

МИКОТОКСИНЫ В ВЕГЕТИРУЮЩИХ РАСТЕНИЯХ КУКУРУЗЫ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОНОПОСЕВА

Г. П. Кононенко¹, доктор биологических наук, П. Ф. Васильков², аспирант,
А. А. Буркин¹, кандидат медицинских наук, Л. В. Мосина², доктор биологических наук

¹Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии –
филиал Федерального научного центра «Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук»

123022, Москва, Звенигородское ш., 5

E-mail: kononenkogp@mail.ru

²Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева

127550, Москва, Тимирязевская ул., 49

E-mail: mosina.l.v@yandex.ru

Исследования проводили с целью выявления характера контаминации микотоксинами вегетирующих растений кукурузы (*Zea mays* L.) в периоды листообразования и выметывания метелки. Раннеспелые гибриды Краснодарский 194 МВ, Ладомжский 175 МВ и Компетенс®, устойчивые к грибным заболеваниям, выращивали в весенне-летний период в условиях Московской области на участке с дерново-подзолистой почвой и внесении удобрений НРК 16:16:16. Для микотоксикологического анализа надземные части растений отбирали еженедельно от фазы формирования 3-го листа (через 18 дней после посева). Образцы всходов, листьев и стеблей (общее число – 172) после высушивания измельчали и экстрагировали смесью ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16 с расходом 10 мл на 1 г навески. В экстрактах после 10-кратного разбавления фосфатно-солевым буферным раствором pH 7,5 определяли содержание микотоксинов методом непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. T-2 токсин, дезоксиниваленон, диацетоксисцирпенон, роридин А, стеригматоцистин и PR-токсин отсутствовали. Всходы и листья кукурузы содержали циклопиазоновую кислоту (ЦПК), эмодин (ЭМО), микофеноловую кислоту (МФК), альтернариол (АОЛ), эргоалкалоиды (ЭА), афлатоксин В₁ (AB₁) и единичные образцы – зеараленон (ЗЕН), охратоксин А (ОА) и цитринин (ЦИТ) в концентрациях от 16 до 35 мкг/кг. Фумонизины группы В найдены только в ранних всходах. Постоянным контаминантом стеблей была МФК, тогда как ЭА и ЦИТ отсутствовали. Во всходах и листьях у всех гибридов при смене фаз развития обнаружение АОЛ и ЭА оставалось стабильным, как и средние содержания ЦПК (около 100 мкг/кг), АОЛ (от 17 до 27 мкг/кг), ЭМО (35...58 мкг/кг), МФК (28...41 мкг/кг), ЭА (6...18 мкг/кг) и AB₁ (2 мкг/кг). В стеблях растений, находящихся в фазах 7...9 листа и выметывания, отмечено варьирование случаев детектирования ЦПК, ЭМО, АОЛ, AB₁ и ОА в зависимости от генотипа.

MYCOTOXINS IN VEGETATING CORN PLANTS FROM EXPERIMENTAL MONO-SOWING

G. P. Kononenko¹, P. F. Vasilkov², A. A. Burkin¹, L. V. Mosina²

¹All-Russian Research Institute of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology –
Branch of Federal Scientific Center Skryabin and Kovalenko All-Russian Research
Institute of Experimental Veterinary Russian Academy of Sciences

123022, Moscow, Zvenigorodskoe sh., 5

E-mail: kononenkogp@mail.ru

²Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev

127550, Moscow, Timiryazevskaya ul., 49

E-mail: mosina.l.v@yandex.ru

The aim of present study was to reveal the mycotoxin contamination of vegetative maize (*Zea mays* L.) plants during the periods of leaf formation and panicle emergence. Early maturing hybrids of the varieties Krasnodarsky 194 MV, Ladozhsky 175 MV and Competence®, resistant to fungal diseases, were grown in the spring-summer period of 2023 on the experimental field of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy (Moscow) with sod-podzolic soil and the application of NPK fertilizers 16:16:16. For mycotoxicological analysis, aerial parts of plants were collected weekly from the phase of formation of the 3rd leaf (18 days after sowing). Samples of seedlings, leaves and stems (total number – 172), after drying, were ground in a laboratory mill and extracted with a mixture of acetonitrile and water in a volumetric ratio of 84:16 with a consumption of 10 ml per 1 g of sample. Mycotoxin content was determined in extracts after 10-fold dilution with phosphate-salt buffer solution pH 7.5 by indirect competitive enzyme immunoassay. T-2 toxin, deoxynivalenol, diacetoxiscirpenol, roridin A, sterigmatocystin and PR toxin were absent in the samples. Corn seedlings and leaves contained cyclopiazonic acid (CPA), emodin (EMO), mycophenolic acid (MPA), alternariol (AOL), ergot alkaloids (EA), aflatoxin B₁ (AB₁) and single samples – zearalenone (ZEN), ochratoxin A (OA) and citrinin (CIT) in concentrations from 16 up to 35 µg/kg. Fumonisin of group B are found only in early seedlings. The permanent contaminant of the stems was MPA, whereas EA and CIT were absent. In the seedlings and leaves of all hybrids, the detection of AOL and EA remained stable during the change of development phases, as did the average concentrations of CPA (about 100 µg/kg), AOL (from 17 to 27 µg/kg), EMO (35–58 µg/kg), MPA (28–41 µg/kg), EA (6–18 µg/kg) and AB₁ (2 µg/kg). In the stems of plants in phases 7–9 of leaf and sweeping, variation in cases of detection of CPA, EMO, AOL, AB₁ and OA was noted by varieties.

Ключевые слова: кукуруза, всходы, листья, стебли, микотоксины, иммуноферментный анализ.

Key words: corn, seedlings, leaves, stems, mycotoxins, ELISA.

Для кукурузы, зернофуражной культуры многоцелевого использования, особая опасность связана с ситуациями, которые приводят к множественной контаминации микотоксинами зерна [1, 2] и силосованной зеленой массы [3, 4]. Инфицирование растений токсигенными грибами,

которое нередко принимает характер эпифитотий и приводит к накоплению микотоксинов в зерне, возникает из-за смещения экологического равновесия под воздействием причин абиотической и биотической природы [5, 6, 7]. При консервировании урожая путем уплотнения и герметизации

Табл. 1. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Краснодарский 194 МВ по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III* (n=35)	I (n=12)	II (n=13)	III (n=10)	II (n=3)	III (n=7)
ЗЕН	1/19	–	1/19	–	–	–
ФУМ	1/2600	1/2600	–	–	–	–
АОЛ	30/13–23–40	7/16–21–29	13/13–21–40	10/15–27–40	1/12	3/26–29–32
ОА	3/19–45–71	1/71	2/19	–	–	–
ЦИТ	–	–	–	–	–	–
АВ	25/1–2–2	6/2	11/1–2–2	8/1–2–2	–	1/1
ЦПК	10/63–90–174	1/63	2/82	7/66–108–174	2/82	–
МФК	18/21–32–50	9/21–36–50	2/28	7/23–32–44	1/38	6/25–32–40
ЭА	8/7–13–21	2/10	3/7–11–20	3/16–18–21	–	–
ЭМО	22/32–43–76	1/35	11/32–39–62	10/35–55–76	1/38	7/26–40–47

*здесь и в остальных таблицах: период I – фазы 3-го и 5-го листа, период II – фазы 7-го и 9-го листа; период III – фаза выметывания метелки; среднее содержание микотоксина по выборке определяли как среднее арифметическое величин, полученных для положительных образцов; n – число исследованных проб; прочерк – микотоксин не обнаружен.

в зеленой массе формируется особая по составу микобиота с участием микроаэрофильных грибов, наделенных токсинообразующей способностью, а в местах отбора корма и в пристеночных участках закладки возможно развитие высокотоксигенных видов свободноживущих микромицетов [8, 9]. Для оценки роли неблагоприятных факторов важно располагать информацией о собственном микотоксикологическом статусе растений, к формированию которого причастны обширные сообщества микроскопических грибов, обитающих внутри организма [10, 11]. Сведения о комплексе микотоксинов, свойственном растению, могут быть получены на экспериментальных монопосевах с соблюдением оптимальных агротехнических приемов и контролем фитосанитарного состояния. Результаты такого обследования недавно стали известны для вегетирующего ячменя, пшеницы и овса [12].

Цель исследования – выявление характера контаминации микотоксинами вегетирующих растений кукурузы (*Zea mays* L.) в периоды листообразования и выметывания метелки.

Методика. Кукурузу (*Zea mays* L.) выращивали на участке опытного поля лаборатории агроэкологического мониторинга кафедры экологии РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева. Почва на делянках – дерново-подзолистая с внесением удобрений NPK 16:16:16, закладку и проведение опыта выполняли в соответствии с установленными правилами, полив и прополку – регулярно ручным способом. В опыте выращивали раннеспелые и устойчивые к грибным заболеваниям гибриды Краснодарский 194 МВ, Ладжский 175 МВ и Компетенс® (KWS SAAT AG, Германия). Содержание микотоксинов в их семенах определяли по ГОСТ 31653–2012. После проверки на всхожесть проводили посев и через 18 дней (после массового формирования у растений 3-го листа) начинали регулярные отборы образцов для микотоксикологического анализа до завершения фазы выметывания метелки. Для этого еженедельно надземные части растений срезали на высоте 3...5 см от поверхности почвы. Первые сборы (14.06, 23.06, 28.06) проводили в фазах 3-го и 5-го листа (I период), следующие (5.07, 12.07,

21.07) – 7-го и 9-го листа (II период), далее (31.07, 9.08) – в фазе выметывания метелки (III период). В I период для анализа использовали надземные части, во II их разделяли на листовые пластинки и стебли, в III – на листовые пластинки и стебли с метелками. Каждый образец (общее число – 172 шт.) разрезали на фрагменты по 1,0...1,5 см, выдерживали в интенсивно вентилируемом боксе до воздушно-сухого состояния и затем мелко измельчали в лабораторной мельнице. Экстракцию проводили смесью ацетонитрила и воды в объемном соотношении 84:16 с расходом 10 мл на 1 г навески. Экстракты после 10-кратного разбавления фосфатно-солевым буферным раствором pH 7,5 использовали для непрямого конкурентного иммуноферментного анализа. Концентрацию T-2 токсина (T-2), дезоксиниваленола (ДОН), зеараленона (ЗЕН), фумонизинов группы В (ФУМ), эргоалкалоидов (ЭА), альтернариола (АОЛ), роридина А (РОА), афлатоксина В₁ (АВ₁), стеригматоцистина (СТЕ), циклопиазоновой кислоты (ЦПК), эмодаина (ЭМО), ократоксина А (ОА), цитринина (ЦИТ), микофеноловой кислоты (МФК), PR-токсина (PR) определяли с использованием аттестованных коммерческих и исследовательских иммуноферментных тест-систем (СТО 00494143.01–2015). Нижние пределы количественных измерений соответствовали 85 %-ному уровню связывания антител и составляли 1 (АВ₁, ЭА), 2 (T-2, ОА, СТЕ), 5 (РОА), 10 (АОЛ, МФК, ЗЕН, ЭМО, ЦИТ, ЦПК), 40 (ДОН, ФУМ) и 100 (ДАС, PR) нг/г.

Результаты и обсуждение. Общим для растений кукурузы в нашем исследовании было отсутствие фузариотоксинов (T-2, ДОН, ДАС), а также СТЕ, PR и токсина трихотеценового ряда РОА во все изученные фазы. Во всходах и листьях гибридов кукурузы к группе часто выявляемых микотоксинов относились ЦПК, ЭМО, МФК, АОЛ, ЭА, АВ₁ и в единичных образцах обнаружены ЗЕН, ОА и ЦИТ в концентрациях, близких к пределам обнаружения метода (табл. 1–3). Количества типичных микотоксинов в среднем по гибридам были следующими: ЦПК – 106 мкг/кг, ЭМО – 45, МФК – 35, АОЛ – 23, ЭА – 12 и АВ₁ – 2 мкг/кг.

О направленности изменений в контаминации растений при смене фаз развития можно составить лишь общее

Табл. 2. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Ладжский 175 МВ по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III (n=50)	I (n=18)	II (n=20)	III (n=12)	II (n=6)	III (n=8)
ЗЕН	2/15	–	–	2/15	–	–
ФУМ	2/198	2/198	–	–	–	–
АОЛ	41/9–22–40	16/18–23–29	13/9–17–27	12/16–26–40	–	3/22–27–30
ОА	1/8	–	–	1/8	1/25	–
ЦИТ	3/33–35–40	–	2/33	1/40	–	–
АВ	33/1–2–2	11/2–2–2	14/1–2–2	8/1–2–2	–	–
ЦПК	27/63–119–243	12/67–99–132	9/79–128–224	6/63–130–243	–	–
МФК	20/20–32–51	7/25–40–51	8/23–28–33	5/20–29–38	4/20–25–33	1/20
ЭА	31/5–12–45	11/5–12–24	15/6–12–45	5/8–13–20	–	–
ЭМО	26/28–40–62	3/33–37–46	13/28–39–62	10/32–44–62	–	4/25–30–52

Табл. 3. Встречаемость и содержание микотоксинов во всходах, листьях и стеблях кукурузы гибрида Компетенс® по периодам роста I–III

Микотоксин	Число проб, содержащих микотоксин, шт. / количество токсина (мин.–среднее–макс.), мкг/кг					
	всходы, листья			стебли		
	I–III (n=50)	I (n=20)	II (n=19)	III (n=11)	II (n=6)	III (n=7)
ЗЕН	3/14–15–16	–	–	3/14–15–16	–	–
ФУМ	3/224–245–228	3/224–245–228	–	–	–	–
АОЛ	39/14–23–40	9/14–20–25	19/16–25–35	11/15–25–40	2/12,13	1/19
ОА	3/6–8–11	–	1/11	2/6, 7	–	–
ЦИТ	–	–	–	–	–	–
АВ ₁	36/1–2–3	10/2–2–3	17/1–2–3	9/2–2–3	–	1/2
ЦПК	22/63–119–251	–	15/63–84–122	7/81–153–251	–	2/87
МФК	22/20–41–62	9/28–41–62	7/22–39–51	6/20–31–42	4/24–42–67	3/20–28–37
ЭА	24/6–11–37	2/6	16/7–12–28	6/10–16–37	–	–
ЭМО	26/32–51–81	–	15/32–43–62	11/40–58–81	–	4/25–29–33

представление. У всех гибридов во всходах и листьях частота обнаружения АОЛ, ЭА, как и средние содержания большинства компонентов оставались стабильными: ЦПК – около 100 мкг/кг, АОЛ – 17...27 мкг/кг, ЭМО – 35...58 мкг/кг, МФК – 28...41 мкг/кг, ЭА – 6...18 мкг/кг, АВ₁ – фоновое. При этом ЭМО в I период выявляли только у Краснодарского 194МВ и Ладожского 175МВ, хотя и редко (см. табл. 1, 2), а у Компетенс® его не обнаружили (см. табл. 3). У гибрида Краснодарский 194МВ МФК детектировали только в двух образцах во II периоде, ЦПК – в единичных случаях в I и II периодах (см. табл. 1), а во всходах Компетенс® ЦПК найти не удалось (см. табл. 3). ЗЕН был определен в образцах более поздних сборов: у Краснодарского 194МВ – в фазе 7-го и 9-го листа, у Ладожского 175МВ и Компетенс® в фазе выметывания. ОА находили в разных фазах: у Ладожского 175МВ – в фазе выметывания, у Компетенс® – в фазе 7-го и 9-го листа, у Краснодарского 194МВ – в первые два периода. ЦИТ обнаруживали только у Ладожского 175МВ во II и III периодах.

У всех гибридов состав контаминантов в стеблях и стеблях с метелками был значительно беднее, чем в листьях, ЭА и ЦИТ отсутствовали. В период II стебли содержали МФК как постоянный компонент в сочетании с АОЛ, ЦПК и ЭМО у Краснодарского 194МВ (см. табл. 1), ОА у Ладожского 175МВ (см. табл. 2) и АОЛ у Компетенс® (см. табл. 3). В стеблях с метелками (в период III) присутствовали АОЛ, МФК и ЭМО, у Краснодарского 194МВ совместно с АВ₁, у Компетенс® – с АВ₁ и ЦПК.

Полученные результаты указывают на вовлеченность токсигенных эндофитных грибов в физиологические процессы растений и причастность к смене его онтогенетических состояний, однако поиск каких-либо соответствий с составом микобиоты пока не представляется возможным из-за недостатка базовых сведений. Судя по характеру контаминации, эндофитами кукурузы, способными к токсинообразованию, могут быть микромицеты родов *Fusarium*, *Penicillium*, *Aspergillus*, *Alternaria* и других. Недавно среди эндофитов листьев этого растения идентифицированы *Fusarium oxysporum*, *F. equiseti*, *Gibberella moniliformis* (= *F. verticillioidea*), *F. sacchari* (= *F. moniliforme* var. *subglutinans*), а также *Eupenicillium javanicum* (= *P. javanicum*), представители родов *Penicillium*, *Acremonium* и *Rhizomucor*, сордариомицеты (*Sarocladium zeae*, *Eutypella scoparia*) и плеоспоровый гриб (*Pleosporeales*), в стеблях – *F. oxysporum*, *F. concentricum*, *F. andiyazi*, *F. succisae*, *Gibberella circinata* (= *F. circinatum*), *Fusarium* sp., *Aspergillus carneus*, *Trichoderma koningiopsis* и *Sarocladium zeae* [13]. В стеблях кукурузы, отобранной на полях в разных штатах США, более чем в половине образцов были идентифицированы *F. oxysporum*, *F. equiseti*, *F. semitectum*, *F. acuminatum*, *F. solani* [14]. В составе эндофитов взрослых растений из графства Девон (Великобритания) доминировали *Alternaria alternata* (в листьях) и *Acremonium strictum* (в стеблях) [15]. Известно, что

F. semitectum, который входит в комплекс морфологически близких видов *F. incarnatum-equiseti*, продуцирует ЗЕН [16], вид *A. alternata* – АОЛ [17]. Возможно, к эндогенной контаминации кукурузы ЦПК и МФК причастны и отдельные виды грибов рода *Penicillium* [18]. Судя по данным, полученным для других растений, среди метаболитов эндофита *P. citrinum* из цветков базилика тонкоцветного (*Ocimum tenuiflorum*) найдены АОЛ и ЦИТ [19], из стеблей бругиеры голокорневой (*Bruguiera gymnorhiza*) – ЭМО [20], *P. oxalicum* из листьев растений рода *Coffea* продуцировал ОА [21]. Грибы *Aspergillus* также способны к эндофитному обитанию и, наряду с типичными для них ЭА [22], образуют и несвойственные метаболиты, например, АОЛ [23].

У вегетирующей кукурузы на ранних фазах развития установлена слабо выраженная контаминация микотоксинами с регулярной встречаемостью ЦПК, АОЛ, МФК, ЦПК, ЭМО, ЭА, АВ₁ и редкие случаи обнаружения ЗЕН, ОА, ЦИТ. Такая «норма» позволяет оценивать степень возможных отклонений под воздействием антропогенных и биотических факторов при хозяйственном использовании культуры. Для выяснения причин накопления микотоксинов в консервированных кукурузных кормах в дальнейшем, безусловно, границы наблюдений за статусом растения следует расширить до оптимального срока заготовки на силос в начале молочно-восковой спелости зерна.

У всех изученных генотипов в I период при самом раннем сборе (14.06) были обнаружены единичные образцы, содержащие ФУМ. При следующих сборах (23.06 и 28.06) в тот же период, как и во II и III периоды, такие образцы отсутствовали. Семена гибридов Краснодарский 194МВ и Ладожский 175МВ, проанализированные перед посевом, содержали ФУМ и соответствие их количеств (6000 и 400 мкг/кг) с найденным во всходах (2600 и 198 мкг/кг) позволяет предположить возможность переноса этих токсинов в надземную часть в начале роста.

Выводы. Вегетирующим растениям гибридов кукурузы (Краснодарский 194МВ, Ладожский 175МВ и Компетенс®) в периоды листообразования и выметывания метелки свойственна слабо выраженная эндогенная контаминация такими микотоксинами, как ЦПК, АОЛ, МФК, ЭМО, ЭА, АВ₁, редкие случаи обнаружения ЗЕН, ОА и ЦИТ, отсутствие фузариотоксинов (Т-2, ДОН, ДАС), а также СТЕ, PR и РОА. Среднее содержание ЦПК, АОЛ, ЭМО, ЭА и АВ₁ во всходах и листьях всех изученных гибридов при смене фаз развития оставалось сходным. Выявлены межсортные различия по компонентному составу микотоксинов во всходах, листьях и стеблевой массе при смене фаз развития растения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета организаций: Всероссийский научно-исследовательский институт ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной

ветеринарии имени К. И. Скрябина и Я. Р. Коваленко Российской академии наук» и Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Микотоксикологическое исследование кормового зерна кукурузы (1998–2018 гг.) / Г. П. Кононенко, А. А. Буркин, Е. В. Зотова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 3. С. 28–31. doi: 10.31857/S2500-26272019328-31.
2. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 2. Зерно пшеницы, ячменя, овса, кукурузы // Ветеринария сегодня. 2020. № 2(33). С. 139–145. doi: 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145.
3. Silage review: Mycotoxins in silage: occurrence, effects, prevention, and mitigation / I. M. Ogunade, C. Martinez-Tupia, O. C. M. Queiroz, et al. // Journal of Dairy Science. 2018. Vol. 101(5). P. 4034–4059. doi: 10.3168/jds.2017-13788.
4. Occurrence of mycotoxins and mycotoxigenic fungi in silage from the north of Portugal at feed-out / J. M. Gonzalez-Jartin, V. Ferreira, I. Rodriguez-Cañás, et al. // International Journal of Food Microbiology. 2022. Vol. 365. Article 109556. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160522000277?via%3Dihub> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109556.
5. Czembor E., Stepień Ł., Waśkiewicz A. Effect of environmental factors on *Fusarium* species and associated mycotoxins in maize grain grown in Poland // PLoS ONE. 2015. Vol. 10(7). Article e0133644. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0133644> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0133644.
6. Mycotoxin occurrence in maize produced in northern Italy over the years 2009–2011: focus on the role of crop related factors / M. Camardo, Leggieri, T. Bertuzzi, A. Pietry, et al. // Phytopathologia Mediterranea. 2015. Vol. 54. P. 212–221. doi: 10.14601/Phytopathol_Mediterr-14632.
7. Mycotoxins in Flanders' fields: Occurrence and correlations with *Fusarium* species in whole-plant harvested maize / J. Vandicke, K. De Visschere, S. Croubels, et al. // Microorganisms. 2019. Vol. 7. Article 571. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/7/11/571> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/microorganisms7110571.
8. Co-occurrence of regulated and emerging mycotoxins in corn silage: relationships with fermentation quality and bacterial communities / A. Gallo, F. Ghilardelli, A. S. Atzori, et al. // Toxins. 2021. Vol. 13. Article 232. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/13/3/232> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/toxins13030232.
9. Mixtures of mycotoxins, phytoestrogens, and other secondary metabolites in whole-plant corn silages and total mixed rations of dairy farms in central and northern Mexico / F. Penagos-Tabares, M. Sulayok, J.-I. Artavia, et al. // Toxins. 2023. Vol. 15. Article 153. URL: <https://www.mdpi.com/2072-6651/15/2/153> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3390/toxins15020153.
10. Understanding the biodiversity and biological applications of endophytic fungi: A review / Y. Mishra, A. Singh, A. Batra, et al. // Journal of Microbial & Biochemical Technology. 2014. Vol. S8. Article 004. URL: <https://www.walshmedicalmedia.com/open-access/understanding-the-biodiversity-and-biological-applications-of-endophytic-fungi-a-review-1948-5948.S8-004.pdf> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.4172/1948-5948.S8-004.
11. Yadav A. N. Biodiversity and biotechnological applications of endophytic fungi for sustainable agriculture and allied sectors // Acta Scientific Microbiology. 2018. Vol. 1(5). P. 01–05. URL: <https://actascientific.com/ASMI/pdf/ASMI-01-0044.pdf> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.31080/ASMI.2018.01.0044.
12. Кононенко Г. П., Зотова Е. В., Буркин А. А. Опыт микотоксикологического обследования зернофуражных культур // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56(5). С. 958–967. doi: 10.15389/agrobiology.2021.5.958 rus.
13. Functional characterization of endophytic fungal community associated with *Oryza sativa* L. and *Zea mays* L. / M. Potshangbam, S. I. Devi, D. Sahoo, et al. // Frontiers in Microbiology. 2017. Vol. 8. Article 325. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2017.00325/full> (дата обращения 26.01.2024). doi: 10.3389/fmicb.2017.00325.
14. *Fusarium* spp. from corn, sorghum, and soybean fields in the central and eastern United States / J. F. Leslie, C. A. S. Pearson, P. E. Nelson, et al. // Phytopathology. 1990. Vol. 80 (4). P. 343–350. doi: 10.1094/phyto-80-343.
15. Fisher P. J., Petrini O., Lapin-Scott H. M. The distribution of some fungal and bacterial endophytes in maize (*Zea mays* L.) // New Phytologist. 1992. Vol. 122. P. 299–305. doi: 10.1111/j.1469-8137.1992.tb04234.x.
16. Characterization of Italian isolates of *Fusarium semitectum* from alfalfa (*Medicago sativa* L.) by AFLP analysis, morphology, pathogenicity and toxin production / M. Zaccardelli, V. Balmas, C. Aldomare, et al. // Journal of Phytopathology. 2006. Vol. 164. P. 454–460. doi: 10.1111/j.1439-0434.2006.01128.x.
17. Toxicogenic *Alternaria* species: impact in cereals worldwide / S. M. Tralamazza, K. C. Piacentini, C. H. T. Iwase, et al. // Current Opinion in Food Science. 2018. Vol. 23. P. 57–63. doi: 10.1016/j.cofc.2018.05.002.
18. Frisvad J. C., Samson R. A. Polyphasic taxonomy of *Penicillium* subgenus *Penicillium*, A guide to identification of food and airborne terverticillate *Penicillia* and their mycotoxins // Studies in Mycology. 2004. Vol. 49. P. 1–174.
19. Bioactive polyketides and alkaloids from *Penicillium citrinum*, a fungal endophyte isolated from *Ocimum tenuiflorum* / D. Lai, H. Broetz-Oesterheld, W. E. G. Mueller, et al. // Fitoterapia. 2013. Vol. 91. P. 100–106. doi: 10.1016/j.fitote.2013.08.017.
20. Endophytic fungus strain ZD6 isolated from the stem of *Bruguiera gymnorrhiza* and antibacterial activity of its metabolites / M. Li, M. Chang, Q. Zhang, et al. // Junwu Xuebao (Mycosystema). 2010. Vol. 29. P. 739–745.
21. *Penicillium* species endophytic in coffee plants and ochratoxin A production / F. E. Vega, F. Posada, S. W. Peterson, et al. // Mycologia. 2006. Vol. 98(1). P. 31–42. doi: 10.3852/mycologia.98.1.31.
22. Natural product diversity from the endophytic fungi of the genus *Aspergillus* / S. S. El-hawary, A. S. Moawad, H. S. Bahr, et al. // RSC Advances. 2020. Vol. 10. P. 22058–22079. doi: 10.1039/d0ra04290k.
23. Cytotoxic secondary metabolites from the endophytic fungus *Aspergillus versicolor* KU258497 / S. S. Ebada, M. El-Neketi, W. Ebrahim, et al. // Phytochemistry Letters. 2018. Vol. 24. P. 88–93. doi: 10.1016/j.phytol.2018.01.010.

Поступила в редакцию 11.02.2024
После доработки 15.03.2024
Принята к публикации 09.04.2024