

IRSTI: 62.09.39

K.G. MUSTAFIN¹, N.A. BSKO², Zh.B. SULEIMENOVA^{3,1*}, A.S. ZHAKIPBEKOVA¹,
Zh.B. NARMURATOVA⁴, G.K. ZHUMAGALIEVA¹, A.K. KALIEVA⁵, G.B. ADMANOVA⁵

¹Scientific-Production Enterprise «Antigen», Almaty, Kazakhstan

²N.G. Kholodny Institute of Botany, Kiev, Ukraine

³Research and Production Center for Microbiology and Virology, Almaty, Kazakhstan

⁴Kazakh National Technical Research University named after K. Satbayev, Almaty, Kazakhstan

⁵K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan

*e-mail: msyban@mail.ru

BASIDIOMYCETES - POTENTIAL BIOCONTROL AGENTS

doi:10.53729/MV-AS.2024.01.05

Abstract

In agriculture, there is an urgent need for environmentally friendly biological products to control plant diseases. In this regard, macromycetes are of great interest because they play an important role in natural ecosystems due to their versatility in nutrition and various interactions with plants. Basidiomycetes are a rich source of various biologically active substances. The secondary metabolites of Basidial fungi have antimicrobial, antitumor and antioxidant properties. This review is devoted to the potential role of basidiomycetes as a basis for the creation of new promising environmentally friendly phytotoxic and phytostimulating biopreparations to control plant diseases and weeds.

Keywords: higher fungi, biopesticides, phytotoxicity, phytostimulation.

In the process of increasing crop yields, all chemicals such as herbicides, insecticides, fungicides as well as fertilizers and soil additives are now used more widely than in the past [1]. The continuous use of synthetic chemicals led to resistance to pesticides, toxicity to humans, plants and animals, and therefore they are considered as environmentally hazardous [2]. In this regard, it is necessary to use environmentally friendly plant protection products, which contributes to the sustainable development of agricultural production with minimal damage to the environment [3].

For a long time, farmers used technologies to make their crop fields more ecologically homogeneous in order to increase yields, including tillage, controlled irrigation, and the application of fertilizers and pesticides. Over the past 100 years, large-scale mechanization of sowing and harvesting has further increased the environmental homogeneity present in agroecosystems [4, 5]. The homogeneous genetic and physical environment of agroecosystems has created a selective environment that favors the emergence of new, crop pathogens that evolve faster and are more virulent than their "wild" ancestors are. The increased planting density and genetic homogeneity of host populations in such agroecosystems facilitate the transmission of the pathogen compared to natural ecosystems, which contributes to an increase in the virulence of the pathogen [6]. These factors also increase the size of the pathogen population, ensuring their greater genetic diversity by increasing the total number of mutations [7].

Thus, the variety of pests and pathogens is constantly growing, and over time, new strains - pathogens of diseases of agricultural crops constantly appear [8]. In this regard, scientists around the world are looking for alternative safe and effective ways to control plant pathogens and pests. In this regard, basidiomycetes are of great interest due to their wide range of medicinal properties, easy availability and non-toxicity for non-target organisms [9].

Currently, among 140,000 species of basidiomycetes about 660 have medicinal properties [10]. They produce substances of different chemical structures, including alkaloids, terpenoids, phenolic compounds, flavonoids and many others, which have many valuable properties [11].

According to their classification, basidiomycetes are a class of higher fungi with a well-developed multicellular mycelium. Some compounds were isolated from wild-growing basidiomycetes that inhibited the growth of bacteria, viruses, and fungi (Table 1), and also showed nematocidal and insecticidal properties [12-25].

Table 1 - Active compounds isolated from different types of basidiomycetes

Fungal strain	Active compounds	Pathogen
<i>Ganoderma lucidum</i>	Ganodermin	<i>Physalospora piricola</i> ; <i>Botrytis cinerea</i>
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Pleurostrin	<i>Botryosphaeria berengeriana</i>
<i>Pleurotus eryngii</i>	Eryngin	<i>Mycosphaerella arachidicola</i>
<i>Lyophyllum shimeji</i>	Antifungal protein mLAP	<i>Physalospora piricola</i>
<i>Lyophyllum shimeji</i>	Lyophyllin	<i>Physalospora piricola</i>
<i>Albatrellus dispansus</i>	Grifoline	<i>Alternaria alternata</i> ; <i>Pyricularia oryzae</i> ; <i>Rhizoctonia solani</i> ; <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> ; <i>Fusarium graminearum</i> ; <i>Botrytis cinerea</i> ; <i>Gaeumannomyces graminis</i> ; <i>Gloesporium fructigenum</i>
<i>Hypsizigus marmoreus</i>	Hypsin	<i>Botryosphaeria berengeriana</i> ; <i>Botrytis cinerea</i> ; <i>Mycosphaerella arachidicola</i>

Fungal plant diseases

Fungi can cause serious damage to plants because of the spores which provide copious inoculums which may infect other plants. The time between infection and the production of further infectious spores may be only a few days [26]. Spores, if wettable, can spread as a high density inoculum with water [27]. Moreover, spores can produce phytotoxic compounds [28].

Thus, *Colletotrichum* phytopathogens cause anthracnose and root rot of various crops, such as strawberries, gooseberries, etc. [29, 30]. Significant differences occur in crop and host range with some strains capable of infecting many host plant species while others are limited to a single species [31, 32]. Rice, which is the main crop in the economy of many countries, is affected by ascomycetes *Pyricularia oryzae*, *Magnaporthe grisea*, causing blast, which leads to 10-30% annual yield loss [33]. Other grass species are also affected by *P. oryzae*, *Eleusine coracana*, or similar species [34, 35].

Some fungi produce mycotoxins. For example, fumonisin toxins have been found for the first time in South Africa. They were isolated from *Gibberella fujikuroi* and *Fusarium moniliforme* grown on corn, and the most active compound was designated as fumonisin B1 (FB1) [36]. FB1 is an analogue of sphinganine, which inhibits the synthesis of sphingolipids in both plant and animal cells, causing the accumulation of sphingoid bases [37].

Basidial fungi as potential biocontrol agents

Activity of higher fungi against phytopathogenic fungi

The antifungal drug grifolin, isolated from the basidial fungus *Albatrellus dispansus*, proved to be effective against a number of phytopathogenic fungi *in vitro* [38]. Phellinsin A isolated from *Phellinus* sp. inhibits *Gloeosporium orbiculare*, *Pyricularia grisea*, *Thanatephorus cucumeris*, *Aspergillus fumigatus*, and *Trichophyton mentagrophytes* [39]. The main fungicides commonly used in agrochemistry were obtained from *Strobilurus tenacellus* [40]. Strobilurins are a class of fungicidal compounds that are extracted from the mycelium of *S. tenacellus* (Figure 1). Strobilurins A (Figure 1, a) and B (Figure 1, b), have a high fungicidal activity and inhibit the respiration of yeast and other filamentous fungi [41].

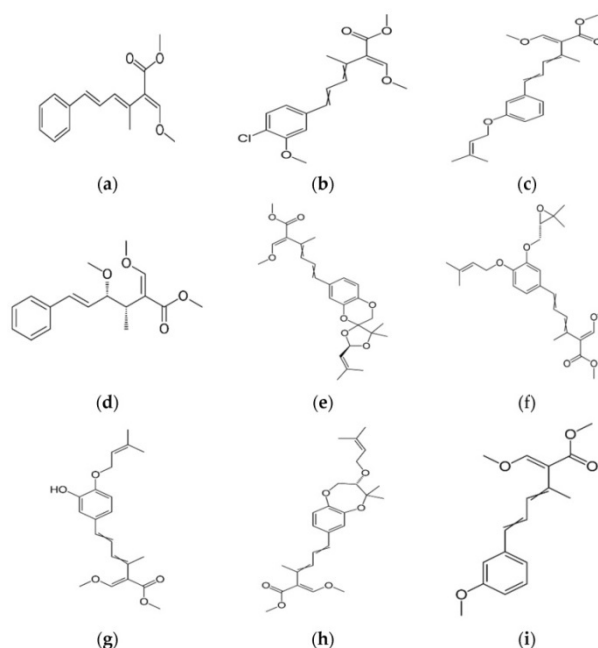


Figure 1 – Strobilurins of higher fungi ((a) - Strobilurin A; (b) - Strobilurin B; (c) -Strobilurin C; (d) - Oudemansin B; (e) - Strobilurin E; (f) - Strobilurin D; (g, h) - Strobilurin F; (i) - Strobilurin H)

Strobilurins are considered to be the most significant group of fungicides that can be classified as biofungicides due to broad spectrum of activity and environmental safety. Strobilurins are site-specific (inhibition of mitochondrial respiration) and translaminar (systemic) compounds that provide biological control of *Oomycota*, *Ascomycota*, *Basidiomycota* and *Deuteromycota* fungi. (E)- β -methoxyacrylates of strobilurin C (Figure 1, c) and oudemansin B (Figure 1, d) isolated from *Xerula pudens* inhibit many species of phytopathogenic fungi. Like strobilurins A and B, they also inhibit fungal respiration [42]. Strobilurin E (Figure 1, e) is another antifungal compound of the (E)- β -methoxyacrylate class, extracted from *Crepidotus fulvotomentosus*. It was found that in addition to inhibiting fungal respiration it has been shown to induce cell deformation [43]. Strobilurin D (Figure 1, f) is strobilurin extracted from the basidial fungus *Merismodes anomala*; they contain cytostatic and antifungal antibiotics of the (E)- β -methoxyacrylate class. These strobilurins inhibit many fungi and, like strobilurins A and B, and also provide inhibition of mitochondrial respiration [43, 44]. Other strobilurins F (Figure 1, g, h) and H (Figure 1, i) obtained from the culture liquid of *Bolinea lutea* inhibited *Aspergillus fumigatus*, *Botrytis cinerea*, *Microsporum canis* and *Sporothrix schenckii*. These compounds also inhibited respiration mushrooms.

Ganodermin isolated from *G. lucidum* inhibited the growth of phytopathogenic fungi *Botrytis cinerea*, *F. oxysporum* and *Peyronella arachidicola* [1]. Pleurostrin, an antifungal peptide about half the size of ganodermin, isolated from the oyster mushroom *P. ostreatus*, had an inhibitory effect on *Fusarium oxysporum*, *Mycosphaerella arachidicola*, and *Physalospora piricola* [45].

Activity of higher fungi against phytopathogenic bacteria

Secondary metabolites isolated from various basidiomycetes exhibit antibacterial properties [46–49]. *Ganodermatales*, *Poriales*, *Agaricales*, and *Stereales* fungi demonstrate antibacterial activity against various pathogenic bacteria and can become the basis for the development of new antibiotics [50]. It was found that 15 extracts of *Basidiomycetes* have moderate to high antibacterial activity. Among them 11 completely inhibited bacterial growth, and 4 showed partial inhibition of potato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum* [51].

Clytocybe geotropa extract showed a wide range of inhibition against *R. solanacearum*, *Erwinia carotovora subsp. Carotovora*, *P. syringae pv. syringae*, *X. campestris pv. vesicatoria*

and *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* (causative agent of potato ring rot). The purified clitocypin protein from *C. geotropa* was found to inhibit the disease caused by *Clavibacter michiganensis* [52]. The fungicide strobilurin F 500 increases the resistance of tobacco to the causative agent of *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci* [53]. Coprinol isolated from *Coprinus* sp. showed inhibitory activity against most phytopathogens [54].

Activity of higher fungi against phytopathogenic viruses

Compounds derived from higher fungi with activity against phytopathogenic viruses can be divided into two main classes: biological response modifiers and virus inhibitors [55]. The influence of basidiomycete polysaccharides was studied in human and animal viruses [56]. It was found that strains of *Ganoderma lucidum* and *G. applanatum* are able to inhibit tobacco mosaic virus with concentration of 1000 µg/mL [57]. The filtrate from the culture liquid of the tinder fungus *Fomes fomentarius* is effective against tobacco mosaic virus [58]. Aqueous extracts of the fruiting bodies of *Agaricus brasiliensis* and *Lentinula edodes* also showed antiviral activity against tobacco mosaic virus [59].

Activity of higher fungi against nematodes

More than 4100 nematode species have a negative impact on economically important crops. Damage caused by plant nematodes is estimated at 12.3% (US\$157 billion) worldwide [60]. The full degree of nematode infestation cannot be fully assessed since symptoms of disease caused by nematodes can be difficult to detect [61, 62]. Researchers around the world are showing increasing interest in reducing the use of chemicals against nematodes [63-65]. A recent study showed that some species of edible basidiomycetes, such as *Pleurotus* species, have nematocidal activity due to the production of a toxin capable to inhibit the movement of nematodes [66]. Such biological activity may be the result of the self-protection mechanism of fungi, which acts against nematodes-myceliophages [67]. Other studies show that *P. ostreatus* produces a peroxide-like toxin that inhibits the movement of nematodes and subsequently destroys them, reaching 95% mortality in free-living nematodes *Panagrellus redivivus* (adults) and phytopathogenic nematodes *Bursaphelenchus xylophilus* [68]. Another study showed that *P. eryngii* causes 50% mortality from the phytopathogenic nematode *Heterodera schantii*, which caused wilting in sugarcane and other crops. In general, the nematocidal activity exhibited by different strains of *P. eryngii* ranged from 4.8–99.6%.

The nematocidal effect of basidiomycetes is affected by temperature, strain's genetic characteristics, and specific differences between nematodes [69]. Some dead nematode larvae were found to have fungal mycelium inside the body, suggested that the death of the larvae was a consequence of fungal mycelium invasion. Thus, *Coprinus comatus* exhibited nematocidal effects against free-living nematodes *Panagrellus redivivus* and root-knot nematodes *Meloidogyne arenaria* [70]. Mechanical damage to the free-living nematode *P. redivivus* was detected 8 hours after infection by *C. comatus* mycelium, which led to the immobilization of 90% of the nematodes and their subsequent death after incubation at 24°C. Strains of edible basidiomycetes *Pleurotus ostreatus* ECS-1123 and ECS-0152, *P. eryngii* ECS-1290 and ECS-1291, *P. cornucopiae* ECS-1328 and ECS-1330, *Lentinula edodes* ECS-0401 also have high nematocidal activity (from 82% up to 99% mortality) [65]. Moreover, it was reported the potential use of bioactive compounds from luminescent Basidiomycete *Neonothopanus nambi* for plant parasitic root-knot nematode *Meloidogyne incognita* control. Fungal concentration of 500 mg/l is highly toxic to *M. incognita* (100% mortality within 30 minutes) [71].

Fatty acids such as S-coriolic acid or linoleic acids isolated from *Pleurotus pulmonarius* showed nematocidal activity against the saprophytic nematode *Caenorhabditis elegans* [72]. The nematocidal monoterpene 1,2-dihydroxymint lactone, isolated from *Cheimonophyllum candidissimum*, showed a nematocidal effect against the free-living soil nematode *Caenorhabditis elegans* and a herbicidal effect against *Setaria italica* and *Lepidium sativum* [73].

New sesquiterpenes cheimonophyllons and cheimonophilals (cheimonophyllons and cheimonophyllal) were isolated from the wood-destroying basidiomycete *Cheimonophyllum candidissimum* and exhibited nematocidal activity against the soil nematode *C. elegans* [74]. The

furaldehydes 5-pentyl-2-furaldehyde and 5(4-pentenyl)-2-furaldehyde, isolated from *Irpex lacteus*, which causes white wood rot, exhibited nematocidal activity against the rice leaf nematode *Aphelenchoides besseyi* [75]. The nematocidal cyclic peptide omfalotin isolated from the *Omphalotus olearius* fungal biomass and 1-hydroxypyrene obtained from *Crinipellis stipitaria* showed strong nematocidal activity against *C. elegans* [76]. The culture liquid filtrates of the basidiomycetes *Amauroderma macer*, *Laccaria tortilis*, and *Tylopilus striatulus* exhibited high nematocidal activity against the pine nematode *Bursaphelenchus xylophilus* [77].

Thus, due to the presence of compounds with different biological activity Basidiomycetes are considered as an attractive source for the biotechnological application in plant protection. The searching for new producers which synthesize a complex of bioactive substances with antimicrobial, antioxidant, phytotoxic and phytostimulating properties to control plant diseases and weeds is an extremely urgent problem of great scientific, practical and social importance. In this regard, pure cultures of macromycetes as producers of various compounds with a different spectrum of action can become a promising source of new biological products for plant protection.

Funding

The research was carried out with the financial support of the Scientific Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (grant №AP AP19674676).

References:

- 1 Sivanandhan S., Khusro A., Paulraj M.G., Ignacimuthu S., AL-Dhabi N.A. *Biocontrol Properties of Basidiomycetes: An Overview*. J Fungi (Basel), 2017, 3(1): 2. (doi: 10.3390/jof3010002)
- 2 Bhattacharjee R., Dey U. *An overview of fungal and bacterial biopesticides to control plant pathogens/diseases*. Afr. J. Microbiol. Res, 2014, 8: 1749–1762. (DOI: 10.5897/AJMR2013.6356)
- 3 Gillespie A. *Conservation, Biodiversity and International Law*. Edward Elgar Publishing. Cheltenham, New Zealand, 2013, 1–579. (<https://doi.org/10.1093/oso/9780198819516.003.0007>)
- 4 Benton T.G., Vickery J.A., Wilson J.D. *Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?* Trends Ecol. Evol., 2003, 18: 182–188. (doi: 10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- 5 McDonald B.A., Stukenbrock E.H. *Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems: global threats to agricultural sustainability and food security*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2016, 371(1709): 20160026. (doi: 10.1098/rstb.2016.0026)
- 6 Read A.F. The evolution of virulence. Trends Microbiol, 2016, 2: 73–76. (doi: 10.1016/0966-842X(94)90537-1)
- 7 Stukenbrock E.H., Bataillon T., Dutheil J.Y., Hansen T.T., Li R., Zala M., McDonald B.A., Wang J., Schierup M.H. *The making of a new pathogen: insights from comparative population genomics of the domesticated wheat pathogen *Mycosphaerella graminicola* and its wild sister species*. Genome Res., 2011, 21: 2157–2166. (doi: 10.1101/gr.118851.110)
- 8 Gilbert G.S., Parker I.M. *Rapid evolution in a plant-pathogen interaction and the consequences for introduced host species*. Evol Appl., 2010, 3(2): 144–56. (doi: 10.1111/j.1752-4571.2009.00107.x)
- 9 Jo W.S., Hossain M.A., Park S.C. *Toxicological profiles of poisonous, edible, and medicinal mushrooms*. Mycobiology, 2014, 42: 215–220. (doi: 10.5941/MYCO.2014.42.3.215)
- 10 Wasser S.P. A Book Review: *The Fungal Pharmacy: Medicinal Mushrooms of Western Canada*. Int. J. Med. Mushrooms, 2008, 10: 97–100. (doi: 10.1615/IntJMedMushr.v10.i1.130.)
- 11 Wasser S.P. *Current findings, future trends, and unsolved problems in studies of medicinal mushrooms*. Antimicrob. Agents Chemother, 2011, 89: 1323–1332. (doi: 10.1007/s00253-010-3067-4)
- 12 Anke T. *Basidiomycetes: A source for new bioactive secondary metabolites*. In: Bushell ME, Gräfe H (eds) *Bioactive metabolites from microorganisms*. Prog. Ind. Microbiol., 1989, 27: 51–66. (<https://doi.org/10.1002/jobm.3620300709>)
- 13 Gowrie S.U., Chathurdevi G., Rani K. *Evaluation of bioactive potential of basidiocarp extracts of *Ganoderma lucidum**. Int. J. Pharm. Res. Allied Sci., 2014, 3: 36–46 (https://www.researchgate.net/publication/341030087_Evaluation_of_Bioactive_Potential_of_Basidiocarp_Extracts_of_Ganoderma_lucidum)

- 14 Kolundžić M., Grozdanić N.Đ., Dodevska M., Milenković M., Sisto F., Miani A., Farronato G., Kundaković T. *Antibacterial and cytotoxic activities of wild mushroom Fomes fomentarius (L.) Fr., Polyporaceae*. Ind. Crops. Prod., 2016, 79: 110-115. (<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.030>)
- 15 Ren L., Hemar Y., Perera C.O., Lewis G., Krissansen G.W., Buchanan P.K. *Antibacterial and antioxidant activities of aqueous extracts of eight edible mushrooms*. Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre., 2014, 3: 41-51. (doi: 10.1016/j.bcdf.2014.01.003)
- 16 Santos D.N., de Souza L.L., de Oliveira C.A., Silva E.R., de Oliveira A.L. *Arginase inhibition, antibacterial and antioxidant activities of Pitanga seed (Eugenia uniflora L.) extracts from sustainable technologies of high pressure extraction*. Food Biosci., 2015, 12: 93-99. (doi: 10.1016/j.fbio.2015.09.001)
- 17 Wang H., Ng T. *Ganodermin, an antifungal protein from fruiting bodies of the medicinal mushroom Ganoderma lucidum*. Peptides, 2006, 27: 27-30. (doi: 10.1016/j.peptides.2005.06.009)
- 18 Chu K., Xia L., Ng T. *Pleurostrin, an antifungal peptide from the oyster mushroom*. Peptides, 2005; 26: 2098-2103. (doi: 10.1016/j.peptides.2005.04.010)
- 19 Sajeena A., Marimuthu T. *Efficacy, stability and persistence of Ganosol, a Ganoderma based fungicide against plant pathogens*. J. Plant Prot. Sci., 2013, 5: 17-25. (https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=1dJ2VRUAAAAJ&citation_or_view=1dJ2VRUAAAAJ:YsMSGLbcyi4C)
- 20 Lam S., Ng T. *First simultaneous isolation of a ribosome inactivating protein and an antifungal protein from a mushroom (Lyophyllum shimeji) together with evidence for synergism of their antifungal effects*. Arch. Biochem. Biophys., 2001, 393: 271-280. (doi: 10.1006/abbi.2001.2506)
- 21 Wang H., Ng T. *Eryngin, a novel antifungal peptide from fruiting bodies of the edible mushroom Pleurotus eryngii*. Peptides, 2004, 25: 1-5. (doi: 10.1016/j.peptides.2003.11.014.)
- 22 Wasser S.P., Weis A.L. *Therapeutic effects of substances occurring in higher Basidiomycetes mushrooms: A modern perspective*. Crit. Rev. Immunol., 1999, 19: 65-96. (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9987601/>)
- 23 Faccin L.C., Benati F., Rincão V.P., Mantovani M.S., Soares S.A., Gonzaga M.L., Nozawa C., Carvalho L.R. *Antiviral activity of aqueous and ethanol extracts and of an isolated polysaccharide from Agaricus brasiliensis against poliovirus type 1*. Lett. Appl. Microbiol., 2007, 45: 24-28. (doi: 10.1111/j.1472-765X.2007.02153.x)
- 24 Sun H., Zhao C.G., Tong X., Qi Y.P. *A lectin with mycelia differentiation and antiphytovirus activities from the edible mushroom Agrocybe aegerita*. J. Biochem. Mol. Biol., 2003, 36: 214-222. (doi: 10.5483/BMBRep.2003.36.2.214)
- 25 Wang M., Trigueros V., Paquereau L., Chavant L., Fournier D. *Proteins as active compounds involved in insecticidal activity of mushroom fruitbodies*. J. Econ. Entomol., 2002, 95: 603-607. (doi: 10.1603/0022-0493-95.3.603)
- 26 Richard N.S. *Introduction to Plant Pathology*. John Wiley & Sons, 2006. 1-50.
- 27 Knogge W. *Fungal infection of plants*. Plant Cell., 1996, 8: 1711-1722. (doi: 10.1105/tpc.8.10.1711)
- 28 Bronson C.R. *The genetics of phytotoxin production by plant pathogenic fungi*. Experientia, 1991; 47: 771-776. (doi: 10.1007/BF01922456)
- 29 Shi Xin-Chi, Wang Su-Yan, Duan Xu-Chu, Wang Yao-Zhou, Liu Feng-Quan, Laborda P. *Biocontrol strategies for the management of Colletotrichum species in postharvest fruits*. Crop Prot., 2021, 141: 105454. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105454>
- 30 Martínez-Culebras P.V., Barrio E., García M.D., Querol A. *Identification of Colletotrichum species responsible for anthracnose of strawberry based on the internal transcribed spacers of the ribosomal region*. FEMS Micr. Lett., 2000, 189: 97-101. [https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(00\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(00)00260-3).
- 31 Hayden H.P.K., Aitken E., Irwin J. *Genetic-relationships as assessed by molecular markers and cross-infection among strains of Colletotrichum gloeosporioides*. Aust. J. Bot., 1994, 42: 9-18. (doi: 10.1071/BT9940009)
- 32 Talbot N.J. *On the trail of a cereal killer: Exploring the biology of Magnaporthe grisea*. Annu. Rev. Microbiol., 2003, 57: 177-202. (doi: 10.1146/annurev.micro.57.030502.090957)
- 33 Thinlay X., Finckh M.R., Bordeos A.C., Zeigler R.S. *Effects and possible causes of an unprecedented rice blast epidemic on the traditional farming system of Bhutan*. Agric. Ecosyst. Environ., 2000, 78: 237-248. (doi: 10.1016/S0167-8809(99)00129-2)

- 34 Prabhu A.S., Filippi M.C., Castro N. *Pathogenic variation among isolates of Pyricularia oryzae affecting rice, wheat, and grasses in Brazil*. Int. J. Pest Manag., 1992, 38: 367-371. (<https://doi.org/10.1080/09670879209371729>)
- 35 Hubert J., Mabagala R.B., Mamiro D.P. *Efficacy of selected plant extracts against Pyricularia grisea, causal agent of rice blast disease*. Am. J. Plant Sci., 2015, 6: 602-611. (doi: 10.4236/ajps.2015.65065)
- 36 Gelderblom W.C., Jaskiewicz K., Marasas W.F., Thiel P.G., Horak R.M., Vleggaar R., Kriek N.P. *Fumonisin – Novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by Fusarium moniliforme*. Appl. Environ. Microbiol., 1988, 54: 1806-1811. (<https://doi.org/10.1128/aem.54.7.1806-1811.1988>)
- 37 Madden L., Nutter J.F. *Modeling crop losses at the field scale*. Can. J. Plant Pathol. 1995, 17: 124-137. (doi: 10.1080/07060669509500703)
- 38 Luo D.Q., Shao H.J., Zhu H.J., Liu J.K. *Activity in vitro and in vivo against plant pathogenic fungi of grifolin isolated from the basidiomycete Albatrellus dispansus*. Z. Naturforsch. C J. Biosci., 2005, 60: 50-56. (doi: 10.1515/znc-2005-1-210)
- 39 Hwang E.I., Yun B.S., Kim Y.K., Kwon B.M., Kim H.G., Lee H.B., Jeong W.J., Kim S.U. *Phellinsin A, a novel chitin synthases inhibitor produced by Phellinus sp. PL3*. J. Antibiot., 2000, 53: 903-911. (doi: 10.7164/antibiotics.53.903)
- 40 Robles-Hernández L., Gonzalez-Franco A.C., Soto-Parra J.M., Montes-Domínguez F. *Review of agricultural and medicinal applications of basidiomycete mushrooms*. Tecnociencia Chihuahua., 2008, 2: 95-107. (DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v2i2.1387>)
- 41 Anke T., Oberwinkler F., Steglich W., Schramm G. *The strobilurins-new antifungal antibiotics from the basidiomycete Strobilurus tenacellus*. J. Antibiot., 1977, 30: 806-810. (doi: 10.7164/antibiotics.30.806)
- 42 Anke T., Besl H., Mocek U., Steglich W. *Antibiotics from basidiomycetes. XVIII. Strobilurin C and Oudemansin B, two new antifungal metabolites from Xerula species (Agaricales)*. J. Antibiot., 1983, 36: 661-666. (doi: 10.7164/antibiotics.36.661)
- 43 Weber W., Anke T., Steffan B., Steglich W. *Antibiotics from basidiomycetes. XXXII. Strobilurin E: A new cytostatic and antifungal (E)-BETA-methoxyacrylate antibiotic from Crepidotus fulvotomentosus*. Peck. J. Antibiot., 1990, 43: 207-212. (doi: 10.7164/antibiotics.43.207)
- 44 Intiaj A., Jayasinghe C., Lee G.W., Lee T.S. *Antibacterial and antifungal activities of Stereum ostrea, an inedible wild mushroom*. Mycobiology, 2007, 35: 210-214. (doi: 10.4489/MYCO.2007.35.4.210)
- 45 Chu K.T., Xia L., Ng T.B. *Pleurostrin, an antifungal peptide from the oyster mushroom*. Peptides, 2005, 26(11): 2098-2103. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2005.04.010>.
- 46 Wang Y., Bao L., Yang X., Li L., Li S., Gao H., Yao X.S., Wen H., Liu H.W. *Bioactive sesquiterpenoids from the solid culture of the edible mushroom Flammulina velutipes growing on cooked rice*. Food Chem., 2012, 132: 1346-1353. (doi: 10.1016/j.foodchem.2011.11.117)
- 47 Fu L.Q., Guo X.S., Liu X., He H.L., Wang Y.L., Yang Y.S. *Synthesis and antibacterial activity of C-2 (S)-substituted pleuromutilin derivatives*. Chin. Chem. Lett., 2010, 21: 507-510. (doi: 10.1016/j.cclet.2010.01.001)
- 48 Saddiqe Z., Naeem I., Maimoona A. *A review of the antibacterial activity of Hypericum perforatum L*. J. Ethnopharmacol, 2010, 131: 511-521. (doi: 10.1016/j.jep.2010.07.034)
- 49 Barros L., Baptista P., Estevinho L.M., Ferreira I.C. *Effect of fruiting body maturity stage on chemical composition and antimicrobial activity of Lactarius sp. mushrooms*. J. Agric. Food. Chem., 2007, 55: 8766-8771. (doi: 10.1021/jf071435+)
- 50 Alves M.J., Ferreira I.C., Dias J., Teixeira V., Martins A., Pintado M. *A review on antimicrobial activity of mushroom (Basidiomycetes) extracts and isolated compounds*. Planta Med. 2012, 78: 1707-1718. (doi: 10.1055/s-0032-1315370.)
- 51 Erjavec J., Ravnikar M., Brzin J., Grebenc T., Blejec A., Gosak M.Ž., Sabotič J., Kos J., Dreo T. *Antibacterial activity of wild mushroom extracts on bacterial wilt pathogen Ralstonia solanacearum*. Plant Dis., 2016, 100: 453-464. (doi: 10.1094/PDIS-08-14-0812-RE)
- 52 Dreo T., Zelko M., Skubic J., Brzin J., Ravnikar M. *Antibacterial activity of proteinaceous extracts of higher basidiomycetes mushrooms against plant pathogenic bacteria*. Int. J. Med. Mushrooms., 2007, 9: 226-237. (<https://doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v9.i34.60>)

- 53 Herms S., Seehaus K., Koehle H., Conrath U. *A strobilurin fungicide enhances the resistance of tobacco against tobacco mosaic virus and Pseudomonas syringae pv tabaci*. Plant Physiol., 2002, 130: 120-127. (doi: 10.1104/pp.004432)
- 54 Johansson M., Sterner O., Labischinski H., Anke T. *Coprinol, a new antibiotic cuparane from a Coprinus species*. Z. Naturforsch. C J. Biosci., 2001, 56: 31-34. (doi: 10.1515/znc-2001-1-205)
- 55 Brandt C.R., Piraino F. *Mushroom antivirals*. Recent Res. Dev. Antimicrob. Agents Chemother., 2000, 4: 11-26. (<https://doi.org/10.1515/znc-2001-1-205>)
- 56 Gao Y., Zhou S., Huang M., Xu A. *Antibacterial and antiviral value of the genus Ganoderma P. Karst. species (Aphyllophoromycetideae): A review*. Int. J. Med. Mushrooms, 2003, 5. (doi: 10.1615/InterJMedicMush.v5.i3.20)
- 57 Kovalenko O., Polishchuk O., Krupodorova T. *Screening of metabolites produced by strains of Ganoderma lucidum [Curt.: Fr] P. Karst and Ganoderma applanatum [Pirs.: Waller] Pat. for their activity against tobacco mosaic virus*. Bull. T. Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Ser. Biol., 2008, 51: 32-34. (https://www.researchgate.net/publication/258386611_Screening_of_metabolites_produced_by_strains_of_Ganoderma_lucidum_CurtFrP_Karst_and_Ganoderma_applanatum_PirsWallerPat_for_their_activity_against_tobacco_mosaic_virus)
- 58 Zjawiony J.K. *Biologically Active Compounds from Aphyllophorales (Polypore) Fungi*. J. Nat. Prod., 2004 67: 300-310. (doi: 10.1021/np030372w)
- 59 Di Piero R.M., Novaes Q.S., Pascholati S.F. *Effect of Agaricus brasiliensis and Lentinula edodes mushrooms on the infection of passionflower with Cowpea aphid-borne mosaic virus*. Braz. Arch. Biol. Technol., 2010 53: 269-278. (doi: 10.1590/S1516-89132010000200004)
- 60 Singh S., Singh B., Singh A.P. *Nematodes: a threat to sustainability of agriculture*. Procedia Environ. Sci., 2015, 29: 215-216. (doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.270)
- 61 Jones J.T., Haegeman A., Danchin E.G., Gaur H. S., Helder J., Jones M.G. *Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology*. Mol. Plant Pathol., 2013, 14: 946-961. (doi: 10.1111/mpp.12057)
- 62 Siddique S., Grundler F.M. *Parasitic nematodes manipulate plant development to establish feeding sites*. Curr. Opin. Microbiol., 2018, 46: 102-108. (doi: 10.1016/j.mib.2018.09.004)
- 63 Haydock P.P., Woods S.R., Grove I.G., Hare M.C., Perry R.N., Moens M. *Plant Nematology*. Chemical control of nematodes, 2006, 392-410. (DOI: 10.1079/9781780641515.0459)
- 64 Akker S. *Plant–nematode interactions*. Curr. Opinion in Plant Biol., 2021, 62: 102035. (<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102035>)
- 65 Soltani T., Nejad R.F., Ahmadi A.R., Fayazi F. *Chemical control of root-knot nematode (Meloidogyne javanica) on olive in the greenhouse conditions*. J. Plant Pathol. Microbiol., 2013. (doi: 10.4172/2157-7471.1000183)
- 66 Comans-Pérez R.J., Sánchez J.E, Tawfeeq Al-Ani L. K., González-Cortázar M., Castañeda-Ramírez G.S., Mendoza-de Gives P., Sánchez-García A.D., Millán-Orozco J., Aguilar-Marcelino L. *Biological control of sheep nematode Haemonchus contortus using edible mushrooms*. Biol. Contr., 2021, 152: 104420. (<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2020.104420>)
- 67 Luo H., Li X., Li G., Pan Y., Zhang K. *Acanthocytes of Stropharia rugosoannulata function as a nematode-attacking device*. Appl. Environ. Microbiol., 2006, 72: 2982-2987. (doi: 10.1128/AEM.72.4.2982-2987.2006)
- 68 Kwok O., Plattner R., Weisleder D., Wicklow D. *A nematicidal toxin from Pleurotus ostreatus NRRL 3526*. J. Chem. Ecol., 1992, 18: 127-136. (doi: 10.1007/BF00993748)
- 69 Palizi P., Goltapeh E., Pourjam E., Safaie N. *Potential of oyster mushrooms for the biocontrol of sugar beet nematode (Heterodera schachtii)*. J. Plant Prot. Res., 2009, 49: 27-34. (doi: 10.2478/v10045-009-0004-6)
- 70 Mamiy Y. *Attraction of the pinewood nematode to mycelium of some wood-decay fungi*. Jpn. J. Nematol., 2006, 36: 1-9. (doi: 10.3725/jjn.36.1)
- 71 Bua-art S., Saksirirat W., Hiransalee A., Kanokmedhaku S., Lekphrom R. *Effect of bioactive compound from luminescent mushroom (Neonothopanus nambi Speg.) on root-knot nematode (Meloidogyne incognita Chitwood) and non-target organisms*. Khon Kaen Univ. Res. J., 2011, 16: 331-341. (<http://resjournal.kku.ac.th>)
- 72 Stadler M., Mayer A., Anke H., Sterner O. *Fatty acids and other compounds with nematicidal activity from cultures of Basidiomycetes*. Planta Med., 1994, 60: 128-132. (doi: 10.1055/s-2006-959433)

- 73 Lorenzen K., Anke T. *Basidiomycetes as source for new bioactive natural products*. Curr. Org. Chem., 1998, 2: 329-364.
(https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=aI_3BDcYKXgC&oi=fnd&pg=PA329&ots=hvaBwuGLKh&sig=qjzMaEbrVLcHxRXplsLOcQDiTm0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- 74 Hayashi M., Wada K., Munakata K. *New nematocidal metabolites from a fungus, Irpex lacteus*. Agric. Biol. Chem., 1981, 45: 1527-1529.
(<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00021369.1981.10864743>)
- 75 Lambert M., Kremer S., Anke H. *Antimicrobial, phytotoxic, nematocidal, cytotoxic, and mutagenic activities of 1-hydroxypyrene, the initial metabolite in pyrene metabolism by the basidiomycete Crinipellis stipitaria*. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 1995, 55: 25-257. (doi: 10.1007/BF00203017)
- 76 Mayer A., Anke H., Sterner O. *Omphalotin, a new cyclic peptide with potent nematocidal activity from Omphalotus olearius I. Fermentation and biological activity*. Nat. Prod. Lett., 1997, 10: 25-32. (doi: 10.1080/10575639708043691)
- 77 Dong J.Y., Li X.P., Li L., Li G.H., Liu Y.J., Zhang K.Q. *Preliminary results on nematocidal activity from culture filtrates of Basidiomycetes against the pine wood nematode, Bursaphelenchus xylophilus (Aphelenchoididae)*. Ann. Microbiol., 2006, 56: 163-166. (doi: 10.1007/BF03174999)

К.Г.МУСТАФИН¹, Н.А. БИСЬКО², Ж.Б. СУЛЕЙМЕНОВА^{3,1*}, А.С. ЖАКИПБЕКОВА¹,
Ж.Б. НАРМУРАТОВА⁴, Г.К. ЖУМАГАЛИЕВА¹, А.К. КАЛИЕВА⁵, Г.Б. АДМАНОВА⁵

¹ «Антиген» ғылыми-өндірістік кәсіпорны, Алматы, Қазақстан

² Н.Г. Холодный атындағы ботаника институты, Киев, Украина

³ Микробиология және вирусология ғылыми-өндірістік орталығы, Алматы, Қазақстан

⁴ Қ. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

⁵ Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

*e-mail: msyban@mail.ru

БАЗИДИОМИЦЕТТЕР – БИОБАҚЫЛАУДЫҢ ПОТЕНЦИАЛДЫ АГЕНТТЕРІ

Түйін

Ауыл шаруашылығында өсімдік ауруларымен күресу үшін экологиялық таза биологиялық препараттарға шұғыл қажеттілік бар. Осыған байланысты макромицеттер үлкен қызығушылық тудырады, өйткені олар табиғи экожүйелерде олардың тағамдық әмбебаптығы мен өсімдіктермен әртүрлі өзара әрекеттесуінің арқасында маңызды рөл атқарады. Базидиомицеттер әртүрлі биологиялық белсенді заттардың бай көзі болып табылады. Олар түзетін екіншілік метаболиттер микробқа қарсы, ісікке қарсы және антиоксиданттық қасиеттерге ие. Бұл шолу базидиомицеттердің этиологиясы әртүрлі өсімдік ауруларымен және арамшөптермен күресуде тиімді жаңа перспективті экологиялық таза фитотоксикалық және фитостимуляторлық препараттарды жасаудың негізі ретіндегі әлеуетті рөлін қарастырады.

Кілтті сөздер: жоғары саңырауқұлақтар, биопестицидтер, фитоуыттылық, фитостимуляция.

МРНТИ: 62.09.39

К.Г.МУСТАФИН¹, Н.А. БИСЬКО², Ж.Б. СУЛЕЙМЕНОВА^{3,1*}, А.С. ЖАКИПБЕКОВА¹,
Ж.Б. НАРМУРАТОВА⁴, Г.К. ЖУМАГАЛИЕВА¹, А.К. КАЛИЕВА⁵, Г.Б. АДМАНОВА⁵

¹Научно-производственное предприятие «Антиген», Алматы, Казахстан

²Институт ботаники имени Н.Г. Холодного, Киев, Украина

³Научно-производственный центр микробиологии и вирусологии, Алматы, Казахстан

⁴Казахский национальный исследовательский технический университет им.

К. Сатпаева, Алматы, Казахстан

⁵Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова, Актобе, Казахстан

*e-mail: msyban@mail.ru

БАЗИДИОМИЦЕТЫ – ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ АГЕНТЫ БИОКОНТРОЛЯ

doi:10.53729/MV-AS.2024.01.05

Аннотация

В сельском хозяйстве существует острая потребность в экологически чистых биопрепаратах для борьбы с болезнями растений. В этом отношении макромицеты представляют большой интерес поскольку они играют важную роль в природных экосистемах благодаря их универсальности в питании и разнообразному взаимодействию с растениями. Базидиомицеты являются богатым источником различных биологически активных веществ. Образованные ими вторичные метаболиты обладают противомикробными, противоопухолевыми и антиоксидантными свойствами. Настоящий обзор посвящен потенциальной роли базидиомицетов в создании новых перспективных экологически чистых фитотоксичных и фитостимулирующих препаратов различного спектра действия, эффективных в борьбе с болезнями растений различной этиологии и сорняками.

Ключевые слова: высшие грибы, биопестициды, фитотоксичность, фитостимуляция.

В настоящее время химические средства защиты растений широко используются для борьбы с болезнями и вредителями сельскохозяйственных культур [1]. Повсеместное применение химических средств защиты растений оказывают негативное влияние на человека и животных, в связи с чем они считаются экологически небезопасными [2]. В связи с этим необходимо использование биологических средств защиты растений, главной особенностью которых является безопасность для человека, окружающей среды, животных и других представителей биоценоза. В большинстве случаев в состав биопрепаратов входят живые микроорганизмы: бактерии, грибы, вирусы, которые могут продуцировать природные токсины, антибиотики и стимуляторы роста [3].

На протяжении тысячелетий фермеры изобретали технологии, чтобы сделать свои засеянные поля более однородными с экологической точки зрения с целью повышения урожайности, включая обработку почвы, контролируемое орошение и применение удобрений и пестицидов. За последние 100 лет широкомасштабная механизация посевных и уборочных работ еще больше увеличила однородность окружающей среды, присутствующую в агроэкосистемах [4, 5]. Однородная генетическая и физическая среда агроэкосистем создала условия, способствующие появлению новых патогенов сельскохозяйственных культур, которые эволюционируют быстрее и являются более опасными по сравнению со своими «дикими» предками. Повышенная густота посадки растений и генетическая однородность популяций хозяев в таких агроэкосистемах облегчают передачу возбудителя по сравнению с природными экосистемами, что способствует повышению вирулентности возбудителя [6]. Более того, эти факторы также увеличивают размер популяции патогенов, обеспечивая их большое генетическое разнообразие за счет увеличения общего количества мутаций [7].

Все это привело к неуклонному росту разнообразия вредителей и патогенов, и

появлению новых штаммов – возбудителей болезней с/х культур [8]. В связи с этим, ученые всего мира постоянно ищут альтернативные безопасные и эффективные пути для борьбы с патогенами и вредителями растений. В этом отношении большой интерес представляют базидиальные грибы в связи с их широким спектром лекарственных свойств, легкой доступностью и нетоксичностью для нецелевых организмов [9].

В настоящее время известно около 140 000 видов базидиомицетов, среди которых около 660 видов обладают лечебными свойствами [10]. Они синтезируют вещества разного химического строения, в том числе алкалоиды, терпеноиды, фенольные соединения, флаваноиды и многие другие, имеющие множество ценных свойств [11]. По своей классификации базидиальные грибы представляют собой класс высших грибов с хорошо развитым многоклеточным мицелием, достигающим большого разнообразия и сложности строения. Из дикорастущих базидиомицетов были выделены соединения, которые ингибировали рост бактерий, вирусов и грибов (таблица 1), а также обнаружили нематоцидные и инсектицидные свойства [12-25].

Таблица 1 – Активные соединения, выделенные из разных видов базидиальных грибов

Гриб	Активные соединения	Возбудитель
<i>Ganoderma lucidum</i>	ганодермин	<i>Physalospora piricola</i> ; <i>Botrytis cinerea</i>
<i>Pleurotus ostreatus</i>	плеуростин	<i>Botryosphaeria berengeriana</i>
<i>Pleurotus eryngii</i>	эрингин	<i>Mycosphaerella arachidicola</i>
<i>Lyophyllum shimeji</i>	Противогрибковый белок mLAP	<i>Physalospora piricola</i>
<i>Lyophyllum shimeji</i>	лиофиллин	<i>Physalospora piricola</i>
<i>Albatrellus dispansus</i>	грифолин	<i>Alternaria alternata</i> ; <i>Pyricularia oryzae</i> ; <i>Rhizoctonia solani</i> ; <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> ; <i>Fusarium graminearum</i> ; <i>Botrytis cinerea</i> ; <i>Gaeumannomyces graminis</i> ; <i>Gloesporium fructigenum</i>
<i>Hypsizygus marmoreus</i>	гипсин	<i>Botryosphaeria berengeriana</i> ; <i>Botrytis cinerea</i> ; <i>Mycosphaerella arachidicola</i>

Грибные болезни растений

Грибы могут вызывать серьезное поражение растений поскольку они образуют споры, которые являются источником заражения других растений. Время между заражением и образованием спор может составлять всего несколько дней [26]. Споры, если они смачиваемые, могут распространяться в виде инокулята высокой плотности вместе с водой [27]. Более того, споры могут продуцировать фитотоксичные соединения [28].

Патогены растений могут выводить питательные вещества из растения путем выработки или индукции регуляторов роста. Так, фитопатогены рода *Colletotrichum* вызывают антракнозы и корневые гнили различных культур, таких как земляника, крыжовник и т.д. [29, 30]. Значительные различия возникают в культуре и диапазоне растений-хозяев, при этом некоторые штаммы способны поражать многие виды растений, тогда как другие, ограничены лишь одним видом [31, 32]. Рис, являющийся основной культурой в экономике многих стран, поражается аскомицетом *Pyricularia oryzae*, *Magnaporthe grisea*, вызывая пирикулярриоз, что приводит к ежегодной потере урожая на 10-30% [33]. Другие виды злаков также поражаются *P. oryzae*, *Eleusine coracana* или подобными видами [34, 35].

Некоторые грибы вырабатывают сильные микотоксины. Так, токсины фумонизина впервые были обнаружены в Южной Африке. Они были выделены из возбудителей фузариоза *Gibberella fujikuroi* и *Fusarium moniliforme*, выращенных на кукурузе, а наиболее активное соединение было обозначено как фумонизин B1 (FB1) [36]. FB1

является аналогом сфинганина, который как в растительных, так и в животных клетках ингибирует синтез сфинголипидов, вызывая накопление сфингоидных оснований [37].

Базидиальные грибы как потенциальные агенты биоконтроля

Активность высших грибов против фитопатогенных грибов

Противогрибковый препарат грифолин, выделенный из базидиального гриба *Albatrellus dispansus*, в исследованиях *in vitro* оказался эффективным против ряда фитопатогенных грибов [38]. Феллинсин А, выделенный из *Phellinus sp.* подавлял рост *Gloeosporium orbiculare*, *Pyricularia grisea*, *Thanatephorus cucumeris*, *Aspergillus fumigatus* и *Trichophyton mentagrophytes* [39].

Основной фунгицид, повсеместно используемый в агрохимии, был получен из гриба сосновой шишки *Strobilurus tenacellus* [40]. Стробилурины представляют собой класс фунгицидных соединений, которые экстрагируются из мицелия *S. tenacellus* (рисунок 1).

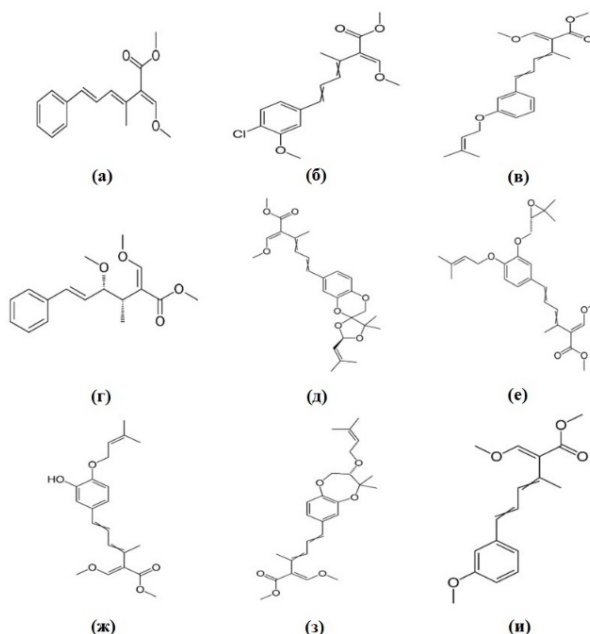


Рисунок 1 – Стробилурины высших грибов ((а) - стробуриин А; (б) – стробуриин В; (в) - стробуриин С; (г) - удемансин В; (д) - стробуриин Е; (е) - стробуриин D; (ж, з) - стробуриин F; (и) - стробуриин Н)

Стробилурины А (рисунок 1, а) и В (рисунок 1, б), обладающие высокой фунгицидной активностью, подавляют дыхание дрожжей и других мицелиальных грибов [41]. Из-за широкого спектра действия и практической безопасности для окружающей среды стробилурины считаются наиболее существенной группой фунгицидов, которые можно отнести к биофунгицидам, так как они имеют природное происхождение.

Стробилурины являются сайт-специфическими (ингибирование митохондриального дыхания) и трансламинарными (системными) соединениями, которые обеспечивают биологический контроль грибов *Oomycota*, *Ascomycota*, *Basidiomycota* и *Deuteromycota*. (Е)-β-метоксиакрилаты стробилурина С (рисунок 1, в) и удемансина В (рисунок 1, г), выделенные из *Xerula pudens* ингибируют многие виды фитопатогенных грибов. Как и стробилурины А и В, они также ингибируют дыхание грибов [42]. Стробилуриин Е (рисунок 1, д) - еще одно противогрибковое соединение класса (Е)-β-метоксиакрилатов, экстрагированное из гриба *Crepidotus fulvotomentosus*. Было установлено, что помимо ингибирования дыхания грибов он вызывает деформацию клеток [43]. Стробилуриин D (рисунок 1, е) экстрагирован из базидиомицета *Merismodes anomala*; он содержит цитостатические и противогрибковые антибиотики класса (Е)-β-метоксиакрилатов. Этот стробилуриин ингибирует многие грибы и, как и стробилурины А и В, также является

мощным ингибитором митохондриального дыхания [43, 44]. Другие стробилурины F (рисунок 1, ж), G (рисунок 1, з) и H (рисунок 1, и), полученные из культуральной жидкости гриба *Bolinea lutea*, ингибируют *Aspergillus fumigatus*, *Botrytis cinerea*, *Microsporium canis* и *Sporothrix schenckii*. Эти соединения также ингибируют дыхание грибов.

Ганодермин, выделенный из гриба *G. lucidum*, подавлял рост фитопатогенных грибов *Botrytis cinerea*, *F. oxysporum* и *Peyronellaea arachidicola* [1]. Плеврострин, противогрибковый пептид, размером примерно в два раза меньше ганодермина, выделенный из вешенки *P. ostreatus*, обладал ингибирующим действием в отношении грибов *Fusarium oxysporum*, *Mycosphaerella arachidicola* и *Physalospora piricola* [45].

Активность высших грибов против фитопатогенных бактерий

Известно, что вторичные метаболиты, выделенные из различных базидиомицетов, проявляют выраженные антибактериальные свойства [46-49]. Представители порядков *Ganodermatales*, *Poriales*, *Agaricales* и *Stereales* демонстрируют антибактериальную активность против разных видов фитопатогенных бактерий и могут стать основой для разработки новых антибиотиков [50]. Было установлено, что 15 экстрактов базидиомицетов имеют антибактериальную активность от умеренной до высокой. Из них 11 полностью ингибировали рост бактерий, а 4 демонстрировали частичное ингибирование бактериального увядания картофеля, вызванного *Ralstonia solanacearum* [51].

Экстракты из гриба *Clytocybe geotropa* (говорушка подогнутая) обнаружили широкий диапазон ингибирования в отношении *R. solanacearum*, *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*, *P. syringae* pv. *syringae*, *X. campestris* pv. *vesicatoria* и *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* (возбудитель кольцевой гнили картофеля). Установлено, что очищенный белок клитоципин из *C. geotropa* ингибирует заболевание, вызванное *Clavibacter michiganensis* [52]. Фунгицид стробилурин Ф 500 повышает устойчивость табака к возбудителю бактериальной рябухи *Pseudomonas syringae* pv. *tabaci* [53]. Копринол, выделенный из *Coprinus* sp., показал ингибирующую активность в отношении большинства фитопатогенов [54].

Активность высших грибов против фитопатогенных вирусов

Соединения, полученные из высших грибов и обладающие активностью против фитопатогенных вирусов можно разделить на два основных класса: модификаторы биологического ответа и ингибиторы вирусов [55]. Влияние полисахаридов базидиомицетов было исследовано на моделях вирусов человека и животных [56]. Установлено, что штаммы *Ganoderma lucidum* и *G. applanatum* способны ингибировать вирус табачной мозаики в концентрации 1000 мкг/мл [57]. Фильтрат из культуральной жидкости трутовика *Fomes fomentarius* эффективен в отношении вируса табачной мозаики [58]. Водные экстракты плодовых тел *Agaricus brasiliensis* и *Lentinula edodes* также обнаружили противовирусную активность в отношении вируса табачной мозаики [59].

Активность высших грибов против нематод

На сегодняшний день описано более 4100 видов нематод, которые оказывают отрицательное влияние на экономически важные сельскохозяйственные культуры. Ущерб, причиняемый растительными нематодами, оценивается в 12,3% (157 миллиардов долларов США) во всем мире [60]. Полную степень поражения нематодами невозможно оценить в полной мере, поскольку сельхозпроизводители зачастую не знают об их присутствии, так как симптомы поражения нематодой у растений неспецифичны, что затрудняет диагностику [61, 62]. Исследователи во всем мире проявляют все больший интерес к уменьшению использования химических средств против нематод [63-65]. Недавнее исследование показало, что некоторые виды съедобных базидиомицетов, такие как виды *Pleurotus*, обладают нематоцидной активностью благодаря выработке токсина, который способен подавлять движение нематод [66]. Такая биологическая активность может быть результатом механизма самозащиты грибов, который действует против нематод-мицелиофагов [67]. Другие исследования показали, что *P. ostreatus* продуцирует

токсин, подобный пероксидам, который подавляет движение нематод и впоследствии разрушает их, достигая 95% смертности свободноживущих нематод *Panagrellus redivivus* (взрослые особи) и фитопатогенных нематод *Bursaphelenchus xylophilus* [68]. Другое исследование показало, что *P. eryngii* вызывает 50% смертность фитопатогенной нематоды *Heterodera schantii*, вызывающей увядание сахарного тростника и других с/х культур. В целом, нематоцидная активность, проявляемая различными штаммами *P. eryngii* колеблется в пределах 4,8–99,6%.

На нематоцидный эффект базидиомицетов оказывают влияние такие факторы как температура, внутренние генетические характеристики каждого штамма и внутривидовые различия между нематодами [69]. У некоторых мертвых личинок нематод был обнаружен грибной мицелий внутри тела, в связи с чем было сделано предположение, что гибель личинок была следствием инвазии грибного мицелия. Так, штамм *Coprinus comatus* вызвал поражение свободноживущей нематоды *Panagrellus redivivus* и галловой нематоды *Meloidogyne arenaria* [70]. Было установлено механическое повреждение свободноживущей нематоды *P. redivivus* через 8 часов после заражения мицелием *C. comatus*, что привело к иммобилизации 90% нематод и последующей их гибели после инкубации при 24°C. Штаммы съедобных базидиальных грибов *Pleurotus ostreatus* ECS-1123 и ECS-0152, *P. eryngii* ECS-1290 и ECS-1291, *P. cornucopiae* ECS-1328 и ECS-1330, *Lentinula edodes* ECS-0401 также проявляли высокую нематоцидную активность (от 82% до 99% смертности) [71]. Более того, в литературе имеются данные об использовании биоактивных соединений из люминесцентных базидиомицетов *Neonothopanus nambi* для борьбы с галловой нематодой *Meloidogyne incognita*, паразитирующей на корнях растений. Результаты исследований показали, что концентрация 500 мг/л высокотоксична для *M. incognita*, вызывая 100% смертность в течение 30 минут [71].

Жирные кислоты, такие как S-кориоловая или линолевая кислоты, выделенные из *Pleurotus pulmonarius*, проявляли нематоцидное действие против сапрофитной нематоды *Caenorhabditis elegans* [72]. Нематоцидный монотерпен 1,2-дигидроксиминтлактон, выделенный из базидиального гриба *Cheimonophyllum candidissimum* проявлял нематоцидное действие против свободноживущей почвенной нематоды *Caenorhabditis elegans* и гербицидное действие против *Setaria italica* и *Lepidium sativum* [73]. Новые сесквитерпены хеймонофиллоны и хемонофилалы (cheimonophyllons и cheimonophyllal) были выделены из дереворазрушающего базидиомицета *Cheimonophyllum candidissimum* и проявляли нематоцидную активность в отношении почвенной нематоды *C. elegans* [74]. Фуральдегиды 5-пентил-2-фуральдегид и 5(4-пентенил)-2-фуральдегид, выделенные из *Irpex lacteus*, вызывающего белую гниль древесины проявляли нематоцидную активность против листовой рисовой нематоды *Aphelenchoides besseyi* [75]. Нематоцидный циклический пептид омфалотин, выделенный из биомассы гриба омфалота маслинового *Omphalotus olearius*, и 1-гидроксипирен, полученный из кринипиллеса шероховатого *Crinipellis stipitaria* обнаружили сильную нематоцидную активность против *C. elegans* [76]. Фильтраты культуральной жидкости базидиальных грибов *Amauroderma tacer* *Laccaria tortilis* и *Tylophilus striatulus* проявляли высокую нематоцидную активность в отношении сосновой нематоды *Bursaphelenchus xylophilus* [77].

Таким образом, благодаря наличию в мицелии и культуральной жидкости базидиальных грибов соединений, обладающих различной биологической активностью, данные объекты весьма привлекательны для использования их в защите растений. Поиск новых соединений с фитопротекторными и фитотоксическими свойствами для борьбы с болезнями растений и сорняками является чрезвычайно актуальной проблемой, имеющей большое научное, практическое и социальное значение. Чистые культуры макромицетов, как продуценты разнообразных соединений с различным спектром действия, могут стать перспективным источником новых экологически чистых биопрепаратов для сельского хозяйства.

Финансирование

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19674676).

Литература:

- 1 Sivanandhan S., Khusro A., Paulraj M.G., Ignacimuthu S., AL-Dhabi N.A. *Biocontrol Properties of Basidiomycetes: An Overview*. J Fungi (Basel), 2017, 3(1): 2. (doi: 10.3390/jof3010002)
- 2 Bhattacharjee R., Dey U. *An overview of fungal and bacterial biopesticides to control plant pathogens/diseases*. Afr. J. Microbiol. Res, 2014, 8: 1749–1762. (DOI: 10.5897/AJMR2013.6356)
- 3 Gillespie A. *Conservation, Biodiversity and International Law*. Edward Elgar Publishing. Cheltenham, New Zealand, 2013, 1–579. (<https://doi.org/10.1093/oso/9780198819516.003.0007>)
- 4 Benton T.G., Vickery J.A., Wilson J.D. *Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key?* Trends Ecol. Evol., 2003, 18: 182–188. (doi: 10.1016/S0169-5347(03)00011-9)
- 5 McDonald B.A., Stukenbrock E.H. *Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems: global threats to agricultural sustainability and food security*. Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci, 2016, 371(1709): 20160026. (doi: 10.1098/rstb.2016.0026)
- 6 Read A.F. *The evolution of virulence*. Trends Microbiol, 2016, 2: 73–76. (doi: 10.1016/0966-842X(94)90537-1)
- 7 Stukenbrock E.H., Bataillon T., Dutheil J.Y., Hansen T.T., Li R., Zala M., McDonald B.A., Wang J., Schierup M.H. *The making of a new pathogen: insights from comparative population genomics of the domesticated wheat pathogen Mycosphaerella graminicola and its wild sister species*. Genome Res., 2011, 21: 2157–2166. (doi: 10.1101/gr.118851.110)
- 8 Gilbert G.S., Parker I.M. *Rapid evolution in a plant-pathogen interaction and the consequences for introduced host species*. Evol Appl., 2010, 3(2): 144–56. (doi: 10.1111/j.1752-4571.2009.00107.x)
- 9 Jo W.S., Hossain M.A., Park S.C. *Toxicological profiles of poisonous, edible, and medicinal mushrooms*. Mycobiology, 2014, 42: 215–220. (doi: 10.5941/MYCO.2014.42.3.215)
- 10 Wasser S.P. *A Book Review: The Fungal Pharmacy: Medicinal Mushrooms of Western Canada*. Int. J. Med. Mushrooms, 2008, 10: 97–100. (doi: 10.1615/IntJMedMushr.v10.i1.130.)
- 11 Wasser S.P. *Current findings, future trends, and unsolved problems in studies of medicinal mushrooms*. Antimicrob. Agents Chemother, 2011, 89: 1323–1332. (doi: 10.1007/s00253-010-3067-4)
- 12 Anke T. *Basidiomycetes: A source for new bioactive secondary metabolites*. In: Bushell ME, Gräfe H (eds) *Bioactive metabolites from microorganisms*. Prog. Ind. Microbiol., 1989, 27: 51–66. (<https://doi.org/10.1002/jobm.3620300709>)
- 13 Gowrie S.U., Chathurdevi G., Rani K. *Evaluation of bioactive potential of basidiocarp extracts of Ganoderma lucidum*. Int. J. Pharm. Res. Allied Sci., 2014, 3: 36–46 (https://www.researchgate.net/publication/341030087_Evaluation_of_Bioactive_Potential_of_Basidiocarp_Extracts_of_Ganoderma_lucidum)
- 14 Kolundžić M., Grozdanić N.Đ., Dodevska M., Milenković M., Sisto F., Miani A., Farronato G., Kundaković T. *Antibacterial and cytotoxic activities of wild mushroom Fomes fomentarius (L.) Fr., Polyporaceae*. Ind. Crops. Prod., 2016, 79: 110–115. (<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.030>)
- 15 Ren L., Hemar Y., Perera C.O., Lewis G., Krissansen G.W., Buchanan P.K. *Antibacterial and antioxidant activities of aqueous extracts of eight edible mushrooms*. Bioact. Carbohydr. Diet. Fibre., 2014, 3: 41–51. (doi: 10.1016/j.bcdf.2014.01.003)
- 16 Santos D.N., de Souza L.L., de Oliveira C.A., Silva E.R., de Oliveira A.L. *Arginase inhibition, antibacterial and antioxidant activities of Pitanga seed (Eugenia uniflora L.) extracts from sustainable technologies of high pressure extraction*. Food Biosci., 2015, 12: 93–99. (doi: 10.1016/j.fbio.2015.09.001)
- 17 Wang H., Ng T. *Ganodermin, an antifungal protein from fruiting bodies of the medicinal mushroom Ganoderma lucidum*. Peptides, 2006, 27: 27–30. (doi: 10.1016/j.peptides.2005.06.009)
- 18 Chu K., Xia L., Ng T. *Pleurostrin, an antifungal peptide from the oyster mushroom*. Peptides, 2005; 26: 2098–2103. (doi: 10.1016/j.peptides.2005.04.010)
- 19 Sajeena A., Marimuthu T. *Efficacy, stability and persistence of Ganosol, a Ganoderma based fungicide against plant pathogens*. J. Plant Prot. Sci., 2013, 5: 17–25. (https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=1dJ2VRUAAAAJ&citation_for_view=1dJ2VRUAAAAJ:YsMSGLbcyi4C)

- 20 Lam S., Ng T. *First simultaneous isolation of a ribosome inactivating protein and an antifungal protein from a mushroom (Lyophyllum shimeji) together with evidence for synergism of their antifungal effects.* Arch. Biochem. Biophys., 2001, 393: 271-280. (doi: 10.1006/abbi.2001.2506)
- 21 Wang H., Ng T. *Eryngin, a novel antifungal peptide from fruiting bodies of the edible mushroom Pleurotus eryngii.* Peptides, 2004, 25: 1-5. (doi: 10.1016/j.peptides.2003.11.014.)
- 22 Wasser S.P., Weis A.L. *Therapeutic effects of substances occurring in higher Basidiomycetes mushrooms: A modern perspective.* Crit. Rev. Immunol., 1999, 19: 65-96. (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9987601/>)
- 23 Faccin L.C., Benati F., Rincão V.P., Mantovani M.S., Soares S.A., Gonzaga M.L., Nozawa C., Carvalho L.R. *Antiviral activity of aqueous and ethanol extracts and of an isolated polysaccharide from Agaricus brasiliensis against poliovirus type 1.* Lett. Appl. Microbiol., 2007, 45: 24-28. (doi: 10.1111/j.1472-765X.2007.02153.x)
- 24 Sun H., Zhao C.G., Tong X., Qi Y.P. *A lectin with mycelia differentiation and antiphytovirus activities from the edible mushroom Agrocybe aegerita.* J. Biochem. Mol. Biol., 2003, 36: 214-222. (doi: 10.5483/BMBRep.2003.36.2.214)
- 25 Wang M., Trigueros V., Paquereau L., Chavant L., Fournier D. *Proteins as active compounds involved in insecticidal activity of mushroom fruitbodies.* J. Econ. Entomol., 2002, 95: 603-607. (doi: 10.1603/0022-0493-95.3.603)
- 26 Richard N.S. *Introduction to Plant Pathology.* John Wiley & Sons, 2006. 1-50.
- 27 Knogge W. *Fungal infection of plants.* Plant Cell., 1996, 8: 1711-1722. (doi: 10.1105/tpc.8.10.1711)
- 28 Bronson C.R. *The genetics of phytotoxin production by plant pathogenic fungi.* Experientia, 1991; 47: 771-776. (doi: 10.1007/BF01922456)
- 29 Shi Xin-Chi, Wang Su-Yan, Duan Xu-Chu, Wang Yao-Zhou, Liu Feng-Quan, Laborda P. *Biocontrol strategies for the management of Colletotrichum species in postharvest fruits.* Crop Prot., 2021, 141: 105454. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105454>
- 30 Martínez-Culebras P.V., Barrio E., García M.D., Querol A. *Identification of Colletotrichum species responsible for anthracnose of strawberry based on the internal transcribed spacers of the ribosomal region.* FEMS Micr. Lett., 2000, 189: 97-101. [https://doi.org/10.1016/S0378-1097\(00\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1097(00)00260-3).
- 31 Hayden H.P.K., Aitken E., Irwin J. *Genetic-relationships as assessed by molecular markers and cross-infection among strains of Colletotrichum gloeosporioides.* Aust. J. Bot., 1994, 42: 9-18. (doi: 10.1071/BT9940009)
- 32 Talbot N.J. *On the trail of a cereal killer: Exploring the biology of Magnaporthe grisea.* Annu. Rev. Microbiol., 2003, 57: 177-202. (doi: 10.1146/annurev.micro.57.030502.090957)
- 33 Thinlay X., Finckh M.R., Bordeos A.C., Zeigler R.S. *Effects and possible causes of an unprecedented rice blast epidemic on the traditional farming system of Bhutan.* Agric. Ecosyst. Environ., 2000, 78: 237-248. (doi: 10.1016/S0167-8809(99)00129-2)
- 34 Prabhu A.S., Filippi M.C., Castro N. *Pathogenic variation among isolates of Pyricularia oryzae affecting rice, wheat, and grasses in Brazil.* Int. J. Pest Manag., 1992, 38: 367-371. (<https://doi.org/10.1080/09670879209371729>)
- 35 Hubert J., Mabagala R.B., Mamiro D.P. *Efficacy of selected plant extracts against Pyricularia grisea, causal agent of rice blast disease.* Am. J. Plant Sci., 2015, 6: 602-611. (doi: 10.4236/ajps.2015.65065)
- 36 Gelderblom W.C., Jaskiewicz K., Marasas W.F., Thiel P.G., Horak R.M., Vleggaar R., Kriek N.P. *Fumonisin – Novel mycotoxins with cancer-promoting activity produced by Fusarium moniliforme.* Appl. Environ. Microbiol., 1988, 54: 1806-1811. (<https://doi.org/10.1128/aem.54.7.1806-1811.1988>)
- 37 Madden L., Nutter J.F. *Modeling crop losses at the field scale.* Can. J. Plant Pathol. 1995, 17: 124-137. (doi: 10.1080/07060669509500703)
- 38 Luo D.Q., Shao H.J., Zhu H.J., Liu J.K. *Activity in vitro and in vivo against plant pathogenic fungi of grifolin isolated from the basidiomycete Albatrellus dispansus.* Z. Naturforsch. C J. Biosci., 2005, 60: 50-56. (doi: 10.1515/znc-2005-1-210)
- 39 Hwang E.I., Yun B.S., Kim Y.K., Kwon B.M., Kim H.G., Lee H.B., Jeong W.J., Kim S.U. *Phellinsin A, a novel chitin synthases inhibitor produced by Phellinus sp. PL3.* J. Antibiot., 2000, 53: 903-911. (doi: 10.7164/antibiotics.53.903)

- 40 Robles-Hernández L., Gonzalez-Franco A.C., Soto-Parra J.M., Montes-Domínguez F. *Review of agricultural and medicinal applications of basidiomycete mushrooms*. Tecnociencia Chihuah., 2008, 2: 95-107. (DOI: <https://doi.org/10.54167/tch.v2i2.1387>)
- 41 Anke T., Oberwinkler F., Steglich W., Schramm G. *The strobilurins-new antifungal antibiotics from the basidiomycete Strobilurus tenacellus*. J. Antibiot., 1977, 30: 806-810. (doi: 10.7164/antibiotics.30.806)
- 42 Anke T., Besl H., Mocek U., Steglich W. *Antibiotics from basidiomycetes. XVIII. Strobilurin C and Oudemansin B, two new antifungal metabolites from Xerula species (Agaricales)*. J. Antibiot., 1983, 36: 661-666. (doi: 10.7164/antibiotics.36.661)
- 43 Weber W., Anke T., Steffan B., Steglich W. *Antibiotics from basidiomycetes. XXXII. Strobilurin E: A new cytostatic and antifungal (E)-BETA-methoxyacrylate antibiotic from Crepidotus fulvotomentosus*. Peck. J. Antibiot., 1990, 43: 207-212. (doi: 10.7164/antibiotics.43.207)
- 44 Imtiaj A., Jayasinghe C., Lee G.W., Lee T.S. *Antibacterial and antifungal activities of Stereum ostrea, an inedible wild mushroom*. Mycobiology, 2007, 35: 210-214. (doi: 10.4489/MYCO.2007.35.4.210)
- 45 Chu K.T., Xia L., Ng T.B. *Pleurostrin, an antifungal peptide from the oyster mushroom*. Peptides, 2005, 26(11): 2098-2103. <https://doi.org/10.1016/j.peptides.2005.04.010>.
- 46 Wang Y., Bao L., Yang X., Li L., Li S., Gao H., Yao X.S., Wen H., Liu H.W. *Bioactive sesquiterpenoids from the solid culture of the edible mushroom Flammulina velutipes growing on cooked rice*. Food Chem., 2012, 132: 1346-1353. (doi: 10.1016/j.foodchem.2011.11.117)
- 47 Fu L.Q., Guo X.S., Liu X., He H.L., Wang Y.L., Yang Y.S. *Synthesis and antibacterial activity of C-2 (S)-substituted pleuromutilin derivatives*. Chin. Chem. Lett., 2010, 21: 507-510. (doi: 10.1016/j.cclet.2010.01.001)
- 48 Saddiqe Z., Naeem I., Maimoona A. *A review of the antibacterial activity of Hypericum perforatum L.* J. Ethnopharmacol, 2010, 131: 511-521. (doi: 10.1016/j.jep.2010.07.034)
- 49 Barros L., Baptista P., Estevinho L.M., Ferreira I.C. *Effect of fruiting body maturity stage on chemical composition and antimicrobial activity of Lactarius sp. mushrooms*. J. Agric. Food. Chem., 2007, 55: 8766-8771. (doi: 10.1021/jf071435+)
- 50 Alves M.J., Ferreira I.C., Dias J., Teixeira V., Martins A., Pintado M. *A review on antimicrobial activity of mushroom (Basidiomycetes) extracts and isolated compounds*. Planta Med. 2012, 78: 1707-1718. (doi: 10.1055/s-0032-1315370.)
- 51 Erjavec J., Ravnikar M., Brzin J., Grebenc T., Blejec A., Gosak M.Ž., Sabotič J., Kos J., Dreo T. *Antibacterial activity of wild mushroom extracts on bacterial wilt pathogen Ralstonia solanacearum*. Plant Dis., 2016, 100: 453-464. (doi: 10.1094/PDIS-08-14-0812-RE)
- 52 Dreo T., Zelko M., Skubic J., Brzin J., Ravnikar M. *Antibacterial activity of proteinaceous extracts of higher basidiomycetes mushrooms against plant pathogenic bacteria*. Int. J. Med. Mushrooms., 2007, 9: 226-237. (<https://doi.org/10.1615/IntJMedMushr.v9.i34.60>)
- 53 Herms S., Seehaus K., Koehle H., Conrath U. *A strobilurin fungicide enhances the resistance of tobacco against tobacco mosaic virus and Pseudomonas syringae pv tabaci*. Plant Physiol., 2002, 130: 120-127. (doi: 10.1104/pp.004432)
- 54 Johansson M., Sterner O., Labischinski H., Anke T. *Coprinol, a new antibiotic cuparane from a Coprinus species*. Z. Naturforsch. C J. Biosci., 2001, 56: 31-34. (doi: 10.1515/znc-2001-1-205)
- 55 Brandt C.R., Piraino F. *Mushroom antivirals*. Recent Res. Dev. Antimicrob. Agents Chemother., 2000, 4: 11-26. (<https://doi.org/10.1515/znc-2001-1-205>)
- 56 Gao Y., Zhou S., Huang M., Xu A. *Antibacterial and antiviral value of the genus Ganoderma P. Karst. species (Aphyllophoromycetidae): A review*. Int. J. Med. Mushrooms, 2003, 5. (doi: 10.1615/InterJMedicMush.v5.i3.20)
- 57 Kovalenko O., Polishchuk O., Krupodorova T. *Screening of metabolites produced by strains of Ganoderma lucidum [Curt.: Fr] P. Karst and Ganoderma applanatum [Pirs.: Waller] Pat. for their activity against tobacco mosaic virus*. Bull. T. Shevchenko Nat. Univ. Kyiv. Ser. Biol., 2008, 51: 32-34. (https://www.researchgate.net/publication/258386611_Screening_of_metabolites_produced_by_strains_of_Ganoderma_lucidum_CurtFrP_Karst_and_Ganoderma_applanatum_PirsWallerPat_for_their_activity_against_tobacco_mosaic_virus)
- 58 Zjawiony J.K. *Biologically Active Compounds from Aphyllophorales (Polypore) Fungi*. J. Nat. Prod., 2004 67: 300-310. (doi: 10.1021/np030372w)

- 59 Di Piero R.M., Novaes Q.S., Pascholati S.F. *Effect of Agaricus brasiliensis and Lentinula edodes mushrooms on the infection of passionflower with Cowpea aphid-borne mosaic virus*. Braz. Arch. Biol. Technol., 2010 53: 269-278. (doi: 10.1590/S1516-89132010000200004)
- 60 Singh S., Singh B., Singh A.P. *Nematodes: a threat to sustainability of agriculture*. Procedia Environ. Sci., 2015, 29: 215-216. (doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.270)
- 61 Jones J.T., Haegeman A., Danchin E.G., Gaur H. S., Helder J., Jones M.G. *Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology*. Mol. Plant Pathol., 2013, 14: 946-961. (doi: 10.1111/mpp.12057)
- 62 Siddique S., Grundler F.M. *Parasitic nematodes manipulate plant development to establish feeding sites*. Curr. Opin. Microbiol., 2018, 46: 102-108. (doi: 10.1016/j.mib.2018.09.004)
- 63 Haydock P.P., Woods S.R., Grove I.G., Hare M.C., Perry R.N., Moens M. *Plant Nematology*. Chemical control of nematodes, 2006, 392-410. (DOI: 10.1079/9781780641515.0459)
- 64 Akker S. *Plant–nematode interactions*. Curr. Opinion in Plant Biol., 2021, 62: 102035. (<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2021.102035>)
- 65 Soltani T., Nejad R.F., Ahmadi A.R., Fayazi F. *Chemical control of root-knot nematode (Meloidogyne javanica) on olive in the greenhouse conditions*. J. Plant Pathol. Microbiol., 2013. (doi: 10.4172/2157-7471.1000183)
- 66 Comans-Pérez R., Aguilar-Marcelino L., Mendoza de Gives P., Sánchez J., López-Arellano M., Singh M. *In vitro lethal capability of ten strains of edible mushrooms against Haemonchus contortus (Nematoda) infective larvae [conference poster]*; Proceedings of the 8th International Conference on Mushroom Biology and Mushroom Products (ICMBMP8); New Delhi, India., 2014, 557-562
- 67 Luo H., Li X., Li G., Pan Y., Zhang K. *Acanthocytes of Stropharia rugosoannulata function as a nematode-attacking device*. Appl. Environ. Microbiol., 2006, 72: 2982-2987. (doi: 10.1128/AEM.72.4.2982-2987.2006)
- 68 Kwok O., Plattner R., Weisleder D., Wicklow D. *A nematicidal toxin from Pleurotus ostreatus NRRL 3526*. J. Chem. Ecol., 1992, 18: 127-136. (doi: 10.1007/BF00993748)
- 69 Palizi P., Goltapeh E., Pourjam E., Safaie N. *Potential of oyster mushrooms for the biocontrol of sugar beet nematode (Heterodera schachtii)*. J. Plant Prot. Res., 2009, 49: 27-34. (doi: 10.2478/v10045-009-0004-6)
- 70 Mamiy Y. *Attraction of the pinewood nematode to mycelium of some wood-decay fungi*. Jpn. J. Nematol., 2006, 36: 1-9. (doi: 10.3725/jjn.36.1)
- 71 Bua-art S., Saksirirat W., Hiransalee A., Kanokmedhaku S., Lekphrom R. *Effect of bioactive compound from luminescent mushroom (Neonothopanus nambi Speg.) on root-knot nematode (Meloidogyne incognita Chitwood) and non-target organisms*. Khon Kaen Univ. Res. J., 2011, 16: 331-341. (<http://resjournal.kku.ac.th>).
- 72 Stadler M., Mayer A., Anke H., Sterner O. *Fatty acids and other compounds with nematicidal activity from cultures of Basidiomycetes*. Planta Med., 1994, 60: 128-132. (doi: 10.1055/s-2006-959433)
- 73 Lorenzen K., Anke T. *Basidiomycetes as source for new bioactive natural products*. Curr. Org. Chem., 1998, 2: 329-364.
https://books.google.kz/books?hl=ru&lr=&id=aI_3BDcYKXgC&oi=fnd&pg=PA329&ots=hvaBwuGLKh&sig=qjzMaEbrVLChRXplsLOcQDiTm0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- 74 Hayashi M., Wada K., Munakata K. *New nematicidal metabolites from a fungus, Irpex lacteus*. Agric. Biol. Chem., 1981, 45: 1527-1529.
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00021369.1981.10864743>
- 75 Lambert M., Kremer S., Anke H. *Antimicrobial, phytotoxic, nematicidal, cytotoxic, and mutagenic activities of 1-hydroxypyrene, the initial metabolite in pyrene metabolism by the basidiomycete Crinipellis stipitaria*. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 1995, 55: 25-257. (doi: 10.1007/BF00203017)
- 76 Mayer A., Anke H., Sterner O. *Omphalotin, a new cyclic peptide with potent nematicidal activity from Omphalotus olearius I. Fermentation and biological activity*. Nat. Prod. Lett., 1997, 10: 25-32. (doi: 10.1080/10575639708043691)
- 77 Dong J.Y., Li X.P., Li L., Li G.H., Liu Y.J., Zhang K.Q. *Preliminary results on nematicidal activity from culture filtrates of Basidiomycetes against the pine wood nematode, Bursaphelenchus xylophilus (Aphelenchoididae)*. Ann. Microbiol., 2006, 56: 163-166. (doi: 10.1007/BF03174999)