

ВІРУСИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР,

що передаються з насінням в Україні: епідеміологія, механізми поширення та стратегії фітосанітарного контролю

Мета. Провести комплексний огляд сучасних даних щодо вірусів зернових культур, які передаються з насінням і поширені в Україні, з аналізом їхньої епідеміології, механізмів поширення, фітосанітарного контролю та профілактичних заходів, з урахуванням впливу цих патогенів на агросистеми та ризиків для національного зерновиробництва. **Методи.** Методологія огляду ґрунтувалася на систематизації наукових публікацій, нормативних джерел і міжнародних стандартів щодо особливостей насінневої інфекції, ролі рослин-резерваторів і переносників, а також оцінці ефективності профілактичних стратегій у контексті сучасних агротехнічних практик і систем насінництва. **Результати.** Узагальнено сучасні знання щодо механізмів насінневої та векторної передачі ключових для економіки України вірусів зернових культур, визначено їхню епідеміологічну роль у підтриманні інфекції в агроценозах, значення природних резервуарів і «зеленого мосту», а також виокремлено критичні елементи профілактики та фітосанітарного контролю, зокрема використання безвірусного насіння, просторово-часову ізоляцію посівів та впровадження генетично стійких сортів. **Висновок.** Інтегрований підхід, що поєднує тестування та сертифікацію насінневого матеріалу, агротехнічні заходи, управління «зеленим мостом» (падалицею, сегетальною та дикорослою флорою) і використання сортів із підвищеною стійкістю, є ключовою передумовою зменшення ризику поширення вірусних хвороб зернових культур і мінімізації втрат у виробництві.

насіннева інфекція; якість зерна; фітосанітарний контроль; природні резервуари інфекції

Віруси, що передаються насінням, становлять значну економічну загрозу для зернових культур у всьому світі та мають особливе значення для Укра-

***1,3 А.М. КИРИЧЕНКО,**
доктор біологічних наук,
ORCID: 0000-0002-6098-1467

1,2,3 Г.О. СНИГУР,
кандидат біологічних наук,
ORCID: 0000-0003-4237-3406

1 І.С. ЩЕРБАТЕНКО,
доктор біологічних наук,
ORCID: 0000-0003-4208-2078

¹Інститут мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного Національної академії наук України, вул. Академіка Заболотного, 154, м. Київ, 03143, Україна

²ННЦ «Інститут біології та медицини», Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна

³Інститут біохімії та біофізики Польської академії наук, вул. Адольфа Павінського 5А, м. Варшава, 02-106, Польща

*E-mail: a.kyrychenko@imv.org.ua

їни, де виробництво зерна є ключовою складовою аграрного сектору, основою продовольчої безпеки та важливим чинником експортного потенціалу країни. Здатність вірусів зберігатися в насінні є однією з провідних стратегій їхнього виживання між вегетаційними періодами, а також має вирішальне значення для ефективного розповсюдження та підтримання інфекції в агроecosистемах. Це особливо критично для вірусів з вузьким спектром хазяїв або таких, що поширюються переносниками з обмеженою рухливістю чи за неперсистентного способу передачі. Зокрема, вірус штрихуватої мозаїки ячменю (*Hordeivirus hordei*, BSMV), який становить серйозну загрозу для виробництва ячменю та пшениці, не має відомих

комах-переносників і тому для свого поширення та довгострокового збереження переважно покладається на насінневу передачу [1–3].

Окрім забезпечення виживання вірусів у насінні впродовж тривалого часу, насіннева передача відіграє ключову роль у їхньому поширенні на значні відстані, сприяючи занесенню інфекції до нових регіонів та міжконтинентальній міграції збудників [1, 3–5]. У багатьох випадках інфікування насіння та проростків зумовлює порушення росту рослин, зниження енергії проростання, формування слабших посівів і розвиток вторинних інфекцій, що зрештою призводить до зменшення продуктивності культури, погіршення якості врожаю та значних економічних втрат [3]. Таким чином, насіннева інфекція має не лише епідеміологічне, а й виразне агроeкономічне значення.

З огляду на глобальний характер проблеми та активну участь України у міжнародній торгівлі зерном, вивчення динаміки вірусів, що передаються з насінням, є необхідною передумовою для розроблення ефективних стратегій профілактики, діагностики та фітосанітарного регулювання.

Метою даного огляду є узагальнення сучасних відомостей щодо біологічних особливостей, механізмів передачі, епідеміології, економічного значення, методів діагностики та принципів фітосанітарного контролю вірусів із насінневою передачею, що циркулюють на території України і мають значний економічний вплив на виробництво зернових. Віруси, що постійно виявляються в агроecosистемах країни, — це

вірус штрихуватої мозаїки ячменю (BSMV) [6], вірус смугастої мозаїки пшениці (WSMV) [6–7], вірус мозаїки пшениці Високих Рівнин (HPWMoV) [6], вірус мозаїки цукрової тростини (SCMV) та вірус карликової мозаїки кукурудзи (MDMV) [8, 9]. Вони належать до різних таксономічних груп, мають різний ступінь ефективності передачі насінням, заражають широкий спектр сприйнятливих рослин-хазяїв і становлять значну загрозу для виробництва зернових культур. Їхня здатність знижувати врожайність зернових не лише впливає на продуктивність сільського господарства, але й має значні комерційні наслідки для економіки країни та світової торгівлі.

Вірус штрихуватої мозаїки ячменю (*Hordeivirus hordei*, barley stripe mosaic virus, BSMV) є типовим представником роду *Hordeivirus* (родина *Virgaviridae*) і одним з найбільш вивчених вірусів зернових культур [10, 11]. Віріони BSMV представлені жорсткими, паличкоподібними частинками завдовжки 112–150 × 18–24 нм. Генوم вірусу складається з трьох компонентів одноланцюгової (+)РНК (RNA α , RNA β , RNA γ). RNA α кодує субодиницю реплікази з геліказною активністю ($\alpha\alpha$), RNA γ — полімеразну субодиницю реплікази ($\gamma\alpha$) та цистеїн-багатий білок $\gamma\beta$, що бере участь у патогенності та регуляції руху, тоді як RNA β кодує капсидний білок та три білки (triple gene block, TGB1, TGB2, TGB3). Трипартитна організація геному, зокрема наявність TGB-білків, є необхідною для системного поширення інфекції в рослині [11].

Поширення та економічне значення. Історично BSMV був поширений у більшості регіонів вирощування зернових культур світу та входив до переліку карантинних шкідливих організмів Європейської та Середземноморської організації захисту рослин (EPPO, перелік A2). Через широкую присутність у зонах вирощування ячменю був виключений зі списку в 1999 р. [12]. Нині BSMV перебуває під фітосанітарним наглядом переважно через ризик

поширення із зараженим насінням. Завдяки програмам сертифікації насіння та використанню безвірусного посівного матеріалу розповсюдження BSMV значно обмежено в багатьох регіонах світу, де вірус здебільшого має спорадичний характер [11]. В Україні вірус циркулює в агроценозах ячменю та пшениці, де періодично рееструються його спалахи, зокрема в південних регіонах [13]. Перші повідомлення про BSMV в Україні датуються 1990-ми роками, а задокументовані випадки виявлення — на початку 2000-х; подальші дослідження підтвердили присутність вірусу в інших регіонах [6, 14], що підкреслює його потенційну загрозу для насінництва та експорту зерна.

BSMV вважається єдиним економічно значимим представником роду *Hordeivirus*, що спричиняє значні втрати врожаю, особливо ячменю, які складають від 20% до 62% залежно від часу інфікування, частки заражених рослин, патогенності штаму вірусу та сорту культури [15]. За високої інфікованості посівів спостерігається зниження життєздатності сходів та зменшення продуктивного кушення, маси зерна, стерильність квіток і щуплість насіння. Особливо небезпечною є здатність вірусу зберігатись в насінні впродовж тривалого часу (до 19-ти років) [3].

Коло рослин-хазяїв. Ячмінь є основним хазяїном BSMV, в посівах якого вірус завдає значних економічних втрат [11]. Інші культури, такі як пшениця, овес та жито, також сприйнятливі до вірусу, хоча інтенсивність симптомів варіює залежно від генотипу та умов середовища. Окремі штами інфікують кукурудзу в експериментальних умовах або змішаних посівах [12].

Природними резервуарами вірусу слугують злакові трави та бур'яни (родина *Poaceae*): овес дикий, дикі види ячменю, різні види тонконогу, пирій повзучий, лисохвіст, тимофіївка, мишій, просовидні трави та різні види пирію [4]. Інфекція в цих рослинах часто має латентний пелібег, забезпечуючи збереження

вірусу в міжвегетаційний період та первинне зараження культур навесні [11]. В експериментальних умовах сприйнятливими до вірусу є рослини родин *Chenopodiaceae* та *Solanaceae*: *Chenopodium amaranticolor*, *C. quinoa*, *C. album*, *Beta vulgaris*, *Nicotiana tabacum* cv. *Samsun*. Деякі штами вірусу інфікують *Spinacia oleracea* [12].

Симптоми. На ячмені інфекція проявляється у вигляді хлоротичної смугастості біля основи молодих листків, яка прогресує до системної мозаїки та хлорозу на старіших листках [11]. Пізні стадії інфекції характеризуються затримкою росту, зменшенням кушіння та формуванням щуплого зерна з низькою масою. Агресивні штами можуть викликати летальний некроз, що значно впливає на життєздатність рослин. На пшениці BSMV спричиняє мозаїку листків, плямистість, хлоротичні смуги і плями, схожі на ті, що спостерігаються у ячмені (рис. 1). На вівсі прояви інфекції менш виражені та з'являються пізніше, що свідчить про меншу придатність клітинних систем вівса до реплікації вірусу [4]. Латентна інфекція в рослинах, вирощених із зараженого насіння, ускладнює візуальну діагностику та знищення зараженого селекційного матеріалу.

Шляхи передачі та джерела інфекції. BSMV не має біологічних векторів і поширюється переважно через інфіковане насіння з ефективністю до 90–100% у сприйнятливих сортах [4]. Від первинних вогнищ інфекції BSMV поширюється механічно під час агротехнічних робіт або контакту рослин (рис. 1). Механізми насінневої передачі включають пряме інфікування зародка через яйцеклітину та непряме інфікування через гамети. Хоча віріони BSMV були виявлені в пилковій трубці, зиготі, ендоспермі та інших частинах пилку, передавання вірусу з пилком ячменю під час цвітіння рослин експериментально не підтверджено [11].

Вірус смугастої мозаїки пшениці (*Tritimovirus tritici*, wheat streak mosaic virus, WSMV) є типовим видом роду *Tritimovirus* родини

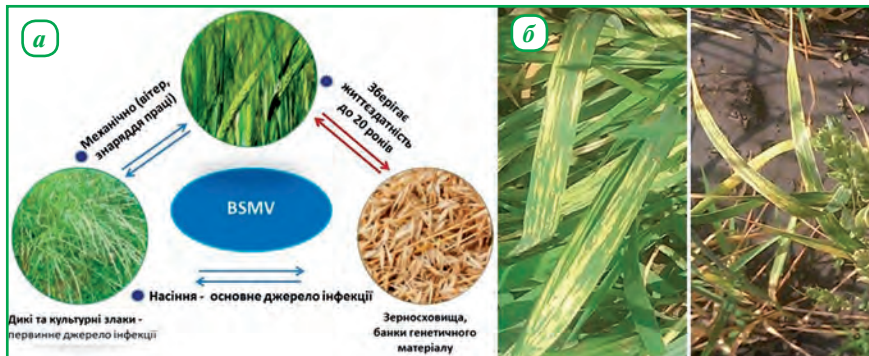


Рис. 1. Barley stripe mosaic virus: а — життєвий цикл; б — симптоми вірусної інфекції на пшениці (фото та схема авторів)

Potyviridae [16]. Віріони WSMV представлені ниткоподібними частинками завдовжки приблизно 700 нм і діаметром 13 нм з одноланцюговим (+) РНК-геномом [17].

Поширення та економічне значення. WSMV є одним із найбільш економічно значущих вірусів зернових культур у світі, поширеним у багатьох регіонах вирощування пшениці, включаючи Північну Америку, Європу, Австралію та Азію [18, 19]. Перші виявлення WSMV в Україні датуються 1960-ми роками. У період 2017—2022 рр. спостерігалось розширення ареалу вірусу в усіх регіонах країни, часто в змішаних інфекціях з High Plains wheat mosaic virus (HPWMoV) на сході [6, 7, 20, 21].

WSMV вважається одним із найшкідливіших патогенів пшениці. Втрати врожаю від вірусної інфекції варіюють від 2—5% до 60% щорічно, а за сприятливих для розмноження вектора (*Aceria tritici*) умов, інфікування ранніх посівів та наявності «зеленого мосту» можуть сягати 80—100% [18, 19]. Тяжкість захворювання залежить від погодних умов, генотипу рослин та агротехнічних практик. Зниження врожайності насамперед зумовлене пошкодженням репродуктивних органів, формуванням шуплого зерна, погіршенням його якості та схожості, а також зниженням енергії проростання [6, 21]. Ризики особливо високі в насінницьких господарствах, ранніх посівах пшениці озимої, за масового розмноження переносника та наявності падалиці чи бур'янів-резерваторів [19].

Коло рослин-хазяїв. Основними хазяями вірусу є пшениця (озима та яра), ячмінь, жито, овес, просо, кукурудза, сорго [18]. Різні види бур'янів, зокрема мишій італійський та зелений, плоскуха звичайна, пажитниця багаторічна, шерстяк волохатий, а також різні види ковили, оводника, пальчатки і стоколосу слугують резерваторами вірусу, формуючи «зелений міст» між сезонами та сприяючи його збереженню й поширенню в агро-екосистемах [22].

Симптоми. На пшениці WSMV спричиняє пожовтіння листя, мозаїчні та смугасті хлоротичні візерунки (рис. 2). Характерною ознакою вірусного ураження є хлороз та утворення вздовж жилок поздовжніх смуг різної ширини, зменшення куштиння, некроз тканин та за значне ураження — загибель рослин [17, 18]. На кукурудзі основними симптомами інфекції є пожовтіння листя і характерна мозаїка з поздовжніми хлоротичними смугами вздовж жилок [22]. Інтенсивність прояву симптомів залежить від прийнятливості сортів/гібридів до WSMV, рівня інфекційного навантаження, фази розвитку рослин та погодних умов. Раннє інфікування посівів може призводити до значної або навіть повної втрати врожаю. Візуальна діагностика вірусу в польових умовах малоінформативна через варіабельність прояву симптомів та їхню неспецифічність.

Шляхи передачі та джерела інфекції. В природних умовах WSMV передається пшеничним кліщем *A. tritici* (рис. 2), інша назва *A. tosichella*, *Acarina: Eriophyi-*

dae, який є його єдиним відомим біологічним вектором [17—19]. Передача відбувається за персистентно-пропагативним механізмом, кліщ зберігає інфекційність впродовж кількох тижнів, поширюючи WSMV з первинного резервуару інфекції на сусідні рослини та нові території [18].

У довгостроковому виживанні вірусу важливу роль відіграє здатність вірусу передаватись з насінням. Рівень такої передачі у пшениці залежить від генотипу рослини і зазвичай є дуже низьким (0,2—3,0%); вірус не передається з насінням ячменю, вівса та багатьох однорічних трав. Зокрема, у дослідженні українських авторів (Mishchenko et al., 2018) [21] було експериментально показано відсутність насінневої передачі для Полтавського ізоляту WSMV, що, ймовірно, пов'язано з особливостями сучасних сортів пшениці, адаптованих до біотичних та абіотичних стресів, а також зі зміщенням строків сівби на пізніші дати. Автори зазначають, що навіть за гіпотетичної можливості контамінації насіння частота таких випадків є незначною і, на їхню думку, не має суттєвого епідеміологічного значення в українських умовах. Проте, з огляду на дані міжнародної літератури про підтверджену (хоч і низьку) насінневу трансмісію WSMV у різних генотипах і регіонах [17—19, 23], а також на потенціал вірусу до інтродукції нових штамів через глобальну торгівлю насінневим матеріалом, доцільно зберігати високий рівень обережності. Запобіжні заходи, такі як обов'язкове тестування насінневого матеріалу на вірусну інфекцію та використання сертифікованого безвірусного насіння, залишаються виправданими та необхідними для мінімізації ризиків, особливо в насінницьких господарствах.

Вірус мозаїки пшениці Високих Рівнин (*Emaravirus tritici*, High Plains wheat mosaic virus, HPWMoV) належить до роду *Emaravirus* родини *Fimoviridae*. Геном вірусу — одноланцюгова (-)РНК, складається з восьми сегментів; віріони з оболон-

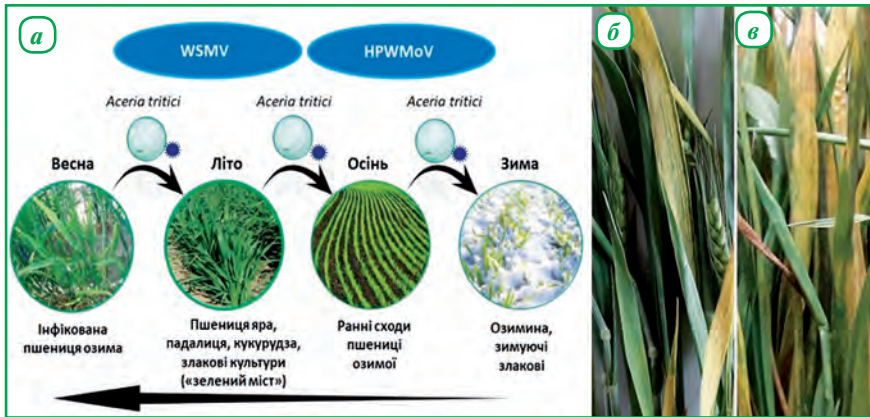


Рис. 2. Wheat streak mosaic virus та High Plains wheat mosaic virus на пшениці: а — життєвий цикл; б — симптоми вірусної інфекції WSMV; в — симптоми вірусної інфекції HPWMoV (фото та схема авторів)

кою, квазісферичні, діаметром 80–200 нм [24]. HPWMoV часто входить до комплексу вірусів мозаїки пшениці разом із WSMV та TriMV, що значно посилює тяжкість захворювання.

Поширення та економічне значення. HPWMoV вперше виявлено в США у 1993 р. [25]. Пізніше вірус було зареєстровано в Ірані, Австралії, Новій Зеландії, країнах Південної Америки та Канаді [26]. В Україні про перші підтверджені випадки повідомлялось у 2020 р. переважно в східних та центральних регіонах, часто в змішаних інфекціях з WSMV [6]. Європейське агентство з безпеки харчових продуктів (EFSA) оцінює ризик інтродукції вірусу в ЄС як високий через наявність вектора (*Aceria tritici*), широкий спектр хазяїв та здатність поширюватись з насінням [26]. У 2022–2023 рр. HPWMoV було виявлено у Франції, що являє собою першу реєстрацію цього вірусу в ЄС [27, 28]. Аналіз геному виявив численні варіанти RNA5 та RNA6 в одного ізоляту, з високою ідентичністю (92–98%) до американських референсних штамів, що підкреслює генетичну гетерогенність вірусу в Європі.

Економічне значення HPWMoV визначається його роллю в змішаних інфекціях, де синергізм з WSMV призводить до істотного посилення симптомів, тяжкості захворювання та втрат врожаю [24]. В моноінфекції частка уражених рослин зазвичай низька (в Україні ~9%), через що втрати врожаю, спричинені

виключно HPWMoV, важко оцінити окремо. За доступними даними, вони становлять 27–80% для пшениці та до 75–100% для кукурудзи (зубоподібної та солодкої) [24, 26]. Змішані інфекції значно збільшують втрати та впливають на епідеміологію, полегшуючи збереження та поширення комплексу вірусів [6].

Коло рослин-хазяїв. Основними хазяями вірусу є пшениця та кукурудза [26]. Альтернативні хазяї та резерватори вірусу в природі включають бур'яни, такі як *Bromus secalinus*, *Setaria glauca* та *Hordeum jubatum*. Експериментально вірус інфікує овес, ячмінь та жито [24]. Падалиця пшениці, кукурудза та дикорослі злаки підтримують популяції вектора в міжвегетативний період, сприяючи збереженню інфекції.

Симптоми HPWMoV. На пшениці HPWMoV спричиняє мозаїку, хлороз листків, смугастість, нерівномірні світло-зелені або жовті ділянки, часто з некрозами, та затримку росту [30]. На кукурудзі спостерігається низькорослість рослин, червона або жовтувата смугастість, хлоротична мозаїка та загибель рослин (особливо солодкої кукурудзи за ранньої інфекції) (рис. 2 в). Вірус-індуковані симптоми часто подібні до таких, що спричиняє WSMV, і це ускладнює візуальну діагностику. У змішаних інфекціях (HPWMoV + WSMV/Triticum mosaic virus (TriMV)) прояви захворювання більш виражені, а їхня інтенсивність залежить від генотипу сортів, фази розвитку рослин та абіотичних

факторів, зокрема, температури повітря [29].

Шляхи передачі та джерела інфекції. Основним переносником вірусу є пшеничний кліщ *A. tritici* (рис. 2 а), який забезпечує персистентно-пропагативну трансмісію вірусу та його збереження між сезонами через «зелений міст» [26]. На відміну від багатьох вірусів рослин, HPWMoV не передається механічно [24]. Обмежені експериментальні дані свідчать про можливе інфікування насіння солодкої кукурудзи з частотою 2–4%, однак переконливі докази щодо передачі через насіння пшениці чи інших хазяїв, а також з пилком, відсутні. Попри низькі рівні, насіннева передача відіграє важливу роль у поширенні вірусу на великій відстані через торгівлю насінням і селекційним матеріалом [28].

Віруси мозаїки цукрової тростини (*Potyvirus sacchari*, *Sugarcane mosaic virus*, SCMV) та карликової мозаїки кукурудзи (*Potyvirus zeae*, *Maize dwarf mosaic virus*, MDMV) належать до роду *Potyvirus* родини *Potyviridae* і мають типову для потівірусів морфологію: ниткоподібні, гнучкі віріони без оболонки завдовжки близько 750 нм і діаметром 12–15 нм з одноланцюговим (+) РНК-геномом [30]. Історично багато ізолятів, що нині класифікуються як SCMV або MDMV, вважалися штамми одного вірусу (*Sugarcane mosaic virus* subgroup), але на основі серологічних, молекулярних та біологічних відмінностей (зокрема, сприйнятливості до гумаю (*Sorghum halepense*)) їх класифіковано як окремі види [31].

Поширення та економічне значення. SCMV та MDMV є важливими патогенами злакових культур із епідемічним потенціалом у регіонах вирощування кукурудзи, сорго та цукрової тростини [32]. SCMV зареєстровано на всіх континентах; в Україні перші підтверджені випадки на кукурудзі датуються 2018 р. (Київська обл.), переважно в моноінфекціях, але з високим потенціалом змішаних інфекцій з іншими поті- чи лютеовірусами [8]. MDMV по-

ширений у Європі, Азії, Африці та Північній Америці; в Україні виявлено у 1970—1971 рр. (Київська, Дніпропетровська, Херсонська області). Подальше розширення ареалу вірусу пов'язано із експансією інвазивного для України гумаю — ключового резерватора вірусу [9].

Обидва віруси спричиняють значні економічні втрати через зниження врожайності (0,5—80,0% для SCMV та до 70—90% для MDMV залежно від генотипу, фази розвитку рослин на момент інфікування та умов середовища), погіршення якості зерна, зменшення фотосинтетичної активності та пригнічення росту рослин [32]. Втрати значно зростають за раннього інфікування культури, змішаних інфекцій і масового розмноження векторів. В Україні ризики поширення цих патогенів досить високі в степових і лісостепових зонах через наявність резервуарів інфекції і міграцію попелиць.

Коло рослин-хазяїв. Діапазон хазяїв обох вірусів обмежений родиною *Poaceae*. Для SCMV основними хазяями є цукрова тростина та кукурудза, а природними резерваторами слугують понад 100 видів злакових бур'янів, зокрема сорго та дикорослі трави [33]. MDMV інфікує кукурудзу, сорго, цукрову тростину та просо і має надзвичайно широкий спектр (>250 видів) альтернативних хазяїв [34]. Бур'яни формують «зелений міст», забезпечуючи персистенцію вірусу між сезонами.

Симптоми. SCMV та MDMV викликають подібні мозаїчні симптоми на кукурудзі: світло-зелені або жовті, рідше — червонуваті або фіолетові смуги та плями вздовж жилок, чергування світлих і темних зон [33]. За раннього інфікування спостерігається значне пригнічення росту рослин, зменшення площі листя, недорозвинення колоса та формування щуплого зерна; на пізніх стадіях симптоми локалізуються переважно на верхніх листках. Інтенсивність прояву симптомів залежить від генотипу, штаму, фази розвитку рослин та умов. Через подібність прояву захворювання з

іншими потівірусами та за змішаних інфекцій візуально діагностувати вірус неможливо (рис. 3).

Шляхи передачі та джерела інфекції. Основними переносниками SCMV та MDMV є понад 20 видів попелиць (*Rhopalosiphum padi*, *R. maidis*, *Sitobion avenae*, *Schizaphis graminum* та ін.) (рис. 3 а), які передають вірус неперсистентним способом [33]. Через швидкий механізм передачі інсектицидні обробки не здатні запобігти інфікуванню, а лише знижують чисельність векторів та інтенсивність вторинного поширення інфекції. У більшості випадків рівень передачі вірусу з насінням низький (<1% для SCMV; 0,007—0,4% для MDMV, до 6,5% в окремих чутливих сортів), але насіннева інфекція має важливе епідеміологічне значення, оскільки діє як механізм занесення вірусу на нові поля та в нові регіони [34]. В агроєкосистемах України поширення SCMV відбувається через поєднання передачі насінням та переносниками, з джерелами інфекції у вигляді насіння сприйнятливих ліній/гібридів, диких злакових трав, заражених посівів попередніх років та масової міграції попелиць.

Регуляторний статус та сертифікаційні вимоги щодо вірусів зернових культур. Віруси, розглянуті в огляді (BSMV, WSMV, HPWMoV, SCMV, MDMV) не включені до переліку карантинних організмів, що підлягають обов'язковому контролю під час сертифікації зерна в Україні за внутрішнім обігом. Вони також не внесені до списків EPPO A1/A2, не регулюються міжнародними стандартами фітосанітарних заходів (ISPM) як карантинні патогени та не входять до переліку об'єктів тестування у рамках Seed Health Testing (ISTA Reference Pest List) [35].

Хоча на рівні EPPO та ISPM відсутні уніфіковані міжнародні вимоги щодо цих вірусів, країни-імпортери в зовнішній торгівлі можуть запроваджувати додаткові фітосанітарні обмеження. Зокрема, відповідно до протоколів фітосанітарних та інспекційних вимог між Міністерством аграрної

політики та продовольства України та Генеральною адміністрацією з питань нагляду за якістю, інспекції та карантину Китаю, експорт ячменю та кукурудзи до Китайської Народної Республіки (КНР) вимагає обов'язкового обстеження посівів у період вегетації на наявність певних шкідливих організмів, зокрема BSMV (для ячменю) та WSMV (для кукурудзи) [13]. Обстеження здійснюється за допомогою стандартних діагностичних методів (імуноферментний аналіз, полімеразна ланцюгова реакція), а фітосанітарний сертифікат засвідчує відсутність таких патогенів відповідно до вимог КНР.

В Україні сертифікація насіння зернових культур є обов'язковою в рамках національних протоколів та міжнародних схем сортової сертифікації Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD Seed Schemes) для партій насіння, призначених для зовнішньої торгівлі [36]. Фітосанітарний сертифікат гарантує відсутність регульованих (карантинних і підконтрольних) організмів відповідно до стандартів країни-імпортера. Хоча розглянуті віруси не підлягають обов'язковому контролю під час сертифікації товарного зерна для внутрішнього ринку, їхній моніторинг є ключовим елементом превентивного фітосанітарного менеджменту в насінництві та селекції, незалежно від карантинного статусу.

Фітосанітарний контроль і профілактика вірусів із насінневою передачею у зернових культурах. Віруси зернових, що передаються з насінням, формують стійкі епідеміологічні системи, де первинна інфекція насіння поєднується з циркуляцією збудника в природних резервуарах і поширенням через переносників. Навіть незначна частка заражених насінин здатна ініціювати в агроєнозі первинні осередки інфекції, з яких вірус поширюється векторами, провокуючи масові спалахи. Отже, профілактика таких хвороб полягає головним чином в мінімізації ризику первинного занесення вірусу з насінням, роз-



Рис. 3. Maize dwarf mosaic virus та sugarcane mosaic virus: а — життєвий цикл; б — симптоми вірусної інфекції SCMV на кукурудзі різних сортів (фото та схема авторів)

риванні епідеміологічних ланцюгів між резервуарами інфекції та посівами, а також на стримуванні поширення патогену переносниками на ранніх фазах вегетації. Використання безвірусного насінневого матеріалу лишається фундаментальним принципом запобігання інфекції, особливо для вірусів, що персистують між сезонами переважно завдяки насіннєвій передачі (наприклад, BSMV), оскільки саме якість посівного матеріалу визначає початковий інфекційний фон у агроценозах. У системах насінництва та селекції вирішальним є ізолювання насінницьких ділянок від потенційних джерел інфекції та заборона повторного використання насіння з уражених посівів. Додатково важливими є уникнення змішування партій насіння невідомого походження та моніторинг симптомів інфекції на рослинах у фазі 2—3 листків.

Важливою ланкою епідемічного циклу для вірусів, що поєднують насіннєву і векторну передачу (WSMV, HPWMoV, MDMV, SCMV), є падалиця, самосійні рослини та дикорослі злаки, які виконують функцію «зеленого мосту» та забезпечують перезимівлю як вірусу, так і його переносників. Особливу небезпеку для агроєкосистем становлять самосіви пшениці озимої (для WSMV та HPWMoV) в ареалах поширення пшеничного кліща, а також багаторічні злакові бур'яни, як резервуари інфекції. Ефективна профілактика передбачає знищення падалиці перед сівбою озимих, контроль бур'янів

на межах полів, уникнення просторової близькості нових посівів до джерел інфекції та дотримання сівозмін, що порушують безперервність «зеленого мосту».

Хімічний контроль попелиць, переносників MDMV та SCMV, має обмежену ефективність через неперсистентний тип передачі вірусу, за якої інфікування рослин відбувається до впливу інсектицидів. У таких випадках пріоритетними є заходи, направлені на розривання екологічного ланцюга «джерело — переносник — посіви» та оптимізація строків сівби для уникнення піків льоту попелиць. Для вірусів пшениці, що поширюються пшеничним кліщем, пряме знищення переносника також малоефективне, а провідну роль у профілактиці відіграють агротехнічні заходи та просторова ізоляція посівів від потенційних джерел інфекції.

Важливим компонентом інтегрованого захисту є використання генетично стійких або толерантних сортів. Для контролю WSMV в комерційні сорти пшениці інтрогресовано гени стійкості *Wsm1* та *Wsm2*, які обмежують реплікацію та системне поширення вірусу, знижуючи втрати врожайності, хоча й не усувають ризик змішаних інфекцій зі спорідненим вірусом мозаїки пшениці (*Triticum mosaic virus*) чи насіннєвої трансмісії збудника [2, 20]. Усі зазначені заходи є ефективними лише за інтегрованого застосування: поєднання контролю якості насіння, ліквідації «зелених мостів», просторово-часової ізоляції посі-

вів, моніторингу ранніх осередків інфекції та використання вірусостійких сортів. Ці заходи дають можливість знизити первинний інфекційний фон, уповільнити вторинне поширення вірусу в агроценозах і мінімізувати економічні збитки в зерновиробництві.

Фінансування. Дослідження фінансовано Національною академією наук України в рамках науково-дослідних проєктів (№ 0125U000536, 0125U000535) та Польською академією наук через довгострокову програму підтримки українських наукових колективів (№ PAN.BFB.S.BWZ.407.022.2024).

Конфлікт інтересів. Автори декларують про відсутність конфлікту інтересів.

Використання засобів штучного інтелекту. Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

*1,3 **A.M. Kyrychenko,**
Doctor of biology Sciences,
ORCID: 0000-0002-6098-1467

1,2,3 **H.O. Snihur,**
Candidate of biology Sciences,
ORCID: 0000-0003-4237-3406

1 **I.S. Shcherbatenko,**
Doctor of biology Sciences,
ORCID: 0000-0003-4208-2078

¹D.K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology of the National Academy of Sciences of Ukraine, 154, Akademika Zabolotnoho str., Kyiv, 03143, Ukraine

²Institute of Biochemistry and Biophysics, Polish Academy of Sciences, 5A, Adolfa Pawińskiego, Warsaw, 02-106, Poland

³Educational and Scientific Center «Institute of Biology and Medicine», Taras Shevchenko National University of Kyiv 64/13 Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine
*E-mail: a.kyrychenko@imv.org.ua

Seed-transmitted viruses of cereal crops in Ukraine: epidemiology, mechanisms of spread and phytosanitary control strategies

Goal. To conduct a comprehensive review of current data on seed-transmitted viruses of grain crops prevalent in Ukraine, analyzing their epidemiology, transmission mechanisms, phytosanitary control and preventive measures, while considering the impact of these pathogens on agroecosystems and risks to national grain production. **Methods.** The review methodology was based on the systematization of scientific publications,

regulatory sources, and international standards concerning the specifics of seed infection, the role of reservoir plants and vectors, as well as the evaluation of the effectiveness of preventive strategies in the context of modern agronomic practices and seed production systems.

Results. This review summarizes current knowledge on the mechanisms of seed and vector transmission for key viruses impacting Ukraine's grain crops economically. It identifies their epidemiological role in sustaining infections within agroecosystems and emphasizes the importance of natural reservoirs and the «green bridge». Critical elements of prevention and phytosanitary control are delineated, including the adoption of virus-free seeds, spatial-temporal isolation of crops, and the deployment of genetically resistant varieties. **Conclusion.** An integrated approach combining seed material testing and certification, agronomic measures, management of the «green bridge» (volunteer plants, segetal, and wild flora), and the use of varieties with enhanced resistance is a key prerequisite for reducing the risk of spread of viral diseases in grain crops and minimizing production losses.

seed infection; grain quality; phytosanitary control; natural infection reservoirs

REFERENCES

- Mink G.I. (1993). Pollen and seed-transmitted viruses and viroids. *Annual Review of Phytopathology*, 31, 375–402. <https://doi.org/10.1146/annurev.py.31.090193.002111>
- Jones M.W., Boyd E.C., Redinbaugh M.G. (2011). Responses of maize (*Zea mays* L.) near-isogenic lines carrying Wsm1, Wsm2, and Wsm3 to three viruses in the Potyviridae. *Theoretical and Applied Genetics*, 123(5), 729–740. <https://doi.org/10.1007/s00122-011-1622-8>
- Sastry K.S. (2013). Seed-borne plant virus diseases. Springer eBooks. 343 p. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-0813-6>
- Albrechtsen S.E. (2006). Testing methods for seed-transmitted viruses: principles and protocols. UK, Wallingford, CABI Publishing, 268 p.
- Shanmugam K., Perumal R., Oliva R., Cheng H., Iruthayasamy J., Angappan S., ..., Nalulamy S. (2024). Seed transmission of potyviruses: a threat to crop health. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 52(4), 13698. <https://doi.org/10.15835/nbha52413698>
- Pozhylov I., Snihur H. (2022). Incidence and spread of cereals viruses in 2020–2021 in Ukraine. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series «Biology»*, 90(3), 14–19. <https://doi.org/10.17721/1728.2748.2022.90.14-19>
- Mishchenko L.T. (2009). Virusni khvoroby ozymoi psHENYTSI. [Viral diseases of winter wheat]. Kyiv: Fitosotsiotsentr. 184 s. (in Ukrainian).
- Snihur H., Kharina A., Kaliuzhna M., Chumak V., Budzanivska I. (2021). First report of sugarcane mosaic virus in *Zea mays* L. in Ukraine. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 83(5), 58–66. <https://doi.org/10.15407/microbiolj83.05.058>
- Naumenko L.A. (1973). Identifikatsiia virusu mozaiky kukurudz. [Identification of maize mosaic virus]. *Mikrobiolohichni Zhurnal*, 35(4), 468–472. (in Ukrainian).
- International Committee on Taxonomy of Viruses (ICTV). 2023. Classification system: ICTV (2023 Release, MSL#39). URL: <https://ictv.global/taxonomy>
- Jackson A.O., Lim H.S., Bragg J., Ganesan U., Lee M.Y. (2009). Hordeivirus replication, movement, and pathogenesis. *Annual Review of Phytopathology*, 47(1):385–422. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080508-081733>
- European and Mediterranean Plant Protection Organization. (2002). Hordeivirus hordei (BSMV00) [Overview]. EPPO Global Database. URL: <https://gd.eppo.int/taxon/BSMV005,8sources>
- Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan bezpechnosti kharchovykh produktiv ta zakhystu spozhyvachiv. [State Service of Ukraine for Food Safety and Consumer Protection]. (2020). URL: <https://dps.gov.ua/news/na-zaporizhzhifahivci-derzhprodsposhyvluzhbi-obstezhilblizko-3-tisyach-gektariv-posiviv-yachmenyu> (in Ukrainian).
- Shevchenko G.P., Helman L.V., Nedbyga O.E. ta in. Virusni ta mikoplazmovi khvoroby poljovih kultur. [Viral and mycoplasma diseases of field crops]. Kyiv: Urozhay, 1995. 304 s. (in Ukrainian).
- Lawrence D.M., Jackson A.O. (1999). Hordeiviruses. In: A. Granoff & R.G. Webster (Eds.), *Encyclopedia of Virology* (pp. 749–753). Academic Press.
- Inoue-Nagata A.K., Jordan R., Kreuze J., Li F., López-Moya J.J., Mäkinen K., ..., Wylie S.J. (2022). ICTV Virus Taxonomy Profile: Potyviridae 2022. *Journal of General Virology*, 103(5), 001738. <https://doi.org/10.1099/jgv.0.001738>
- Gautam S., Chinnaiyah S., Herron B., Workneh F., Rush C.M., Gadhave K.R. (2023). Seed transmission of wheat streak mosaic virus and triticum mosaic virus in differentially resistant wheat cultivars. *Viruses*, 15(8), 1774. <https://doi.org/10.3390/v15081774>
- Singh K., Wegulo S.N., Skoracka A., Kundu J.K. (2018). Wheat streak mosaic virus: a century-old virus with rising importance worldwide. *Molecular Plant Pathology*, 19(9), 2193–2206. <https://doi.org/10.1111/mpp.12683>
- Hasan N., Pushpalatha R., Manivasaagam V.S., Arlikatti S. (2025). Wheat streak mosaic virus: transmission, its impact, and crop protection strategies — a systematic review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 132, 8. <https://doi.org/10.1007/s41348-024-01012-x>
- Oleynik A.N. (1968). Polosataia mozaika psHENYTSI na Ukraine. [Striped mosaic of wheat in Ukraine]. *Avtoref. diss. ... kand. biol. nauk*. Kyiv. 15 s. (in Russian).
- Mishchenko L.T., Dunich A.A., Mishchenko I.A., Petrenkova V.P., Mukha T.I. (2018). Monitoring of economically important wheat viruses under weather conditions change in Ukraine and investigation of seed transmission of Wheat streak mosaic virus. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 24, 660–669.
- Byamukama E. (2022). Wheat streak mosaic virus (wheat streak) [Datasheet]. In: CABI Compendium. Available at <https://doi.org/10.1079/cabicompendium.56858>
- McKelvey U., Brelford M., Burrows M. (2023). Evaluation of seed transmission rates of wheat streak mosaic virus in mechanically inoculated winter and spring wheat cultivars in Montana. *Plant Disease*, 107(12), 3727–3730. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-22-0898-SC>
- Tatineni S., Hein G.L. (2021). High Plains wheat mosaic virus: an enigmatic disease of wheat and corn causing the High Plains disease. *Molecular Plant Pathology*, 22(10), 1167–1179. <https://doi.org/10.1111/mpp.13113>
- Jensen S.G., Lane L.C., Seifers D.L. (1996). A new disease of maize and wheat in the high plains. *Plant Disease*, 80, 1387–1390. <https://doi.org/10.1094/PD-80-1387>
- Bragard C., Baptista P., Chatzivassiliou E., Di Serio F., Gonthier P., Miret J.A.J., ..., Reignault Ph.L. (2022). Pest categorisation of High Plains wheat mosaic virus. *EFSA Journal*, 20(5), 7302. <https://doi.org/10.2903/j.efs.2022.7302>
- Candresse T., Svanella-Dumas L., Huang A., Faure C., Comte R., Marais A. (2026). Characterization of French isolates of wheat mosaic virus and identification of multiple variants of genomic RNAs 5 and 6. *Archives of Virology*, 171, 35. <https://doi.org/10.1007/s00705-025-06507-y>
- Munkvold G., Du Toit L., Dunkle R. (2025). Seed Pathology: Challenges and advances in ensuring a safe global seed supply. *Annual Review of Phytopathology*, 63(1), 43–62. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-121423-093855>
- Burrows M., Franc G., Rush C., Blunt T., Ito D., Kinzer K., ..., Stack J. (2009). Occurrence of viruses in wheat in the Great Plains region, 2008. *Plant Health Progress*, 10(1), 14. <https://doi.org/10.1094/PHP-2009-0706-01-RS>
- Viswanathan R., Parameswari B., Nithya K. (2018). Molecular Characterization of Sugarcane Viruses and Their Diagnostics. In: R. Prasad, S.S. Gill, & N. Tuteja (Eds.), *Crop Improvement Through Microbial Biotechnology* (pp. 175–193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63987-5.00008-6>
- Shukla D.D. (1989). Taxonomy of Potyviruses Infecting Maize, Sorghum, and Sugarcane in Australia and the United States as Determined by Reactivities of Polyclonal Antibodies Directed towards Virus-Specific N-Termini of Coat Proteins. *Phytopathology*, 79(2), 223. <https://doi.org/10.1094/phyto-79-223>
- Bervers N., Ohlson E.W., KC K., Jones M.W., Khanal S. (2024). Sugarcane Mosaic Virus Detection in Maize Using UAS Multi-spectral Imagery. *Remote Sensing*, 16(17), 3296. <https://doi.org/10.3390/rs16173296>
- Clemente-Orta G., Albajes R., Achon M.A. (2020). Early planting, management of edges and non-crop habitats reduce potyvirus infection in maize. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(4). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00625-4>
- Subcommittee on Plant Health Diagnostics. (2024). National diagnostic protocol for maize dwarf mosaic virus — NDP 52 V1 (Geering A., Thomas J., Persley D., & Lovelock D., Authors). Commonwealth of Australia. URL: https://www.plantbiosecuritydiagnostics.net.au/app/uploads/2024/08/NDP-52-Potyvirus-zeanonus_Maize-dwarf-mosaic-virus.pdf
- European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO). EPPO A1 and A2 Lists of pests recommended for regulation as quarantine pests. 2025. URL: https://gd.eppo.int/download/standard/2/pm1-002-34-en_A1A2_2025.pdf
- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). Agricultural policy monitoring and evaluation 2025: Making the most of the trade and environment nexus in agriculture. Paris, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a80ac398-en>

Надійшла до редакції: 09.01.2026

Прийнята до друку: 25.02.2026

Надруковано й опубліковано онлайн:
березень 2026