

IRSTI: 68.37.13

N.A. MEIRBEKOV¹, A.B. IBRAIMOV^{1,2*}, Y.A. SYRGABEK¹, S.S. YEGEMOVA¹,
S.E. BATYRBEKOVA¹, S. Zh. KAZYBAYEVA³

¹Al-Farabi Kazakh National University, Scientific Research Institute of New Chemical
Technologies and Materials, Almaty, Kazakhstan

²Scientific Production Center of Microbiology and Virology, Almaty, Kazakhstan

³Kazakh Research Institute of Fruit and Vegetable Growing, Almaty, Kazakhstan

*e-mail.: a_bolatbekovich11@mail.ru

PATHOGENIC MICROORGANISMS OF GRAPES: MECHANISM OF INFECTION AND METHODS OF PROTECTION

doi:10.53729/MV-AS.2023.04.02

Abstract

The grape (*Vitis vinifera*) is one of the most important fruit plant species with a wide distribution throughout the world. Commercial grape varieties are susceptible to significant exposure to a variety of pathogenic microorganisms that can cause disease in plants both pre-harvest and post-harvest. These diseases significantly affect the production, processing and export of grapes, as well as their quality. Potential threats include bacteria, fungi, oomycetes and viruses, which have different life cycles, infection mechanisms and survival strategies. The interaction between grapes and pathogens involves cycles of resistance and susceptibility, the study of which allows us to identify resistance traits inherent in natural resources and use them in the breeding process to ensure sustainable agriculture. This review summarizes the main diseases affecting *Vitis vinifera*, including their causative agents. A comprehensive analysis of the infection strategies employed by different types of pathogens is also carried out, considering the plant response to infection in both resistant and susceptible scenarios. In addition, new methods used to assess the condition of grapes under conditions of biotic stress are discussed, as well as scientifically based procedures that are necessary to combat plant diseases and protect the crop from them.

Keywords: grape, pathogenic microorganisms, infection mechanism, resistance, plant protection.

Grapes are one of the most valuable fruit crops in the world [1]. These varieties are extensively cultivated for both fresh consumption and processing purposes. The majority of grapes produced worldwide are used to make wine, as well as other processed products such as jams, jellies and juices [2]. Grapes belong to the *Vitaceae* family, which includes more than 17 genera and more than 1000 species native to North America, Asia and Europe [3-5].

In the field of viticulture, the choice of grape variety not only influences the quality and quantity of the harvest but also plays a crucial role in determining the feasibility and economic viability of cultivating crops in specific regions. Issues of scientific organization of the raw material base of viticulture and winemaking in Kazakhstan occupy a leading place in solving the problems of further development of viticulture. The development of industrial viticulture in Kazakhstan began in the late 50s of the last century, and by the mid-80s the area of vineyards was 26,000 hectares, and the total grape harvest reached about 200,000 tons per year [6]. As outlined in the "Program for the Restoration and Development of Viticulture in Kazakhstan" for the period 2001-2020, the total grape cultivation area was below 9.5 thousand hectares. According to official information from the Almaty region statistics department, there are currently vineyard fields in various cities of the region, including Aksu, Balkhash, Taraz, Zharkent, Kapchagay, Sarkand, Talgar, Taldykorgan, and Tekeli [6].

Economically valuable varieties for cultivation in Kazakhstan are: Taifi; Terbash; Bayan Shirey; Huseyn Ak; Ashgabat intermediate black grapes; Gulja; Hungarian Muscat; black raisins; Nimrang [6]. According to the National Bureau of Statistics, there was a high intensity of grape production between 2012 and 2022 (Figure 1).

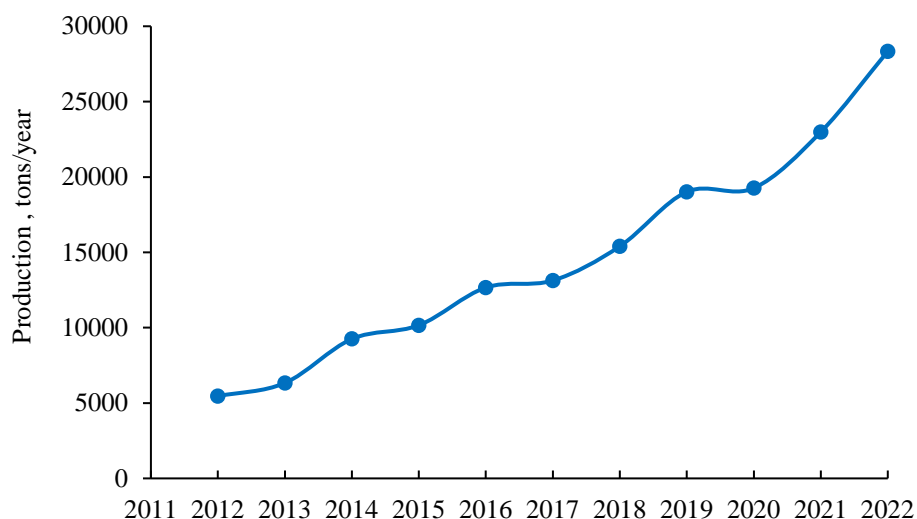


Figure 1 – Grape production in the Republic of Kazakhstan 2012-2022 year

During their life cycle, plants are exposed to a variety of pathogens, including bacteria, viruses, fungi and nematodes. Depending on the characteristics of their life cycle and the strategy of influencing the plant, pathogenic microorganisms can be classified as necrotrophs, biotrophs and hemibiotrophs [7]. Necrotrophic pathogens extract nutrients from dead tissue, in the process releasing lytic enzymes and phytotoxins that promote the destruction of host plant cells. Biotrophic pathogens, on the contrary, feed on living tissues, developing structures to penetrate the cell and obtain the products of its metabolism [8-10]. Hemibiotrophic pathogens exhibit both biotrophic and necrotrophic pathogen traits, starting with the biotrophic infection phase and then moving to the necrotrophic infection phase, leading to the death of grapes [11].

Diseases: mechanism and symptoms of infection

Infectious diseases are caused by specific fungi, viruses and bacteria. As a rule, they settle on living tissues and, accumulating in the plant, lead to its death. Pathogens are transferred from the affected plant to healthy bushes by wind, rain, or untreated tools. Gradually, the infection accumulates in the soil and fallen leaves and if protective measures are not taken, can destroy the entire crop. Some of the most important diseases of *Vitis vinifera* are gray mold, powdery mildew and downy mildew caused by *Botrytis cinerea*, *Erysiphe necator* and *Plasmopara viticola*, respectively.

Plant defense mechanisms are strictly regulated by signaling using hormones, predominantly jasmonic acid and salicylic acid. It is generally accepted that jasmonic acid and ethylene play a key role in activating defense mechanisms against necrotrophic pathogens, while salicylic acid is involved in providing protection against biotrophic and hemibiotrophic pathogens. [12]. In addition, some phospholipids released during plasma membrane degradation can directly stimulate jasmonic acid biosynthesis [13]. An increase in the concentration of jasmonic acid leads to activation of the expression of genes responsible for the synthesis of protective enzymes and molecules. These genes include glucanases, chitinases, protease inhibitors, and enzymes involved in the biosynthesis of secondary metabolites such as phytoalexins. These components play an important role in protecting plants from necrotrophic pathogens and helping to maintain their viability. Salicylic acid, on the other hand, plays an important role in mediating plant defense responses to biotrophic and hemibiotrophic pathogens. This response involves an increase in reactive oxygen species and the resulting localized programmed cell death in infected tissues. This defense mechanism is known as the hypersensitive response and serves to limit the growth of pathogens by limiting their access to nutrients and water. On the other hand, salicylic acid mediates the response to biotrophic and hemibiotrophic pathogens by causing an increase in reactive oxygen

species and consequently localized programmed cell death in the infected tissue [14]. Table 1 provides data on the mechanism and symptoms of infection with the most common grape diseases.

Table 1 – Diseases, mechanism, and symptoms of grape infection with diseases [15]






Grape disease 1	Mechanism of infection 2	Symptoms 3
 <p>Gray rot caused by a fungus <i>Botrytis cinerea</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - the first mechanism involves direct penetration of the mycelium through pores or lesions on the surface of the skin of grape berries; - the second mechanism, called early invasion, involves infection of the berries before their stigmas and stems ripen. 	<ul style="list-style-type: none"> - a plaque in the form of mouse-shaped mold covers the ripening berries, without affecting the green ones, which contain many acids; - the berries become lethargic, then turn slightly brown and fall off.
 <p>Oidium (powdery mildew) caused by the biotrophic fungus <i>Erysiphe necator</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - attaches to grape tissue cells, forming the primary germ tube (haustorium). - with the help of haustoria, the fungus extracts the nutrients necessary for its life cycle from the cells of the grape. 	<ul style="list-style-type: none"> - first in the form of a dirty-gray coating of varying consistency on the upper side of the leaves, necrosis of the leaf veins, later oily to the touch spots appear with a pronounced smell of rotten herring; - the plant gradually becomes covered with a soft coating of a characteristic gray-ash color.
 <p>Mildew (downy mildew) caused by the biotrophic oomycete <i>Plasmopara viticola</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - in the presence of water, mature sporangia release zoospores that infect plant tissues; - zoospores grows through the intercellular spaces, is surrounded by leaf veins and penetrates the grapes. 	<ul style="list-style-type: none"> - yellow, oily, round spots form on the leaves on the upper side; - in humid weather, a white powdery coating forms on the underside of the leaf; - Over time, the leaves become reddish-brown.
 <p>Bacterial cancer caused by the biotrophic fungus <i>Agrobacterium vitis</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - penetrates the DNA of cells and provokes the production of huge amounts of auxins and cytokinin's, which leads to rapid growth of the tumor; - over time, the part of the bush located above the tumor dies because of tissue conduction disturbances. 	<ul style="list-style-type: none"> - a growth in the form of a swelling on perennial wood, annual vines or roots.

Table 1 continued

1	2	3
 <p data-bbox="343 510 639 604">Pierce's disease gram-negative bacterium <i>Xylella fastidiosa</i></p>	<p data-bbox="675 224 1088 526">- vector plants such as <i>Homalodisca coagulata</i>, <i>Cicadellidae</i> and <i>Cercopoidea</i> infect grapes, creating a biofilm while feeding on xylem sap, mainly water-conducting tissue. - biofilm in xylem vessels disrupts the flow of water and nutrients through it.</p>	<p data-bbox="1110 224 1468 526">- sudden drying out of a large part of the leaf blade; - more severe yellowing, drying, and falling of leaves are observed; - dwarfism of shoots and stunted growth of stems, as well as dehydration of grape bunches are observed.</p>

The fungus *Botrytis cinerea* has the ability to exist as a parasite in living green plant tissues, and as a saprophyte in dead or decaying tissues. This dual ability allows it to be widely distributed in nature and determines its indiscriminate nature towards various plant species, including grapes [14]. The problem requires careful monitoring and measures to protect grape crops from this fungus in order to ensure the quality and safety of the harvest and wine industry products [15, 16]. Powdery mildew of grapes leads to significant losses in production, as it reduces both the yield and the quality of the fruit. The main negative effect is manifested in a decrease in the sugar content and acidity in grapes, which affects its characteristics and taste [17].

The *Erysiphe necator* fungus extracts hexoses, amino acids, vitamins and other nutrients from grapes while secreting proteins that suppress the plant's defense mechanisms. This interaction allows the fungus to successfully provide itself with nutrients and complete its life cycle [18, 19]. Resveratrol and its derivatives, such as viniferines, are bioactive compounds that may be involved in plant defense responses to pathogens. They may have antioxidant and antifungal properties, making them important components in grape defense mechanisms against powdery mildew. Increasing the level of resveratrol and viniferins can help increase the resistance of grapevine varieties to this disease and reduce its negative impact on yield and fruit quality [20].

Infection of grapes with the specific pathogen *Agrobacterium vitis* usually begins through plant damage, especially as a result of freezing and/or mechanical wounds, which promotes the release of phenolic compounds that act as chemoattractants on attached bacteria [21]. These compounds activate the transcription of genes, the products of which induce the transfer of fungal DNA into the grape genome [22].

Pierce's disease, caused by the bacterium *Xylella fastidiosa*, is an economically significant disease affecting the production of wine, table grapes and raisins [23-25]. Grapes infected with the bacterium *Xylella fastidiosa* use physical or chemical barriers after infection, such as tylose. Tylosis is the proliferation of parenchyma cells through pairs of vascular pits into the lumen of the tracheal elements. The initiation of tylose formation happens at a pace that is insufficient to control the proliferation of mobile pathogens like *Xylella fastidiosa*.

Plant protection from diseases

Detecting grape diseases poses a challenging and resource-demanding endeavor, particularly when it comes to the third aspect of pinpointing the pathogen and devising dependable strategies to mitigate or minimize economic losses. However, when it comes to treating grape diseases, some available approaches are too expensive and/or unsuitable [26]. Since most varieties of *Vitis vinifera* are affected by these pathogens, wine and fresh grape production are dependent to varying degrees on the application of control methods [27]. Various methods are used to protect grapes from pathogens, including cultural controls such as thinning and culling, cold treatment (holding plants at low temperatures to prevent or eradicate pathogens), chemical control using contact and systemic agents, and biological control using biopesticides to reduce the use of chemical pesticides [28].

Currently, integrated disease management, which includes combined methods to mitigate the threat from these pathogens and minimize negative environmental and health impacts, represents a partially effective, cost-effective and sustainable way to address the problems [29]. One of the most commonly used approaches is chemical control, which includes various classes of chemicals such as copper compounds, sulfur compounds, dithiocarbamates, benzimidazoles, antibiotics and others [30-32]. Although these chemicals are effective against fungal and bacterial pathogens, they have little effect on viral diseases. In addition, some of them can be dangerous to organisms, including viruses that transmit viral diseases. However, this method is not always effective and may not prevent future infections [33].

Modern methods of controlling grape diseases typically combine various approaches, including genetic resistance, the use of biological controls and modern monitoring technologies, to provide optimal protection to the grapevines and reduce the use of chemical fungicides. Nanomaterials and nanoparticles can be used to develop new formulations of fungicides, which increases effectiveness and reduces the need for their use [34-36]. Developing grape varieties that have built-in resistance to certain diseases is one effective method. This reduces the need for chemical treatment. Scientific research in the field of genetic engineering may lead to the creation of grape varieties with improved disease resistance [37-39]. Grape growers are increasingly adopting sustainable cultivation practices that help reduce the risk of disease, such as managing weeds, attracting beneficial insects, and improving soil structure [40, 41]. Another promising approach is to use biotechnology, such as creating biologics from plant extracts that contain pathogen resistance elements. This method could be an effective strategy applicable to agriculture in the future. Application of biologicals and microorganisms such as microbes, bacteria and fungi that compete with disease pathogens in soil or plants helps reduce the spread of diseases [42-44].

Conclusion

Modern methods of protecting grapes from diseases integrate various approaches such as genetic resistance, biological controls and modern technologies to provide optimal protection and reduce dependence on traditional fungicides. This includes developing genetically resistant grape varieties that reduce the need for chemical treatments. Biologicals and microorganisms that compete with soil and plant pathogens reduce the spread of disease. Application of nanotechnology to create more effective fungicides. Using modern monitoring technologies with sensors and the Internet of Things network for real-time monitoring of the condition of the vines and the environment. Environmentally sustainable cropping practices, such as weed control and the attraction of beneficial organisms, help reduce the risk of disease. Thus, modern methods of combating grape diseases include advanced technologies and scientific developments.

Funding

The work was carried out within the framework of the grant funding project of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan AP19680563 «Development of a biological product to increase the yield of grapes».

References:

- 1 Azevedo-Nogueira F., Rego C., Gonçalves H.M.R., Fortes A.M., Gramaje D., Martins-Lopes P. The road to molecular identification and detection of fungal grapevine trunk diseases. *Frontiers in plant science*, 2022, 13: 960289. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.960289>)
- 2 Gramaje D., Úrbez-Torres J.R., Sosnowski M.R. Managing Grapevine Trunk Diseases With Respect to Etiology and Epidemiology: Current Strategies and Future Prospects. *Plant disease*, 2018, 102(1): 12-39. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0512-FE>)
- 3 Muntean M.D., Drăgulinescu A.M., Tomoiagă L.L., Comşa M., Răcoare H.S., Sîrbu A.D., Chedea V. S. Fungal Grapevine Trunk Diseases in Romanian Vineyards in the Context of the International Situation. *Pathogens*, 2022, 11(9): 1006. (<https://doi.org/10.3390/pathogens11091006>)

- 4 Songy A., Fernandez O., Clément C., Larignon P., Fontaine F. Grapevine trunk diseases under thermal and water stresses. *Planta*, 2019, 249(6): 1655–1679. (<https://doi.org/10.1007/s00425-019-03111-8>)
- 5 Díaz G.A., Reveglia P., Tomoiagă L.L., Chedea V.S. Editorial: Fungal pathogens causing the grapevine trunk diseases- biology and identification. *Frontiers in fungal biology*, 2023, 4: 1186166. (<https://doi.org/10.3389/ffunb.2023.1186166>)
- 6 Kulzhanov S.N., Kazybayeva S.Z., Tazhibayev T.S., Azhitaeva L.A. Yessenaliyeva M. Effect of climatic conditions on the productive and biochemical characteristics of grape varieties grown on sierozem soil. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2022, 11 (2): 174-183 (<https://doi.org/10.18393/ejss.1057156>)
- 7 Hernandez M.N., Kc A.N.A Systematic Survey on Prevalence of Grapevine Trunk Disease Pathogens in Oregon Vineyards. *Plant disease*, 2023, 107(5): 1355–1364. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-05-22-1220-RE>)
- 8 Niem J.M., Billones-Baaijens R., Stodart B., Savocchia S. Diversity Profiling of Grapevine Microbial Endosphere and Antagonistic Potential of Endophytic *Pseudomonas* Against Grapevine Trunk Diseases. *Frontiers in microbiology*, 2022, 11: 477. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00477>)
- 9 Bustamante M.I., Elfar K., Eskalen A. Evaluation of the Antifungal Activity of Endophytic and Rhizospheric Bacteria against Grapevine Trunk Pathogens. *Microorganisms*, 2022, 10(10): 2035. (<https://doi.org/10.3390/microorganisms10102035>)
- 10 Mannerucci F., D'Ambrosio G., Regina N., Schiavone D., Bruno G.L. New Potential Biological Limiters of the Main Esca-Associated Fungi in Grapevine. *Microorganisms*, 2023, 11(8): 2099. (<https://doi.org/10.3390/microorganisms11082099>)
- 11 Armijo G., Schlechter R., Agurto M., Muñoz D., Nuñez C., Arce-Johnson P. Grapevine Pathogenic Microorganisms: Understanding Infection Strategies and Host Response Scenarios. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 382. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00382>)
- 12 Pieterse C. M., Leon-Reyes A., Van der Ent S., Van Wees S.C. Networking by small-molecule hormones in plant immunity. *Nature chemical biology*, 2009, 5(5): 308–316. (<https://doi.org/10.1038/nchembio.164>)
- 13 Robert-Seilaniantz A., Grant M., Jones, J.D. Hormone crosstalk in plant disease and defense: more than just jasmonate-salicylate antagonism. *Annual review of phytopathology*, 2011, 49, 317–343. (<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114447>)
- 14 Viret O., Keller M., Jaudzems, V.G., Cole, F.M. Botrytis cinerea Infection of Grape Flowers: Light and Electron Microscopical Studies of Infection Sites. *Phytopathology*, 2004, 94(8): 850–857. (<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.8.850>)
- 15 Dean R., Van Kan J.A., Pretorius Z.A., Hammond-Kosack K.E., Di Pietro A., Spanu P.D., Rudd J.J., Dickman M., Kahmann R., Ellis J., Foster G.D. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 2012, 13(4): 414–430. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>)
- 16 Rolke Y., Liu S., Quidde T., Williamson B., Schouten A., Weltring K.M., Siewers V., Tenberge K. B., Tudzynski B., Tudzynski P. Functional analysis of H₂O₂-generating systems in Botrytis cinerea: the major Cu-Zn-superoxide dismutase (BCSOD1) contributes to virulence on French bean, whereas a glucose oxidase (BCGOD1) is dispensable. *Molecular plant pathology*, 2004, 5(1): 17–27. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00201.x>)
- 17 Calonnec A., Cartolaro P., Poupot C., Dubourdiou D., Darriet P. (2004). Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathol.* 2004, 53: 434–445. (<https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01016.x>)
- 18 Qiu W., Feechan A., Dry I. Current understanding of grapevine defense mechanisms against the biotrophic fungus (Erysiphe necator), the causal agent of powdery mildew disease. *Horticulture research*, 2015, 2: 15020. (<https://doi.org/10.1038/hortres.2015.20>)
- 19 Gadoury D.M., Cadle-Davidson L., Wilcox W.F., Dry I.B., Seem R.C., Milgroom M.G. Grapevine powdery mildew (Erysiphe necator): a fascinating system for the study of the biology, ecology, and epidemiology of an obligate biotroph. *Molecular plant pathology*, 2012, 13(1): 1–16. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00728.x>)
- 20 Dai R., Ge H., Howard S., Qiu W. Transcriptional expression of Stilbene synthase genes are regulated developmentally and differentially in response to powdery mildew in Norton and Cabernet Sauvignon grapevine. *Plant science: an international journal of experimental plant biology*, 2012, 197: 70–76. (<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.09.004>)

- 21 Burr T.J., Otten L. Crown gall of grape: Biology and Disease Management. *Annual review of phytopathology*, 1999, 37: 53–80. (<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.53>)
- 22 Burr T.J., Bazzi C., Süle S., Otten L. Crown Gall of Grape: Biology of *Agrobacterium vitis* and the Development of Disease Control Strategies. *Plant Disease*, 1998, 82(12): 1288–1297. (<https://doi.org/10.1094/pdis.1998.82.12.1288>)
- 23 Newman K.L., Almeida R.P., Purcell A.H., Lindow S.E. Use of a green, fluorescent strain for analysis of *Xylella fastidiosa* colonization of *Vitis vinifera*. *Applied and environmental microbiology*, 2003, 69(12): 7319–7327. (<https://doi.org/10.1128/AEM.69.12.7319-7327.2003>)
- 24 Roper M.C., Greve L.C., Warren J.G., Labavitch J.M., Kirkpatrick B.C. *Xylella fastidiosa* requires polygalacturonase for colonization and pathogenicity in *Vitis vinifera* grapevines. *Molecular plant-microbe interactions*, 2007, 20(4): 411–419. (<https://doi.org/10.1094/MPMI-20-4-0411>)
- 25 Sun Q., Rost T.L., Matthews M.A. Pruning-induced tylose development in stems of current-year shoots of *Vitis vinifera* (Vitaceae). *American journal of botany*, 2006, 93(11): 1567–1576. (<https://doi.org/10.3732/ajb.93.11.1567>)
- 26 Kamoun S., Furzer O., Jones J. D., Judelson H.S., Ali G.S. The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 2015, 16(4): 413–434. (<https://doi.org/10.1111/mpp.12190>)
- 27 Lieth J.H., Meyer M.M., Yeo K.H., Kirkpatrick B. C. Modeling cold curing of Pierce's disease in *Vitis vinifera* 'Pinot Noir' and 'Cabernet Sauvignon' grapevines in California. *Phytopathology*, 2011, 101(12): 1492–1500. (<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-10-0207>)
- 28 Pedro H., Maheswari U., Urban M., Irvine A. G., Cuzick A., McDowall M. D., Staines D. M., Kulesha E., Hammond-Kosack K. E., Kersey P. J. PhytoPath: an integrative resource for plant pathogen genomics. *Nucleic acids research*, 2016, 44: 688–693. (<https://doi.org/10.1093/nar/gkv1052>)
- 29 Swinnen G., Goossens A., Pauwels L. Lessons from Domestication: Targeting Cis-Regulatory Elements for Crop Improvement. *Trends in plant science*, 2016, 21(6): 506–515. (<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.014>)
- 30 Calvo-Garrido C., Viñas I., Elmer P.A., Usall J., Teixidó N. Suppression of *Botrytis cinerea* on necrotic grapevine tissues by early-season applications of natural products and biological control agents. *Pest management science*, 2014, 70(4): 595–602. (<https://doi.org/10.1002/ps.3587>)
- 31 Parafati L., Vitale A., Restuccia C., Cirvilleri G. Biocontrol ability and action mechanism of food-isolated yeast strains against *Botrytis cinerea* causing post-harvest bunch rot of table grape. *Food microbiology*, 2015, 47, 85–92. (<https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.013>)
- 32 Almeida R.P., Daane K.M., Bell V. A., Blaisdell G.K., Cooper M.L., Herrbach E., Pietersen G. Ecology, and management of grapevine leafroll disease. *Frontiers in microbiology*, 2013, 4: 94. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00094>)
- 33 Jelly N.S., Schellenbaum P., Walter B., Maillot P. Transient expression of artificial microRNAs targeting Grapevine fanleaf virus and evidence for RNA silencing in grapevine somatic embryos. *Transgenic research*, 2012, 21(6): 1319–1327. (<https://doi.org/10.1007/s11248-012-9611-5>)
- 34 Vizitiu D.E., Sardaescu D.I., Fierascu I., Fierascu R.C., Soare L.C., Ungureanu C., Buciumeanu E.C., Guta I.C., Pandelea L.M. Grapevine Plants Management Using Natural Extracts and Phytosynthesized Silver Nanoparticles. *Materials*, 2022, 15(22): 8188. (<https://doi.org/10.3390/ma15228188>)
- 35 Michailidu J., Mařátková O., Kolouchová I., Masák J., Čejková A. Silver Nanoparticle Production Mediated by *Vitis vinifera* Cane Extract: Characterization and Antibacterial Activity Evaluation. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2022, 11(3): 443. (<https://doi.org/10.3390/plants11030443>)
- 36 Miřkovská A., Rabochová M., Michailidu J., Masák J., Čejková A., Lorinčík J., Mařátková O. Antibiofilm activity of silver nanoparticles biosynthesized using viticultural waste. *PloS one*, 2022, 17(8): e0272844. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272844>)
- 37 Foria S., Monte C., Testolin R., Di Gaspero G., Cipriani G. Pyramidizing resistance genes in grape: a breeding program for the selection of elite cultivars. *Acta Horti*, 2019, 1248: 549–554, (<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1248.73>)
- 38 Salotti I., Bove F., Ji T., Rossi V. Information on disease resistance patterns of grape varieties may improve disease management. *Frontiers in plant science*, 2022, 13: 1017658. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017658>)
- 39 Di Gaspero G., Cattonaro F. Application of genomics to grapevine improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2010, 16: 122–130. (<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00072.x>)

40 Giffard B., Winter S., Guidoni S., et al. Vineyard Management and Its Impacts on Soil Biodiversity, Functions, and Ecosystem Services. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 850272. (<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.850272>)

41 Jonas J.L., Wilson G. W.T., White P.M., Joern A. Consumption of mycorrhizal and saprophytic fungi by Collembola in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(10): 2594–2602. (<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.05.004>)

42 Zhang H., Godana E. A., Sui Y., Yang Q., Zhang X., Zhao L. Biological control as an alternative to synthetic fungicides for the management of grey and blue mould diseases of table grapes: a review. *Critical reviews in microbiology*, 2020, 46(4): 450–462. (<https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1794793>)

43 Rotolo C., De Miccolis Angelini R.M., Dongiovanni C., Pollastro S., Fumarola G., Di Carolo M., Perrelli D., Natale P., Faretra F. Use of biocontrol agents and botanicals in integrated management of *Botrytis cinerea* in table grape vineyards. *Pest management science*, 2018, 74(3): 715–725. (<https://doi.org/10.1002/ps.4767>)

44 Esteves M., Lage P., Sousa J., Centeno F., de Fátima Teixeira M., Tenreiro R., Mendes-Ferreira A. Biocontrol potential of wine yeasts against four grape phytopathogenic fungi disclosed by time-course monitoring of inhibitory activities. *Frontiers in microbiology*, 2023, 14, 1146065. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146065>)

Н.А. МЕЙРБЕКОВ¹, А.Б. ИБРАИМОВ^{1,2*}, Е.А. СЫРФАБЕК¹, С.С. ЕГЕМОВА¹,
С.Е. БАТЫРБЕКОВА¹, С.Ж. КАЗЫБАЕВА³

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Жаңа химиялық технологиялар мен материалдар ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

²Микробиология және вирусология ғылыми -өндірістік орталығы, Алматы, Қазақстан

³Қазақ бау-бақша шаруашылығы ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

*e-mail.: a_bolatbekovich11@mail.ru

ЖҮЗІМНІҢ ПАТОГЕНДІ МИКРООРГАНИЗДЕРІ: ИНФЕКЦИЯ МЕХАНИЗМІ ЖӘНЕ ҚОРҒАУ ӘДІСТЕРІ

Түйін

Жүзім (*Vitis vinifera*) бүкіл әлемде кеңінен таралған ең маңызды жеміс өсімдіктерінің бірі болып табылады. Жүзімнің коммерциялық сорттары егін жинауға және жинаудан кейін де ауру тудыруы мүмкін әртүрлі патогендік микроорганизмдерге айтарлықтай әсер етеді. Бұл аурулар жүзімді өндіруге, өңдеуге және экспорттауға, сондай-ақ олардың сапасына айтарлықтай әсер етеді. Ықтималды микроорганизмдерге бактериялар, саңырауқұлақтар, омицеттер және вирустар жатады, олардың өмірлік циклдері, инфекция механизмдері және өмір сүру стратегиялары әртүрлі. Жүзімнің патогенді микроорганиздері өзара әрекеттесуі төзімділік пен сезімталдық циклдарын қамтиды, оларды зерттеу табиғи ресурстарға тән қарсылық белгілерін анықтауға және оларды тұрақты ауыл шаруашылығын қамтамасыз ету үшін өсіру процесінде пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл шолуда жүзімге әсер ететін негізгі аурулар, соның ішінде олармен күресу жолдары келтірілген. Сонымен қатар, биотикалық стресс кезінде жүзімнің жағдайын бағалау үшін қолданылатын жаңа әдістер, сондай-ақ өсімдік ауруларымен күресу және қорғау үшін қажетті ғылыммен негізделген сұрақтар талқыланады.

Кілтті сөздер: жүзім, патогенді микроорганизмдер, инфекция механизмі, төзімділік, өсімдіктерді қорғау.

MPHTI: 68.37.13

Н.А. МЕЙРБЕКОВ¹, А.Б. ИБРАИМОВ^{1,2*}, Е.А. СЫРГАБЕК¹, С.С. ЕГЕМОВА¹,
С.Е. БАТЫРБЕКОВА¹, С.Ж. КАЗЫБАЕВА³

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Научно-исследовательский институт Новых химических технологий и материалов, Алматы, Казахстан

²Научно- производственный центр микробиологии и вирусологии, Алматы, Казахстан

³Казахский научно-исследовательский институт плодовоовощеводства, Алматы, Казахстан
*e-mail.: a_bolatbekovich11@mail.ru

ПАТОГЕННЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ ВИНОГРАДА: МЕХАНИЗМ ЗАРАЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ

doi:10.53729/MV-AS.2023.04.02

Аннотация

Виноград (*Vitis vinifera*) является одним из наиболее важных видов фруктовых растений, имеющих широкое распространение по всему миру. Коммерческие сорта винограда подвержены серьезному воздействию разнообразных патогенных микроорганизмов, которые способны вызывать заболевания в растениях как в период до сбора урожая, так и после него. Эти заболевания существенно влияют на производство, обработку и экспорт винограда, а также на его качество. Среди потенциальных угроз можно выделить бактерии, грибы, оомицеты и вирусы, которые характеризуются различными жизненными циклами, механизмами заражения и стратегиями выживания. Взаимодействие между виноградом и патогенами подразумевает наличие циклов устойчивости и восприимчивости, исследование которых позволяет выявить признаки устойчивости, присущие природным ресурсам, и использовать их в процессе селекции с целью обеспечения устойчивого сельского хозяйства. В данном обзоре обобщаются основные заболевания, воздействующие на *Vitis vinifera*, включая их возбудителей. Также проведен всесторонний анализ стратегий инфекции, применяемых различными типами патогенов, с учетом реакции растения на инфекцию в сценариях как устойчивости, так и восприимчивости. Кроме того, рассматриваются новые методы, применяемые для оценки состояния винограда в условиях биотических стрессов, а также научно обоснованные процедуры, которые необходимы для борьбы с болезнями растений и защиты урожая от них.

Ключевые слова: виноград, патогенные микроорганизмы, механизм заражения, устойчивость, защита растений.

Виноград – одна из самых ценных плодовых культур в мире [1]. Его широко выращивают для потребления в свежем и переработанном виде. Большая часть винограда, производимого во всем мире, используется для изготовления вина, а также - в составе других перерабатываемых продуктов, таких как джемы, желе и соки [2]. Виноград принадлежит к семейству *Vitaceae*, которое включает более 17 родов и более 1000 видов произрастающих в Северной Америке, Азии и Европе [3-5].

Сорт в виноградарстве определяет не только качество и количество урожая, но также возможность и экономическую эффективность выращивания сельскохозяйственных культур в определенных регионах. Вопросы научной организации сырьевой базы виноградарства и виноделия Казахстана занимают ведущее место в решении задач дальнейшего развития виноградарства. Развитие промышленного виноградарства в Казахстане началось в конце 50-х годов прошлого века, и к середине 80-х годов площадь виноградников составляла 26 000 га, а общий урожай винограда достигал около 200 000 тонн в год [6]. По данным «Программы восстановления и развития виноградарства в Казахстане» на 2001-2020 годы площадь виноградных насаждений составляла менее 9,5 тыс. га. По официальным данным управления статистики Алматинской области, в

настоящее время в городах регионе имеется поля виноградников в городах Аксу, Балхаш, Тараз, Жаркент, Капчагай, Сарканд, Талгар, Талдыкорган, Текели [6].

Хозяйственно ценными сортами для выращивания в Казахстана являются: Тайфи розовый, Тербаш, Баян Ширей, Гусейн Ак, виноград черный Ашхабадский промежуточный, Кульджа, Мускат венгерский, изюм черный, Нимранг [6]. Согласно данным Национального бюро статистики, в 2012–2022 годах наблюдалась высокая интенсивность производства винограда (рисунок 1).

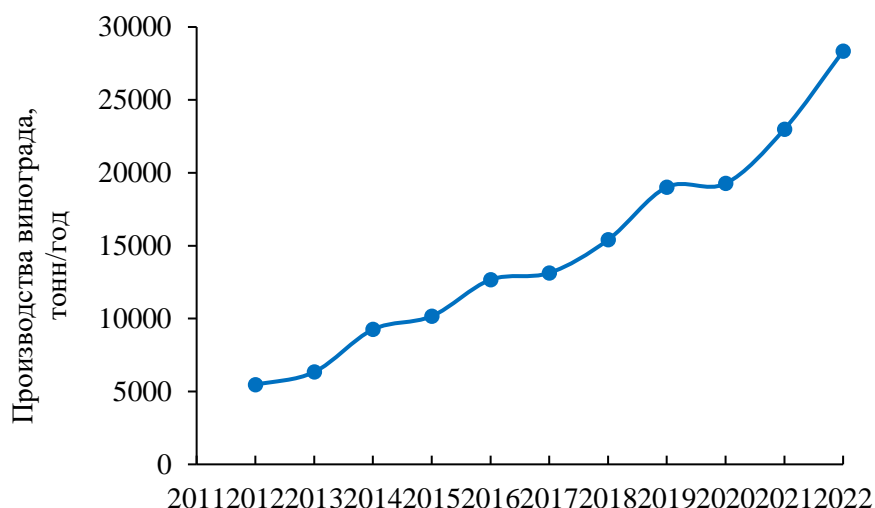


Рисунок 1 – Производство винограда в Республики Казахстан в 2012-2022 годы

В течение своего жизненного цикла растения подвергаются воздействию разнообразных патогенов, включая бактерии, вирусы, грибы и нематоды. В зависимости от особенностей их жизненного цикла и стратегии воздействия на растение, патогенные микроорганизмы могут быть классифицированы как некротрофы, биотрофы и гембиотрофы [7]. Некротрофные патогены извлекают питательные вещества из мертвых тканей, выделяя в процессе литические ферменты и фитотоксины, которые способствуют разрушению клеток растения-хозяина. Биотрофные патогены, напротив, питаются за счет живых тканей, развивая структуры для проникновения в клетку и получения продуктов ее метаболизма [8-10]. Гембиотрофные патогены проявляют как черты биотрофных, так и некротрофных патогенов, начиная с фазы биотрофной инфекции и затем переходят к фазе некротрофной инфекции, приводящей к гибели винограда [11].




Болезни, механизм и симптомы заражения

Инфекционные болезни вызываются специфическими грибами, вирусами и бактериями. Как правило, они поселяются на живых тканях и, накапливаясь в растении, приводят к его гибели. С пораженного растения ветром, дождем, необработанными инструментами патогены переносятся на здоровые кусты. Постепенно инфекция накапливается в почве и опавшей листве и, если не проводить защитные меры, может уничтожить весь урожай. Некоторые из наиболее важных заболеваний *Vitis vinifera* - это серая гниль, мучнистая роса и ложная мучнистая роса, вызываемые, *Botrytis cinerea*, *Erysiphe necator* и *Plasmopara viticola*, соответственно.

Защитные механизмы растений строго регулируются путем передачи сигналов с использованием гормонов, преимущественно жасмоновой кислоты и салициловой кислоты. Общеизвестно, что жасмоновая кислота и этилен играют ключевую роль в активации защитных механизмов против некротрофных патогенов, в то время как салициловая кислота участвует в обеспечении защиты от биотрофных и гембиотрофных патогенов. [12]. Кроме того, некоторые фосфолипиды, высвобождаемые при деградации

плазматической мембраны, могут напрямую стимулировать биосинтез жасмоновой кислоты [13]. Увеличение концентрации жасмоновой кислоты приводит к активации экспрессии генов, ответственных за синтез защитных ферментов и молекул. К таким генам относятся глюканазы, хитиназы, ингибиторы протеаз и ферменты, участвующие в биосинтезе вторичных метаболитов, таких как фитоалексины. Эти компоненты играют важную роль в защите растений от некротрофных патогенов и способствуют сохранению их жизнеспособности. Салициловая кислота, с другой стороны, играет важную роль в медиации защитного ответа растений на биотрофные и гемибитрофные патогены. Этот ответ включает увеличение активных форм кислорода и, в результате локализованную запрограммированную гибель клеток в инфицированных тканях. Этот механизм защиты известен как гиперчувствительная реакция и служит для ограничения роста патогенов путем ограничения их доступа к питательным веществам и воде. С другой стороны, салициловая кислота опосредует ответ на биотрофные и гемибитрофные патогены, вызывая увеличение количества активных форм кислорода и, следовательно, локализованную запрограммированную гибель клеток в инфицированной ткани [14]. В таблице 1 предоставлены данные о механизме и симптомах заражения наиболее распространёнными заболеваниями винограда.

Таблица 1 – Болезни, механизм и симптомы заражения винограда заболеваниями [15]

Болезнь винограда	Механизм заражения	Симптомы
1	2	3
 <p>Серая гниль вызывается грибом <i>Botrytis cinerea</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - первый механизм включает в себя прямое проникновение мицелия через поры или повреждения на поверхности кожи виноградных ягод; - второй механизм, называемый ранней инвазией, предполагает заражение ягод до их созревания рыльца и стеблей. 	<ul style="list-style-type: none"> - налет в виде плесени мышевидного цвета покрывает зреющие ягоды, не затрагивая зеленые, содержащие большое количество кислот; - ягоды становятся вялыми, затем слегка буреют и опадают.
 <p>Оидиум (мучнистая роса) вызывается биотрофным грибом <i>Erysiphe necator</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - прикрепляется к клеткам ткани винограда с образованием первичной зародышной трубки (гаустории). - с помощью гаустории гриб извлекает необходимые для своего жизненного цикла питательные вещества из клеток винограда. 	<ul style="list-style-type: none"> - вначале в виде грязно-серого налета разной консистенции на верхней стороне листьев, некроза жилок листа, позже появляются маслянистые на ощупь пятна; - растение постепенно покрывается мягким налетом характерного серо-пепельного цвета.
 <p>Милдью (ложная мучнистая роса) вызывается иотрофным оомицетом <i>Plasmopara viticola</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - в присутствии воды зрелые спорангии выделяют зооспоры, которые заражают ткани растений; - зооспоры прорастает через межклеточные пространства, окружен жилками листа и проникает в виноград. 	<ul style="list-style-type: none"> - на листьях с верхней стороны образуются желтые маслянистые округлые пятна; - во влажную погоду на нижней стороне листа образуется белый мучнистый налет; - с течением времени листья становятся красно-бурыми.

Продолжение таблицы 1

1	2	3
 <p data-bbox="268 521 628 618">Бактериальный рак вызывается биотрофным грибом <i>Agrobacterium vitis</i></p>	<p data-bbox="675 232 1070 595">- внедряется в ДНК клеток и провоцирует выработку огромного количества ауксинов и цитокининов, что приводит к быстрому разрастанию опухоли; - со временем часть куста, находящаяся выше опухоли, отмирает в результате нарушения проводимости тканей.</p>	<p data-bbox="1093 367 1474 463">- нарост в виде опухоли на многолетней древесине, однолетней лозе или корнях.</p>
 <p data-bbox="245 925 651 1043">Болезнь Пирса вызывается грамотрицательной бактерией <i>Xylella fastidiosa</i></p>	<p data-bbox="675 658 1070 987">- растения-переносчики, такие как <i>Homalodisca coagulata</i>, <i>Cicadellidae</i> и <i>Cercopoidea</i> заражают виноград, создавая биопленку во время питания соком ксилемы, в основном, водопроводящей ткани. - биопленка в сосудах ксилемы нарушает поток воды и питательных веществ по ней.</p>	<p data-bbox="1093 680 1474 1010">- внезапное усыхание большей части листовой пластинки; - сильное пожелтение, высыхание и опадение листьев; - карликовость побегов и задержка роста стеблей, а также обезвоживание гроздьев винограда.</p>

Гриб *Botrytis cinerea* обладает способностью существовать как паразит в живых зеленых тканях растений, а также как сапрофит - в мертвых или разлагающихся тканях. Эта двойственная способность позволяет ему широко распространяться в природе и обуславливает его неразборчивый характер к различным видам растений, включая виноград [14]. Проблема требует внимательного контроля и мер по защите виноградных культур от этого гриба, чтобы обеспечить качество и сохранность урожая и продукции винодельческой отрасли [15, 16]. Мучнистая роса винограда приводит к значительным потерям в производстве, так как снижает как урожайность, так и качество плодов. Основной негативный эффект проявляется в снижении содержания сахара и кислотности в ягодах винограда, что влияет на его характеристики и вкусовые свойства [17].

Гриб *Erysiphe necator* извлекает гексозу, аминокислоты, витамины и другие питательные вещества из винограда, одновременно секретируя белки, которые подавляют защитные механизмы растения. Это взаимодействие позволяет грибу успешно обеспечивать себя питательными веществами и завершать свой жизненный цикл [18, 19]. Ресвератрол и его производные, такие как виниферины, являются биологически активными соединениями, которые могут участвовать в оборонительной реакции растения на патогены. Они могут обладать антиоксидантными и антигрибковыми свойствами, что делает их важными компонентами в механизмах защиты винограда от мучнистой росы. Увеличение уровня ресвератрола и виниферинов может способствовать повышению устойчивости сортов виноградной лозы к данному заболеванию и снижению его негативного воздействия на урожай и качество плодов [20].

Заражение винограда специфическим возбудителем *Agrobacterium vitis* обычно начинается через повреждения растений, особенно в результате замораживания и/или механических ран, что способствует высвобождению фенольных соединений, которые действуют как хемоаттрактанты на прикрепленные бактерии [21]. Эти соединения

активируют транскрипцию генов, продукты которых индуцируют перенос ДНК грибка в геном винограда [22].

Болезнь Пирса, вызываемая бактерией *Xylella fastidiosa*, является экономически значимым заболеванием, наносящим ущерб производству вина, столового винограда и изюма [23-25]. Виноград, зараженный бактерией *Xylella fastidiosa*, использует физические или химические барьеры после заражения, такие как тилоза. Тилоза представляет собой разрастание клеток паренхимы через пары сосудистых ямок в просвет элементов трахеи. Инициация тилозы происходит слишком медленно, чтобы ограничить распространение мобильных патогенов, таких как *Xylella fastidiosa*.

Защита растений от заболеваний

Диагностика заболеваний винограда - это сложная и ресурсозатратная задача, особенно в третьем рассмотрении определения возбудителя и определения надежных стратегий для предотвращения или сокращения экономических потерь. Однако, когда речь заходит о лечении болезней винограда, некоторые доступные подходы слишком дороги и/или непригодны [26]. Поскольку большинство разновидностей *Vitis vinifera* зависит от воздействия упомянутых патогенов, производство вина и свежего винограда в различной степени зависит от применения методов борьбы [27]. В рамках защиты винограда от патогенных микроорганизмов используются различные методы, включая культурный контроль, такой как прореживание и выращивание культуры, «холодное лечение» (выдержка растений при низких температурах для предотвращения или искоренения патогенов), химический контроль с применением контактных и системных средств, биологический контроль с применением биопестицидов для сокращения применения химических пестицидов [28].

В настоящее время комплексное управление заболеваниями, которое включает в себя комбинированные методы смягчения угрозы со стороны этих патогенов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду и здоровье, представляет собой частично эффективный, экономически выгодный и устойчивый способ решения проблем [29]. Один из наиболее часто используемых подходов - это химический контроль, который включает в себя различные классы химических веществ, такие как соединения меди, соединения серы, дитиокарбаматы, бензимидазолы, антибиотики и другие [30-32]. Хотя эти химические вещества эффективны в борьбе с грибковыми и бактериальными патогенами, они оказывают незначительное воздействие на вирусные заболевания [33].

Современные методы борьбы с болезнями винограда обычно комбинируют различные подходы, включая генетическую устойчивость, применение биологических средств защиты и современные технологии мониторинга, чтобы обеспечить оптимальную защиту виноградных лоз и уменьшить использование химических фунгицидов. Наноматериалы и наночастицы могут быть использованы для разработки новых форм фунгицидов [34-36]. Разработка сортов винограда, которые обладают встроенной устойчивостью к определенным болезням, является одним из эффективных методов. Это позволяет снизить необходимость в химической обработке. Научные исследования в области генной инженерии могут привести к созданию виноградных сортов с улучшенной устойчивостью к болезням [37-39]. Виноградари все чаще прибегают к экологически устойчивым методам возделывания, которые способствуют снижению риска возникновения болезней, например, привлечение полезных насекомых и улучшение структуры почвы [40, 41]. Другой перспективный подход заключается в использовании биотехнологии, например, создании биопрепаратов из растительных экстрактов, которые содержат элементы устойчивости патогенов. Этот метод может стать эффективной стратегией, применимой в сельском хозяйстве в будущем. Применение биопрепаратов и микроорганизмов, таких как микробы, бактерии и грибы, которые конкурируют с патогенами болезней в почве или на растениях, помогает уменьшить распространение болезней [42-44].

Заклучение

Современные методы защиты винограда от болезней интегрируют различные подходы, такие как генетическая устойчивость, биологические средства защиты и современные технологии, с целью обеспечения оптимальной защиты и снижения зависимости от традиционных фунгицидов. Это включает в себя разработку генетически устойчивых сортов винограда, что уменьшает необходимость в химической обработке. Биологические препараты и микроорганизмы, конкурирующие с патогенами на почве и растениях, уменьшают распространение болезней. Применение нанотехнологий для создания более эффективных фунгицидов. Использование современных технологий мониторинга с датчиками и сетью Интернета вещей для реального времени контроля за состоянием виноградных лоз и окружающей средой. Экологически устойчивые методы возделывания, такие как борьба с сорняками и привлечение полезных организмов, помогают снизить риск возникновения болезней. Таким образом, современные методы борьбы с болезнями винограда включают передовые технологии и научные разработки.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан AP19680563 «Разработка биопрепарата для повышения урожайности винограда».

Литература:

- 1 Azevedo-Nogueira F., Rego C., Gonçalves H.M.R., Fortes A.M., Gramaje D., Martins-Lopes P. The road to molecular identification and detection of fungal grapevine trunk diseases. *Frontiers in plant science*, 2022, 13: 960289. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.960289>)
- 2 Gramaje D., Úrbez-Torres J.R., Sosnowski M.R. Managing Grapevine Trunk Diseases With Respect to Etiology and Epidemiology: Current Strategies and Future Prospects. *Plant disease*, 2018, 102(1): 12–39. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-04-17-0512-FE>)
- 3 Muntean M.D., Drăgulinescu A.M., Tomoiagă L.L., Comşa M., Răcoare H.S., Sîrbu A.D., Chedea V. S. Fungal Grapevine Trunk Diseases in Romanian Vineyards in the Context of the International Situation. *Pathogens*, 2022, 11(9): 1006. (<https://doi.org/10.3390/pathogens11091006>)
- 4 Songy A., Fernandez O., Clément C., Larignon P., Fontaine F. Grapevine trunk diseases under thermal and water stresses. *Planta*, 2019, 249(6): 1655–1679. (<https://doi.org/10.1007/s00425-019-03111-8>)
- 5 Díaz G.A., Reveglia P., Tomoiagă L.L., Chedea V.S. Editorial: Fungal pathogens causing the grapevine trunk diseases- biology and identification. *Frontiers in fungal biology*, 2023, 4: 1186166. (<https://doi.org/10.3389/ffunb.2023.1186166>)
- 6 Kulzhanov S.N., Kazybayeva S.Z., Tazhibayev T.S., Azhitaeva L.A. Yessenaliyeva M. Effect of climatic conditions on the productive and biochemical characteristics of grape varieties grown on sierozem soil. *Eurasian Journal of Soil Science*, 2022, 11 (2): 174-183 (<https://doi.org/10.18393/ejss.1057156>)
- 7 Hernandez M.N., Kc A.N.A Systematic Survey on Prevalence of Grapevine Trunk Disease Pathogens in Oregon Vineyards. *Plant disease*, 2023, 107(5): 1355–1364. (<https://doi.org/10.1094/PDIS-05-22-1220-RE>)
- 8 Niem J.M., Billones-Baaijens R., Stodart B., Savocchia S. Diversity Profiling of Grapevine Microbial Endosphere and Antagonistic Potential of Endophytic *Pseudomonas* Against Grapevine Trunk Diseases. *Frontiers in microbiology*, 2022, 11: 477. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00477>)
- 9 Bustamante M.I., Elfar K., Eskalen A. Evaluation of the Antifungal Activity of Endophytic and Rhizospheric Bacteria against Grapevine Trunk Pathogens. *Microorganisms*, 2022, 10(10): 2035. (<https://doi.org/10.3390/microorganisms10102035>)
- 10 Mannerucci F., D'Ambrosio G., Regina N., Schiavone D., Bruno G.L. New Potential Biological Limiters of the Main Esca-Associated Fungi in Grapevine. *Microorganisms*, 2023, 11(8): 2099. (<https://doi.org/10.3390/microorganisms11082099>)
- 11 Armijo G., Schlechter R., Agurto M., Muñoz D., Nuñez C., Arce-Johnson P. Grapevine Pathogenic Microorganisms: Understanding Infection Strategies and Host Response Scenarios. *Frontiers in plant science*, 2016, 7: 382. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00382>)

- 12 Pieterse C. M., Leon-Reyes A., Van der Ent S., Van Wees S.C. Networking by small-molecule hormones in plant immunity. *Nature chemical biology*, 2009, 5(5): 308–316. (<https://doi.org/10.1038/nchembio.164>)
- 13 Robert-Seilaniantz A., Grant M., Jones, J.D. Hormone crosstalk in plant disease and defense: more than just jasmonate-salicylate antagonism. *Annual review of phytopathology*, 2011, 49, 317–343. (<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-073009-114447>)
- 14 Viret O., Keller M., Jaudzems, V.G., Cole, F.M. Botrytis cinerea Infection of Grape Flowers: Light and Electron Microscopical Studies of Infection Sites. *Phytopathology*, 2004, 94(8): 850–857. (<https://doi.org/10.1094/PHYTO.2004.94.8.850>)
- 15 Dean R., Van Kan J.A., Pretorius Z.A., Hammond-Kosack K.E., Di Pietro A., Spanu P.D., Rudd J.J., Dickman M., Kahmann R., Ellis J., Foster G.D. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 2012, 13(4): 414–430. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x>)
- 16 Rolke Y., Liu S., Quidde T., Williamson B., Schouten A., Weltring K.M., Siewers V., Tenberge K. B., Tudzynski B., Tudzynski P. Functional analysis of H₂O₂-generating systems in Botrytis cinerea: the major Cu-Zn-superoxide dismutase (BCSOD1) contributes to virulence on French bean, whereas a glucose oxidase (BCGOD1) is dispensable. *Molecular plant pathology*, 2004, 5(1): 17–27. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00201.x>)
- 17 Calonec A., Cartolaro P., Poupot C., Dubourdieu D., Darriet P. (2004). Effects of *Uncinula necator* on the yield and quality of grapes (*Vitis vinifera*) and wine. *Plant Pathol.* 2004, 53: 434–445. (<https://doi.org/10.1111/j.0032-0862.2004.01016.x>)
- 18 Qiu W., Feechan A., Dry I. Current understanding of grapevine defense mechanisms against the biotrophic fungus (*Erysiphe necator*), the causal agent of powdery mildew disease. *Horticulture research*, 2015, 2: 15020. (<https://doi.org/10.1038/hortres.2015.20>)
- 19 Gadoury D.M., Cadle-Davidson L., Wilcox W.F., Dry I.B., Seem R.C., Milgroom M.G. Grapevine powdery mildew (*Erysiphe necator*): a fascinating system for the study of the biology, ecology, and epidemiology of an obligate biotroph. *Molecular plant pathology*, 2012, 13(1): 1–16. (<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00728.x>)
- 20 Dai R., Ge H., Howard S., Qiu W. Transcriptional expression of Stilbene synthase genes are regulated developmentally and differentially in response to powdery mildew in Norton and Cabernet Sauvignon grapevine. *Plant science: an international journal of experimental plant biology*, 2012, 197: 70–76. (<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.09.004>)
- 21 Burr T.J., Otten L. Crown gall of grape: Biology and Disease Management. *Annual review of phytopathology*, 1999, 37: 53–80. (<https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.53>)
- 22 Burr T.J., Bazzi C., Süle S., Otten L. Crown Gall of Grape: Biology of *Agrobacterium vitis* and the Development of Disease Control Strategies. *Plant Disease*, 1998, 82(12): 1288–1297. (<https://doi.org/10.1094/pdis.1998.82.12.1288>)
- 23 Newman K.L., Almeida R.P., Purcell A.H., Lindow S.E. Use of a green, fluorescent strain for analysis of *Xylella fastidiosa* colonization of *Vitis vinifera*. *Applied and environmental microbiology*, 2003, 69(12): 7319–7327. (<https://doi.org/10.1128/AEM.69.12.7319-7327.2003>)
- 24 Roper M.C., Greve L.C., Warren J.G., Labavitch J.M., Kirkpatrick B.C. *Xylella fastidiosa* requires polygalacturonase for colonization and pathogenicity in *Vitis vinifera* grapevines. *Molecular plant-microbe interactions*, 2007, 20(4): 411–419. (<https://doi.org/10.1094/MPMI-20-4-0411>)
- 25 Sun Q., Rost T.L., Matthews M.A. Pruning-induced tylose development in stems of current-year shoots of *Vitis vinifera* (Vitaceae). *American journal of botany*, 2006, 93(11): 1567–1576. (<https://doi.org/10.3732/ajb.93.11.1567>)
- 26 Kamoun S., Furzer O., Jones J. D., Judelson H.S., Ali G.S. The Top 10 oomycete pathogens in molecular plant pathology. *Molecular plant pathology*, 2015, 16(4): 413–434. (<https://doi.org/10.1111/mpp.12190>)
- 27 Lieth J.H., Meyer M.M., Yeo K.H., Kirkpatrick B. C. Modeling cold curing of Pierce's disease in *Vitis vinifera* 'Pinot Noir' and 'Cabernet Sauvignon' grapevines in California. *Phytopathology*, 2011, 101(12): 1492–1500. (<https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-10-0207>)
- 28 Pedro H., Maheswari U., Urban M., Irvine A. G., Cuzick A., McDowall M. D., Staines D. M., Kulesha E., Hammond-Kosack K. E., Kersey P. J. PhytoPath: an integrative resource for plant pathogen genomics. *Nucleic acids research*, 2016, 44: 688–693. (<https://doi.org/10.1093/nar/gkv1052>)

- 29 Swinnen G., Goossens A., Pauwels L. Lessons from Domestication: Targeting Cis-Regulatory Elements for Crop Improvement. *Trends in plant science*, 2016, 21(6): 506–515. (<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.014>)
- 30 Calvo-Garrido C., Viñas I., Elmer P.A., Usall J., Teixidó N. Suppression of Botrytis cinerea on necrotic grapevine tissues by early-season applications of natural products and biological control agents. *Pest management science*, 2014, 70(4): 595–602. (<https://doi.org/10.1002/ps.3587>)
- 31 Parafati L., Vitale A., Restuccia C., Cirvilleri G. Biocontrol ability and action mechanism of food-isolated yeast strains against Botrytis cinerea causing post-harvest bunch rot of table grape. *Food microbiology*, 2015, 47, 85–92. (<https://doi.org/10.1016/j.fm.2014.11.013>)
- 32 Almeida R.P., Daane K.M., Bell V. A., Blaisdell G.K., Cooper M.L., Herrbach E., Pietersen G. Ecology, and management of grapevine leafroll disease. *Frontiers in microbiology*, 2013, 4: 94. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00094>)
- 33 Jelly N.S., Schellenbaum P., Walter B., Maillot P. Transient expression of artificial microRNAs targeting Grapevine fanleaf virus and evidence for RNA silencing in grapevine somatic embryos. *Transgenic research*, 2012, 21(6): 1319–1327. (<https://doi.org/10.1007/s11248-012-9611-5>)
- 34 Vizitiu D.E., Sardaescu D.I., Fierascu I., Fierascu R.C., Soare L.C., Ungureanu C., Buciumeanu E.C., Guta I.C., Pandelea L.M. Grapevine Plants Management Using Natural Extracts and Phytosynthesized Silver Nanoparticles. *Materials*, 2022, 15(22): 8188. (<https://doi.org/10.3390/ma15228188>)
- 35 Michailidu J., Maťátková O., Kolouchová I., Masák J., Čejková A. Silver Nanoparticle Production Mediated by *Vitis vinifera* Cane Extract: Characterization and Antibacterial Activity Evaluation. *Plants (Basel, Switzerland)*, 2022, 11(3): 443. (<https://doi.org/10.3390/plants11030443>)
- 36 Miškovská A., Rabochová M., Michailidu J., Masák J., Čejková A., Lorinčík J., Maťátková O. Antibiofilm activity of silver nanoparticles biosynthesized using viticultural waste. *PloS one*, 2022, 17(8): e0272844. (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272844>)
- 37 Foria S., Monte C., Testolin R., Di Gaspero G., Cipriani G. Pyramidizing resistance genes in grape: a breeding program for the selection of elite cultivars. *Acta Hortic*, 2019, 1248: 549-554. (<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2019.1248.73>)
- 38 Salotti I., Bove F., Ji T., Rossi V. Information on disease resistance patterns of grape varieties may improve disease management. *Frontiers in plant science*, 2022, 13: 1017658. (<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1017658>)
- 39 Di Gaspero G., Cattonaro F. Application of genomics to grapevine improvement. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 2010, 16: 122–130. (<https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2009.00072.x>)
- 40 Giffard B., Winter S., Guidoni S., et al. Vineyard Management and Its Impacts on Soil Biodiversity, Functions, and Ecosystem Services. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 850272. (<https://doi.org/10.3389/fevo.2022.850272>)
- 41 Jonas J.L., Wilson G. W.T., White P.M., Joern A. Consumption of mycorrhizal and saprophytic fungi by Collembola in grassland soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(10): 2594–2602. (<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.05.004>)
- 42 Zhang H., Godana E. A., Sui Y., Yang Q., Zhang X., Zhao L. Biological control as an alternative to synthetic fungicides for the management of grey and blue mould diseases of table grapes: a review. *Critical reviews in microbiology*, 2020, 46(4): 450–462. (<https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1794793>)
- 43 Rotolo C., De Miccolis Angelini R.M., Dongiovanni C., Pollastro S., Fumarola G., Di Carolo M., Perrelli D., Natale P., Faretra F. Use of biocontrol agents and botanicals in integrated management of Botrytis cinerea in table grape vineyards. *Pest management science*, 2018, 74(3): 715–725. (<https://doi.org/10.1002/ps.4767>)
- Esteves M., Lage P., Sousa J., Centeno F., de Fátima Teixeira M., Tenreiro R., Mendes-Ferreira A. Biocontrol potential of wine yeasts against four grape phytopathogenic fungi disclosed by time-course monitoring of inhibitory activities. *Frontiers in microbiology*, 2023, 14, 1146065. (<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1146065>)