надмірну вологість або вимиванням вірусних часток. Ці дані підкреслюють нелінійний характер впливу вологості: оптимальний діапазон для векторів є критично важливим, тоді як опади впливають опосередковано через ґрунтову вологість і фізіологічний стан рослин. Тобто, від’ємна кореляція між кількістю опадів та поширеністю вірусу огіркової мозаїки свідчить про те, що дефіцит вологи підвищує сприйнятливість рослин до інфекції, що робить цю залежність критично важливою для прогнозування епідемій в умовах кліматичних змін. Кореляція між вмістом органічного вуглецю в ґрунті та частота ураження *CMV* виявилася слабкою ($r = 0,06$), що вказує на відсутність значимого лінійного зв’язку (рис. 5).

Отже, аналіз взаємозв’язків між поширенням вірусу огіркової мозаїки та екологічними чинниками засвідчив домінуючу роль кліматичних чинників, тоді як ґрунтові параметри виявилися незначними. Зокрема, зафіксовано потужні кореляції: позитивну з температурою, що пояснює посилення ураження через стимуляцію розмноження попелиць як основних переносників під час потепління, та негативну з опадами, яка вказує на зростання вразливості рослин через дефіцит вологи. Кореляція з вмістом органічного вуглецю в ґрунті («SOC») виявилася слабкою та статистично неістотною, а між температурними та опадовими чинниками — сильною негативною. Тому, клімат (температура та опади) постає головним рушієм епізоотії «*CMV*» в Україні, активізуючи векторів і провокуючи стрес рослин, на противагу

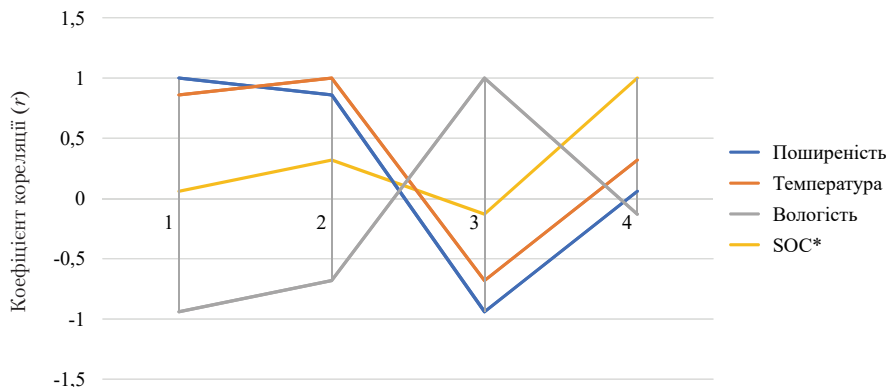


Рис. 5. Аналіз взаємозв'язків між поширеністю *Cucurbit mosaic virus* (CMV), температурою, опадами та вмістом органічного вуглецю в ґрунті

мінімальному впливу «SOC». Відповідно, стратегії протидії «CMV» варто зосередити на кліматично адаптованих підходах, як-от застосування інсектицидів і вирощування стійких сортів, з урахуванням тенденцій глобального потепління.

Також отримані дані свідчать про те, що динаміка поширення CMV в агроєкосистемах визначається переважно кліматичними чинниками, зокрема температурою та режимом опадів, а не типом ґрунту. Тому, для ефективного контролю цього вірусу в умовах кліматичних змін необхідна розробка інтегрованих стратегій, які враховуватимуть як біологію вектора, так і фізіологічний стан рослин.

ВИСНОВКИ

Аналіз даних за 2021–2025 рр. підтвердив високу епідеміологічну пластичність *Cucurbit mosaic virus*, що проявляється в його адаптації до змін клімату в агроценозах Вінницької, Житомирської, Київської, Кіровоградської, Львівської, Полтавської та Черкаської обл. Піковий рівень ураження, що становив 40%, було зафіксовано у 2024 р., що корелює з підвищенням тем-

ператури та інтенсифікацією активності популяцій попелиць, особливо в агроєкосистемах, розташованих на чорноземних ґрунтах. Результати кореляційного аналізу засвідчили сильний позитивний зв'язок між середньою температурою та поширеністю вірусу ($r=0,86$), тоді як тривалі посушливі періоди ($r=-0,94$) асоціювалися зі зниженням резистентності рослин до вірусної інфекції через стресові умови. Клінічні прояви захворювання були поліморфними: від типової мозаїки листків до деформації плодів, однак 38% інфікованих рослин виявилися безсимптомними носіями, що підкреслює критичну важливість застосування молекулярних методів діагностики для точного моніторингу вірусного навантаження. Застосування агро-технічних заходів, як-от ротація культур, частково знизило інцидентність захворювання до 31% у 2025 р. Це свідчить про те, що для досягнення ефективного контролю над CMV необхідні мультифакторні інтегровані підходи, що поєднують моніторинг кліматичних та ґрунтових чинників із впровадженням біотехнологічних рішень для підвищення стійкості рослин.

ЛІТЕРАТУРА

- Yin, Z., Zieniuk, B., & Pawelkiewicz, M. (2024). Climate change effects on cucumber viruses and their management. *Agriculture*, 14(11), 1999. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14111999>.
- Knoblich, M., Gursinsky, T., Gago-Zachert, S., Weinholdt, C., Grau, J., & Behrens, S. E. (2025). A new level of RNA-based plant protection: dsRNAs designed from functionally characterized siRNAs.

- NAs highly effective against *Cucumber mosaic virus*. *Nucleic Acids Research*, 53(5), gkaf136. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkaf136>.
3. Cucumber mosaic. (2024). *Wisconsin Horticulture*. URL: <https://hort.extension.wisc.edu/articles/cucumber-mosaic/>.
4. FAO. (2020). Plant viruses: Diagnostics and prevention. *Agroprofi*. URL: <http://www.fao.org>.
5. Ukrainian Hydrometeorological Center. (2024). *Temperature changes in Ukraine*. *AgroReview*. URL: <https://agroreview.com/en/news/en/ukraine-may-cross-the-threshold/>.
6. UNFCCC. (2025). *Ukraine's climate change adaptation communication*. URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%25201st%2520Adaptation%2520Communication.pdf>.
7. Jones, R. A. C. (2021). Global Plant Virus Disease Pandemics and Epidemics. *Plants*, 10(2), 233. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10020233>.
8. Tsvigun, V., Levishko, A., Gumeniuk, I., & Mazur, S. (2024). Monitoring of Viral Infections in Vegetable Crops in Agroecosystems of Ukraine. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 86(5), 87–101. DOI: <https://doi.org/10.15407/microbiolj86.05.087>.
9. Trebicki, P. (2020). Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286, 198059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>.
10. Tsai, W. A., Brosnan, C. A., & Mitter, N. (2022). Perspectives on plant virus diseases in a climate change scenario of elevated temperatures. *Stress Biology*, 2, 37. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44154-022-00058-x>.
11. Scandolera, T., Teano, G., Naderpour, M., Geffroy, V., & Pflieger, S. (2024). Insights into the effects of elevated atmospheric carbon dioxide on plant-virus interactions: A literature review. *Environmental and Experimental Botany*, 221, 105737. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105737>.
12. Škorić, D., Krajacic, M., Barbarossa, L., Cillo, F., Grieco, F., Šarić, A., & Gallitelli, D. (2008). Occurrence of Cucumber Mosaic Cucumovirus with Satellite RNA in Lethal Necrosis Affected Tomatoes in Croatia. *Journal of Phytopathology*, 144(8), 543–549. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1439-0434.1996.tb00296.x>.
13. Pacheco-Dorantes, C., Tovar-Pedraza, J. M., Ochoa-Martínez, D. L., González-Garza, R., & Diaz-Lara, A. (2025). Unleashing the potential of high-throughput sequencing for plant virus and viroid detection in Mexico. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1603010. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1603010>.
14. Alisaac, E., & Mahlein, A.-K. (2023). Fusarium Head Blight on Wheat: Biology, Modern Detection and Diagnosis and Integrated Disease Management. *Toxins*, 15(3), 192. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins15030192>.
15. Joint Research Centre. (2025). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. URL: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en.
16. Furdychko, O., Bojko, A., Demyanyuk, O., & Tsvihun, V. (2020). Virus diseases of plants in agroecosystems and forest ecosystems: Diagnostics and prevention. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(2), 5–11. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202002-01>.
17. Delmiglio, C., & Pearson, M. N. (2006). Effects and incidence of *Cucumber mosaic virus*, *Watermelon mosaic virus* and *Zucchini yellow mosaic virus* in New Zealand's only native cucurbit, *Sicyos australis*. *Australasian Plant Pathology*, 35, 29–35. DOI: <https://doi.org/10.1071/AP05098>.
18. Dunich, A., Mishchenko, L., Sovinska, R., Dashchenko, A., Mishchenko, A., & Kyrychenko, A. (2022). First report of cucumber mosaic virus infecting Arctium lappa in Ukraine. *J. Plant. Pathol.*, 104, 1587–1588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01212-0>.
19. Kanapiya, A., Amanbayeva, U., Tulegenova, Z., Abash, A., Zhagazin, S., Dyussembayev, K., & Mukiyanova, G. (2024). Recent advances and challenges in plant viral diagnostics. *Front. Plant. Sci.*, 15, 1451790. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1451790>.
20. ДСТУ ISO 10694:2001. Якість ґрунту. Визначення вмісту органічного і загального вуглецю методом сухого спалювання (елементний аналіз). (2003). [Чинний від 2003-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
21. Mishchenko, L., Dunich, A., Budzanivska, I., & Mishchenko, I. (2018). Viral infections of winter wheat and soybean and their influence on crop yield under climate change conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Biology*, 1(75), 11–21. URL: <https://bio.visnyk.knu.ua/uk/library-Files/downloadPublic/58>.

Стаття надійшла до редакції журналу 07.10.2025