

Научная статья

УДК 614.31:633.1:613.2

<https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.13>

Микотоксины в кукурузе: от полевой патологии к угрозе здоровью животных и человека (обзор)

Елена Анатольевна Даниленко^{1*}¹ Всероссийский научно-исследовательский институт кукурузы (14Б, ул. Ермолова, Пятигорск, 357528, Россия)¹ yelena.danilenko.77@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку

Аннотация. Кукуруза сильно подвержена поражению токсигенными микромицетами. Микотоксины накапливаются в товарном зерне и представляют серьезную угрозу для общественной пищевой безопасности, вызывая токсикозы у человека и животных. Целью работы является систематизация современных научных данных о переходе опасных микотоксинов из полевой патологии кукурузы в реальную угрозу для здоровья, а также критический анализ эффективности существующих методов их лабораторной диагностики. Подробно рассмотрен патогенетический потенциал ключевых фузариотоксинов (дезоксиниваленол, зеараленон, фумонизины), афлатоксинов рода *Aspergillus* и альтернариола. Проведен сравнительный анализ методов детекции этих экотоксикантов. Показано, что для количественного определения вторичных метаболитов наиболее эффективен иммуоферментный анализ (ИФА), в то время как ПЦР-диагностика является комплементарным инструментом для раннего выявления фитопатогенов в полевых условиях. Научная новизна работы заключается в том, что проблема микотоксинов впервые рассмотрена не изолированно, а как сквозной процесс трансформации полевой фитопатологии в непосредственную угрозу здоровью потребителя. Предложенный комплексный подход позволяет объединить агрономические, ветеринарные и медицинские аспекты в рамках единой пищевой цепи («от поля до стола»). Защита населения от воздействия микотоксинов требует междисциплинарного контроля, связывающего полевой мониторинг, условия хранения зерна и санитарно-гигиеническую экспертизу.

Ключевые слова: кукуруза, микотоксины, фузариотоксины, афлатоксины, альтернариол, безопасность пищевых продуктов, ИФА, ПЦР-диагностика

Для цитирования: Даниленко Е. А. Микотоксины в кукурузе: от полевой патологии к угрозе здоровью животных и человека (обзор) // Современная наука и инновации. 2026. № 2. С. 146–152. <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.13>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.12.2025;
одобрена после рецензирования 01.04.2026;
принята к публикации 01.06.2026.

Research article

Mycotoxins in maize: from field pathology to animal and human health threats (review)

Elena A. Danilenko^{1*}¹ All-Russian Research Institute of Corn (14B, Ermolova St., Pyatigorsk, 357528, Russia)¹ yelena.danilenko.77@mail.ru

*Corresponding author

Abstract. Maize is highly susceptible to contamination by toxigenic micromycetes. Mycotoxins accumulate in commercial grain and pose a serious threat to public food safety, causing toxicosis in both humans and animals. This study aims to systematize current scientific data on the transition of hazardous mycotoxins from a field pathology in maize to a real health threat, as well as to critically analyze the efficacy of existing laboratory diagnostic methods. The thoroughly examines the pathogenetic potential of key fusariotoxins (deoxynivalenol, zearalenone, fumonisins), *Aspergillus* aflatoxins, and alternariol. A comparative analysis of detection methods for these ecotoxins was performed. The results show that enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA) is the most effective and cost-efficient method for the quantitative determination of the secondary metabolites themselves, whereas PCR diagnostics serves as a complementary tool that enables early detection of phytopathogens under field conditions. The scientific novelty of this work lies in the fact that the mycotoxin problem is considered not in isolation, but as an end-to-end transformation of field phytopathology into a direct threat to consumer health. The proposed integrated approach allows for the consolidation of agronomic, veterinary, and medical aspects within a single "farm-to-fork" food chain. Protecting the population from mycotoxin exposure requires interdisciplinary control that links field monitoring, grain storage conditions, and rapid sanitary-hygienic expertise.

Keywords: corn, mycotoxins, fusariotoxins, aflatoxins, alternariol, food safety, ELISA, PCR diagnostics

For citation: Danilenko EA. Mycotoxins in maize: from field pathology to animal and human health threats (review). *Modern Science and Innovations*. 2026;(2):146-152. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-910X.2026.2.13>

Conflict of interest: the author declares that there is no conflict of interest.

The article was submitted 01.12.2025;

approved after reviewing 01.04.2026;

accepted for publication 01.06.2026.

Введение. Кукуруза (*Zea mays* L.) – одна из ключевых сельскохозяйственных культур, важная для продовольственной и кормовой безопасности. Однако её посевы поражаются токсигенными грибами – продуцентами микотоксинов, устойчивых к термообработке и хранению токсичных соединений. Эти вещества накапливаются в зерне и проходят по всей цепочке, попадая в корма и продукты питания [1].

Сегодня проблема микотоксинов выходит за рамки агрономии, становясь вопросом концепции «Единого здоровья» (One Health). У сельскохозяйственных животных они вызывают микотоксикозы и снижают продуктивность. Для человека скрытая угроза реализуется через алиментарный путь – как при прямом употреблении продуктов переработки загрязненного зерна, так и опосредованно, через продукты животноводства (молоко, мясо, яйца), содержащие метаболиты токсинов [1, 2].

Хотя основное внимание традиционно уделяется фузариотоксинам (дезоксиниваленол, зearаленон, фумонизины), из-за изменения климата активно распространяются грибы родов *Aspergillus* P. Micheli ex Link и *Alternaria* Nees, вырабатывающие канцерогенные афлатоксины и «всплывающие» (emerging) токсины, такие как альтернариол [3].

Проблема загрязнения зерновых культур микотоксинами носит повсеместный характер. Мониторинг продовольственного зерна в Российской Федерации на примере урожая 2020 года наглядно демонстрирует высокий риск именно сочетанного (микст) загрязнения урожая сразу несколькими метаболитами, среди которых наиболее распространены дезоксиниваленол, тентоксин и циклопиазоновая кислота [4]. Это подтверждает, что в реальных условиях потребитель сталкивается не с изолированным токсином, а с их комплексом.

Цель настоящего обзора – обобщить данные о влиянии ключевых микотоксинов кукурузы на организм человека и животных, а также оценить современные методы их детекции (ИФА, ПЦР, хроматография) для обеспечения биобезопасности пищевой цепи. Для достижения поставленной цели необходимо изучить видовой состав и эколого-биологические особенности основных грибов-продуцентов микотоксинов (*Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Alternaria* spp.), поражающих посевы кукурузы в полевой период и во время хранения, а также подробно проанализировать механизмы патогенетического воздействия ключевых фузариотоксинов (дезоксиниваленола, зearаленона, фумонизинов) на органы и системы организма человека и теплокровных животных. Кроме того,

важными задачами работы являются оценка медицинских рисков, связанных с контаминацией зерна кукурузы афлатоксинами и «всплывающими» (*emerging*) токсинами грибов рода *Alternaria* (альтернариол), и проведение сравнительного аналитического обзора современных инструментальных методов диагностики микотоксинов с выделением их преимуществ и ограничений для рутинного санитарного контроля.

Практическая значимость. Систематизированные в обзоре данные обосновывают необходимость сопряжения полевого мониторинга и лабораторного контроля зерна кукурузы. Результаты работы могут быть использованы специалистами санитарно-эпидемиологических и ветеринарных служб для оптимизации схем раннего выявления экотоксикантов в цепи «поле — корма/продукты — человек», а также исследователями для разработки мер профилактики микотоксикозов у населения и сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы. Обзор основан на системном анализе отечественных и зарубежных публикаций за последние 10 лет, найденных в базах PubMed, Google Scholar, CyberLeninka, eLIBRARY.ru, ВОЗ и ФАО по запросам «кукуруза», «микотоксины» и «пищевая безопасность». Критериями отбора являлись высокая цитируемость и достоверность данных о токсическом воздействии фитопатогенов.

Результаты и обсуждение. Поражение кукурузы токсигенными грибами начинается в поле в период вегетации и продолжается при хранении зерна. Наиболее специфичными патогенами культуры являются микромицеты рода *Fusarium* Link (*F. graminearum* Schwabe, *F. culmorum* (Wm.G. Sm.) Sacc, *F. verticillioides* (Sacc.) Nirenberg, *F. proliferatum* (Matsush.) Nirenberg), вызывающие фузариоз початков и стеблевые гнили. В процессе жизнедеятельности эти грибы синтезируют вторичные метаболиты — фузариотоксины. С медицинской и ветеринарной точек зрения наибольшую опасность представляют три группы данных соединений: трихотецены (в частности, дезоксиниваленол), зеараленон и фумонизины [1, 2].

Наряду с фузариевыми грибами, серьезную угрозу для урожая кукурузы представляют микромицеты рода *Aspergillus* P. Micheli ex Link (преимущественно *A. flavus* Link и *A. parasiticus* Spreng). Будучи типичными «грибами хранения», в условиях повышенной температуры и влажности они активно колонизируют зерно, вырабатывая афлатоксины — опаснейшие гепатоканцерогены и мутагены [3, 4]. Кроме того, в последние годы на фоне климатических изменений отмечается рост инфицирования посевов грибами рода *Alternaria* Nees (в частности, *A. alternata* (Fr.) Keissl.). Данные полевые патогены способны вегетировать при более низких температурах и синтезировать генотоксичные «всплывающие» (*emerging*) микотоксины, ключевым из которых является альтернариол [3].

Характеристика и патогенетический потенциал микотоксинов кукурузы. Среди фузариотоксинов наибольшую опасность представляют дезоксиниваленол (ДОН), зеараленон (ЗЕН) и фумонизины. Дезоксиниваленол (вомитоксин) ингибирует синтез белка и вызывает риботоксический стресс. У животных (особенно свиней) он провоцирует рвоту и отказ от корма, а у человека приводит к поражению ЖКТ и тяжелой иммуносупрессии. Зеараленон является нестероидным микоэстрогеном и, благодаря структурному сходству с эстрадиолом, связывается с эстрогеновыми рецепторами. Это вызывает гиперэстрогенизм, бесплодие и аборт у скота, а у людей повышает риск развития гормонозависимых опухолей и преждевременного полового созревания у детей. Фумонизины (преимущественно фумонизин В1) ингибируют церамидсинтазу, нарушая биосинтез сфинголипидов и разрушая клеточные мембраны. Они обладают выраженной видовой специфичностью, вызывая смертельную лейкоэнцефаломалицию у лошадей и отек легких у свиней. Для человека Международное агентство по изучению рака (МАИР) классифицирует фумонизин В1 как потенциальный канцероген (группа 2В), ассоциированный с раком пищевода и дефектами нервной трубки плода [5,6].

Помимо специфических фузариотоксинов, серьезную угрозу представляют афлатоксины и альтернариол. Афлатоксин В1 (продукт *Aspergillus flavus* Link) является сильнейшим природным гепатоканцерогеном (Группа 1 по МАИР). Его метаболиты ковалентно связываются с ДНК, инактивируют защитный ген *TP53* и запускают развитие гепатоцеллюлярной карциномы у человека. У лактирующих животных афлатоксин трансформируется в форму М1, поступая в молоко, создавая риски для потребителей. «Всплывающий» токсин **альтернариол** (продукт *Alternaria alternata* (Fr.) Keissl) ингибирует топоизомеразы I и II типов, индуцируя разрывы ДНК. Обладая мутагенным и цитотоксическим действием, он является фактором риска, способным вызывать поражения репродуктивной системы и рак пищевода [7,8].

Таким образом, патогенетический потенциал рассматриваемых экотоксикантов не должен оцениваться изолированно. Сквозной характер трансформации рисков в рамках единой пищевой цепи наглядно отражает трехслойный сетевой граф (рис. 1). Его топология демонстрирует переход проблемы из агрономической плоскости (уровень микробиоты *Fusarium* spp., *Aspergillus* spp., *Alternaria* spp.) через стадию накопления метаболитов в непосредственные токсикологические угрозы для животных и человека. Направленность векторов подтверждает высокую вероятность сочетанного воздействия микст-загрязнений на организм, что обосновывает необходимость контроля в рамках концепции "Единого (One Health).



Рисунок 1. Схема сквозной трансформации полевой фитопатологии кукурузы в угрозу здоровью животных и человека в контексте концепции «Единого здоровья» (One Health) /
Fig. 1. Diagram of the end-to-end transformation of maize field phytopathology into a health threat for animals and humans within the context of the "One Health" concept

Методы лабораторной диагностики микотоксинов кукурузы. Выбор метода лабораторного контроля определяется конкретными практическими задачами и техническими возможностями. Для массового количественного скрининга самих токсинов (ДОН, зеараленон, афлатоксины) в товарном зерне наиболее эффективен и экономически оправдан иммуноферментный анализ (ИФА). В полевых условиях для оперативной приемки партий применяются полуколичественные экспресс-тест-полоски. В качестве арбитражных (референсных) методов для одновременного определения широкого профиля токсинов, включая альтернариол, используются высокоточные, но дорогостоящие хроматографические методы (ВЭЖХ, ХМС).

В отличие от химических методов детекции метаболитов, полимеразная цепная реакция (ПЦР) направлена на детекцию ДНК самих грибов-продуцентов. ПЦР незаменима на этапе полевого мониторинга, так как позволяет выявить скрытую зараженность посевов на латентных стадиях, задолго до начала визуального поражения початков и активного синтеза опасных микотоксинов [9, 10, 11].

Сравнительный анализ характеристик рассматриваемых методов наглядно обобщен на лепестковой диаграмме (рис. 2). Визуализация профилей демонстрирует отсутствие универсального инструмента контроля: высокая скорость и экономичность ИФА (ELISA) уравниваются точностью хроматографии и уникальным потенциалом ПЦР-диагностики в раннем выявлении фитопатогенов в полевых условиях. Это подтверждает необходимость их комплексного, комплементарного применения.

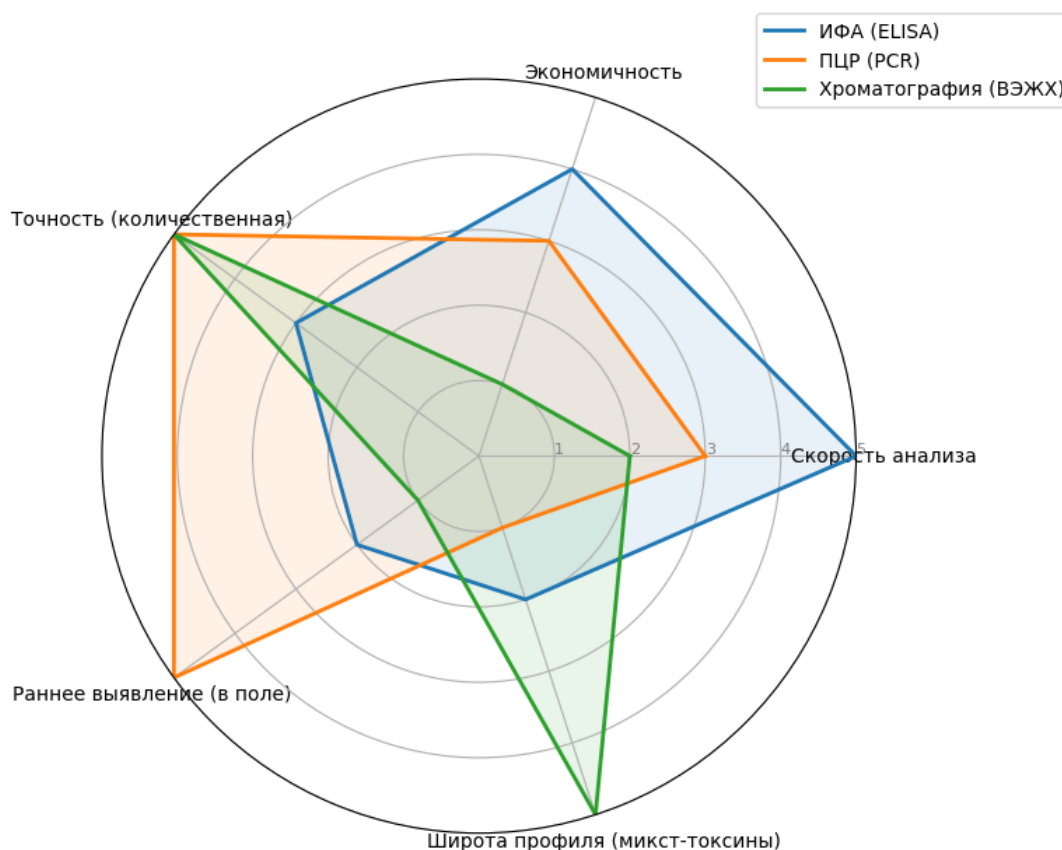


Рисунок 2. Лепестковая диаграмма сравнительного анализа аналитических и технико-экономических характеристик методов детекции микотоксинов и их продуцентов /
Fig. 2. Radar chart of the comparative analysis of analytical, technical, and economic characteristics of detection methods for mycotoxins and their producers

Заключение. Таким образом, сочетанное поражение кукурузы грибами родов *Fusarium*, *Aspergillus* и *Alternaria* представляет собой прямую угрозу продовольственной и ветеринарной безопасности. Специфические фузариотоксины (ДОН, зеараленон, фумонизины), афлатоксин В1 и альтернариол обладают выраженным иммуносупрессивным, гормональным, гепатотоксическим и канцерогенным действием на организм человека и животных. Эффективная защита пищевой цепи требует сквозного междисциплинарного контроля: применения ПЦР-анализа для раннего выявления ДНК фитопатогенов на латентной стадии в поле и методов ИФА или хроматографии для оперативного санитарно-гигиенического скрининга самих токсинов в товарном зерне.

Список источников

1. Батурин В. А., Филь А. А., Филев А. С. Микотоксины и безопасность пищи // Проблемы медицинской микологии. 2025. Т. 27. № 2. С. 90.
2. Alshannaq A., Yu J.-H. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017. Vol. 14. No. 6. Art. 632. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060632>
3. Киселева М. Г., Седова И. Б., Чалый З. А., Захарова Л. П., Аристархова Т. В., Тутельян В. А. Анализ продовольственного зерна в Российской Федерации на загрязнённость широким спектром микотоксинов (на примере урожая 2018 года) // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56. № 3. С. 559–577. <https://doi.org/10.15389/agrobiol.2021.3.559rus>
4. Седова И. Б., Захарова Л. П., Чалый З. А., Тутельян В. А. Анализ загрязнения продовольственного зерна урожая 2020 года различными микотоксинами в Российской Федерации // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2023. № 2. С. 77–85. <https://doi.org/10.14427/jipai.2023.2.77>
5. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В., Смирнов А. М. Микотоксикологическое исследование кормового зерна кукурузы (1998–2018 гг.) // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 3. С. 28–31. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019328-31>

6. Гагкаева Т. Ю., Гаврилова О. П. Фузариоз зерновых культур // Проблемы фитосанитарии. 2009. № 12. С. 13–15.
7. Munkvold G. P., Arias S., Taschl I., Gruber-Dorninger C. Mycotoxins in Corn: Occurrence, Impacts, and Management // Corn. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 235–287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00009-7>
8. Ефимочкина Н. Р., Седова И. Б., Шевелева С. А., Тутельян В. А. Токсигенные свойства микроскопических грибов // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 45. С. 6–33. <https://doi.org/10.17223/19988591/45/1>
9. Буклагин Д. С. Методы определения микотоксинов в сельскохозяйственной продукции и кормах // Техника и технология животноводства. 2020. № 4 (40). С. 57–67.
10. Weaver A. C., Weaver D. M., Adams N., Yiannikouris A. Co-Occurrence of 35 Mycotoxins: A Seven-Year Survey of Corn Grain and Corn Silage in the United States // Toxins. 2021. Vol. 13. No. 8. Art. 516. <https://doi.org/10.3390/toxins13080516>
11. Food and Agriculture Organization (FAO). Mycotoxins: A silent risk to plants, people and animals // FAO One Health Brief. Rome: FAO, 2024. URL: <https://www.fao.org/publications/one-health-briefs/mycotoxins> (дата обращения: 09.06.2026).

References

1. Baturin VA, Fil AA, Filev AS. Mycotoxins and food safety. Problems of Medical Mycology. 2025;27(2):90. (In Russ.).
2. Alshannaq A, Yu J-H. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2017;14(6):632. <https://doi.org/10.3390/ijerph14060632>
3. Kiseleva MG, Sedova IB, Chalyi ZA, Zakharova LP, Aristarkhova TV, Tutelyan VA. Multi-mycotoxin screening of food grain produced in Russia in 2018. Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya. 2021;56(3):559-577. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.3.559rus> (In Russ.).
4. Sedova IB, Zakharova LP, Chalyi ZA, Tutelyan VA. Mycotoxin screening in food grain produced in the Russian Federation in 2020. Immunopathology, Allergology, Infectology. 2023;2:77-85. <https://doi.org/10.14427/jipai.2023.2.77> (In Russ.).
5. Kononenko GP, Burkin AA, Zotova EV, Smirnov AM. Mycotoxicological study of feed corn grain (1998-2018). Russian Agricultural Sciences. 2019;3:28-31. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019328-31> (In Russ.).
6. Gagkaeva TYu, Gavrilova OP. Fusarium wilt disease of grain crops. Problems of Phytosanitation. 2009;(12):13-15. (In Russ.).
7. Munkvold GP, Arias S, Taschl I, Gruber-Dorninger C. Mycotoxins in Corn: Occurrence, Impacts, and Management. In: Corn. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2019. P. 235-287. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00009-7>
8. Efimochkina NR, Sedova IB, Sheveleva SA, Tutelyan VA. Toxigenic properties of mycotoxin-producing fungi. Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya. 2019;(45):6-33. <https://doi.org/10.17223/19988591/45/1> (In Russ.).
9. Buklagin DS. Methods for mycotoxins determining in agricultural products and feed. Machinery and Technologies in Livestock. 2020;4(40):57-67. (In Russ.).
10. Weaver AC, Weaver DM, Adams N, Yiannikouris A. Co-Occurrence of 35 Mycotoxins: A Seven-Year Survey of Corn Grain and Corn Silage in the United States. Toxins. 2021;13(8):516. <https://doi.org/10.3390/toxins13080516>
11. Food and Agriculture Organization (FAO). Mycotoxins: A silent risk to plants, people and animals. In: FAO One Health Brief. Rome: FAO, 2024. Available from: <https://www.fao.org/publications/one-health-briefs/mycotoxins> [Accessed 9 Jun 2026].

Информация об авторах

Елена Анатольевна Даниленко – старший научный сотрудник лаборатории фитопатологии, ФГБНУ «ВНИИ кукурузы», yelena.danilenko.77@mail.ru.

Вклад авторов: автором проведен анализ, подготовлена научная публикация.

Information about the authors

Elena A. Danilenko – senior researcher, laboratory of phytopathology, All-Russian Research Institute of Corn, yelena.danilenko.77@mail.ru.

Author contributions: the author performed the analysis and prepared the scientific publication.