

ISSN 1817-7204(Print)
ISSN 1817-7239(Online)

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА
AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК 633.1:632.488:632.952
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-46-58>

Поступила в редакцію 17.05.2021
Received 17.05.2021

Н. А. Крупенько¹, А. Г. Жуковский¹, А. Н. Халаев¹, Н. В. Комарава², И. М. Почицкая²

¹ *Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси, аг. Прилуки, Минская область, Беларусь*

² *Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию, Минск, Беларусь*

**ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА НАКОПЛЕНИЕ
ФУЗАРИОЗНЫХ МИКОТОКСИНОВ В ЗЕРНЕ**

Аннотация: Проблема накопления микотоксинов в зерне является одной из наиболее широко изучаемых в настоящее время, так как данные метаболиты представляют серьезную угрозу для здоровья теплокровных животных и человека. Производство микотоксинов грибами р. *Fusarium*, которые являются возбудителями фузариоза колоса, зависит от ряда факторов, а среди мер по снижению их накопления химический метод относится к числу наиболее эффективных. В статье представлены результаты исследований факторов, влияющих на накопление микотоксинов в полевых условиях. В опыте с искусственной инокуляцией колосьев озимой пшеницы грибом *F. culmorum* оценивали влияние обработки фунгицидами из класса триазолов на развитие фузариоза колоса и содержание микотоксинов. Более высокая биологическая эффективность (83,2–79,2 %) в снижении развития болезни отмечена у препарата Осирис, КЭ. Применение фунгицидов обусловило повышение показателей хозяйственной эффективности по сравнению с вариантом без обработки, в том числе урожайности на 12,3–12,8 %. В вариантах с защитой колоса содержание ДОН было в 2,0–2,1 раза ниже по сравнению с контролем. В условиях естественного поражения различных сортов зерновых культур (озимые пшеница и тритикале, яровой ячмень) фузариозом колоса отмечено депрессивное его проявление. Установлено, что яровой ячмень независимо от сорта более устойчив к накоплению микотоксинов, в частности ЗЕН. Содержание микотоксинов в зерне озимых пшеницы и тритикале варьирует в зависимости от сорта и продолжительности хранения. Полученные данные послужат основой для обоснования мероприятий по снижению накопления микотоксинов в зерне. **Благодарности.** Исследования выполнены при поддержке БРФФИ в рамках научно-исследовательского проекта «Комплексная оценка накопления микотоксинов в процессе хранения пищевых продуктов» (договор № Б19МЛДГ-009).

Ключевые слова: микотоксины, дезоксиниваленон (ДОН), зеараленон (ЗЕН), Т-2 токсин, озимая пшеница, озимое тритикале, яровой ячмень, фузариоз колоса, развитие болезни, фунгициды, биологическая эффективность

Для цитирования: Факторы, влияющие на накопление фузариозных микотоксинов в зерне / Н. А. Крупенько, А. Г. Жуковский, А. Н. Халаев, Н. В. Комарава, И. М. Почицкая // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2022. – Т. 60, № 1. – С. 46–58. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-46-58>

Natalia A. Krupenko¹, Alexander G. Zhukovsky¹, Aleksei N. Khalaev¹, Natalia V. Komarava², Irina M. Pochitskaya²

¹ *Institute of Plant Protection, the National Academy of Science of Belarus, ag. Priluki, Minsk District, Belarus*

² *Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food, Minsk, Belarus*

FACTORS AFFECTING THE LEVEL OF FUSARIUM MYCOTOXINS IN GRAIN

Abstract: Mycotoxins accumulation in grain is one of the most widely analyzed problem nowadays, as soon as these metabolites are of high danger to health of warm-blooded animals and humans. Producing mycotoxins with *Fusarium* fungi being causal agents of *Fusarium* head blight, depends on range of factors, and among measures for their accumulation decrease, chemical method is one of the most effective ones. The paper presents the results of study on factors affecting mycotoxins accumulation under the field conditions. During the experiment with artificial inoculation of winter wheat heads by *F. culmorum* fungi, the influence of triazole fungicides on *Fusarium* head blight and mycotoxins content had been estimated. Higher biological efficiency (83,2-79,2 %) for disease severity decrease was higher with fungicide Osiris, EC. Use

of fungicides led to increase in indicators of economic efficiency in comparison with the option with no treatment, including the yield, by 12.3-12.8%. In the variants with head protection, the DON content was 2.0-2.1 times lower than in the control. Under conditions of natural damage to various varieties of grain crops (winter wheat and triticale, spring barley) by *Fusarium* head blight, its depressive manifestation had been determined. It had been determined that spring barley, regardless of the variety, was more resistant to accumulation of mycotoxins, in particular ZEN. Level of mycotoxins in winter wheat and triticale grain varied depending on variety and storage duration. The data obtained will serve as the basis for substantiating measures to reduce the level of mycotoxins in grain. **Acknowledgments.** The research was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research as a part of the scientific research project "Comprehensive assessment of mycotoxins accumulation during foodstuff storage" (treaty N Б19МЛДГ-009).

Keywords: mycotoxins, deoxynivalenol (DON), zearalenone (ZEN), T-2 toxin, winter wheat, winter triticale, spring barley, *Fusarium* head blight, disease severity, fungicides, biological efficiency

For citation: Krupenko N.A., Zhukovsky A.G., Khalaev A.N., Komarava N.V., Pochitskaya I.M. Factors affecting the level of *Fusarium* mycotoxins in grain. *Vesti Natsyonal'noy akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no 1, pp. 46-58 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-46-58>

Введение. Грибы р. *Fusarium* Link – обширная и распространенная во всем мире группа организмов, многие из которых являются возбудителями болезней зерновых культур. К числу наиболее широко распространенных и вредоносных заболеваний относится фузариоз колоса [1–3]. Вредоносность болезни проявляется в снижении урожайности и варьирует в зависимости от региона, культуры, степени проявления болезни и других факторов. Установлено, что фузариоз колоса вызывают свыше 17 видов данного рода [4]. Основными возбудителями болезни во всем мире являются следующие виды: *F. avenaceum* (Fr.) Sacc., *F. culmorum* (Wm.G.Sm.) Sacc., *F. graminearum* Schwabe, *F. poae* (Peck) Wollenw. и *Microdochium nivale* (Fr.) Samuels & I.C. Hallett [5–8].

В проанализированных Т. Ю. Гагкаевой и коллегами образцах зерна с территории России было выделено 15 видов грибов р. *Fusarium*, из которых с высокой частотой встречались такие: *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* Sherb., *F. langsethiae* Torp & Nirenberg, *F. poae*, *F. cerealis* (Cooke) Sacc., *F. tricinctum* (Corda) Sacc., а также виды комплекса *Gibberella fujikuroi* (Sawada) Wollenw. [9].

В 2007 г. на севере Нечерноземья России грибами р. *Fusarium* было заражено 90,0 % проанализированных образцов зерна овса и ячменя. В структуре грибов доминировали виды *F. poae* и *F. sporotrichioides* [10].

В настоящее время в Беларуси на зерне озимой пшеницы доминируют виды *F. avenaceum* и *F. poae* [11].

Помимо прямого отрицательного влияния на урожайность зерновых культур грибы р. *Fusarium* способны синтезировать в процессе жизнедеятельности микотоксины, накопление которых в растениях не только ухудшает качество зерна, но и является опасным для теплокровных животных и человека, поскольку такие соединения обладают канцерогенным и токсичным действием [12, 13].

К основным микотоксинам, продуцируемым грибами р. *Fusarium*, относятся трихотецены В-типа (дезоксиниваленол – ДОН и ниваленол – НИВ), А-типа (Т-2 токсин, НТ-2 токсин), зearаленон (ЗЕН) и фумонизины [14, 15]. Эти микотоксины являются широко распространенными по всему миру веществами, загрязняющими зерновые культуры и продукты их переработки. Появление, количество и тип микотоксина зависит от условий окружающей среды, вида гриба, степени развития болезни, культуры, сорта. Погодные условия в период цветения культуры – ключевой фактор, влияющий на накопление микотоксинов [5, 16]. Наиболее благоприятными погодными условиями для развития фузариоза колоса являются продолжительный период (48–72 ч) высокой влажности воздуха и повышенной температуры (свыше 20 °С) [17].

Наиболее часто в зерновой продукции обнаруживается ДОН [18], который продуцируют главным образом грибы *F. graminearum* и *F. culmorum* [19]. Содержание ДОН в товарных партиях зерна зависит от количества в них фузариозных зерен. Коэффициент корреляции между этими показателями составляет 0,88–0,95 [20]. Образование ДОН происходит в зерновках уже через 24 ч после заражения грибами [21].

Меры по снижению развития фузариоза колоса и, соответственно, содержания микотоксинов в настоящее время включают возделывание устойчивых сортов, севооборот, подготовку почвы,

химический и биологический методы [22, 23]. Среди вышеперечисленных приемов химический метод является наиболее оперативным и позволяет эффективно снижать развитие фузариоза колоса. В ассортименте действующих веществ наиболее высокая эффективность в отношении болезни отмечается у тебуконазола, метконазола и протиоконазола [24–26]. Применение тебуконазола и протиоконазола обуславливает снижение не только развития фузариоза колоса, но и содержание ДОН [26]. Так, например, исследованиями М. Haidukowski и соавт. установлено, что обработка колосьев тебуконазолом способствовала снижению развития фузариоза колоса на 25–77 %, а содержание ДОН – на 32–89 % в полевых условиях [27]. Низкие нормы расхода тебуконазола или стробилуринов, являясь эффективными в ингибировании развития фузариоза колоса, в то же время могут повышать содержание ДОН в зерне [28, 29].

Установлено, что обработка триадимефоном и пропиконазолом колосьев озимой пшеницы, инокулированных грибом *F. graminearum*, обусловила снижение на 39–61 и 34–79 % развитие болезни и содержание ДОН соответственно. В то же время обработка тиабендазолом обуславливала максимальное (83 %) снижение уровня ДОН, однако влияние на проявление болезни было незначительным [30].

В послеуборочный период содержание таких микотоксинов, как ДОН и ЗЕН, может увеличиваться, если условия хранения зерна характеризуются повышенной влажностью и оптимальной температурой для роста грибов, продуцирующих микотоксины. Для предотвращения накопления микотоксинов в послеуборочный период влажность зерна должна составлять 12,0–15,5 % [31]. При хранении зерна с повышенной влажностью (свыше 16 %) происходит значительное накопление фузариотоксинов [32].

В связи с вышесказанным целью исследований являлось изучение влияния культуры, сорта, применения фунгицидов в период вегетации и сроков хранения зерна на накопление микотоксинов.

Материалы и методы исследования. Для изучения факторов, влияющих на накопление микотоксинов в зерне, проводили два опыта.

1. Влияние фунгицидов на накопление микотоксинов в зерне озимой пшеницы. Исследования проводили на опытном поле Института защиты растений Национальной академии наук Беларуси (сорт Элегия) в условиях искусственного инфекционного фона фузариоза колоса в 2019 г.

Наработка инокулюма. Для заражения растений использовали грибок *F. culmorum*. Нарработку инокулюма осуществляли в лабораторных условиях на жидкой картофельно-сахарозной среде (очищенный картофель – 200 г, дистиллированная вода – 1 л, сахара – 20 г) с использованием лабораторной качалки. Колбы со средой инокулировали мицелием гриба и культивировали в течение 5 сут при температуре 22 °С со скоростью перемешивания содержимого 160 об/мин. После этого полученную суспензию измельчали погружным блендером и с помощью камеры Горяева определяли титр спор. Инокуляцию колосьев осуществляли с использованием титра $2,0 \times 10^5$ спор/мл.

Инокуляция растений. Заражение проводили в наиболее оптимальный для инфицирования озимой пшеницы фузариозом колоса период – середина цветения (ст. 65) [33]. Растения инокулировали в вечернее время, перед этим проводили увлажнение участков из расчета 60 мл/м². Заражение осуществляли с нормой расхода суспензии 30 мл/м². Перед инокуляцией в суспензию гриба вносили несколько капель детергента Tween-80 для уменьшения поверхностного натяжения. Участки укрывали спанбондом на 12–18 ч.

Обработка фунгицидами. Обработку фунгицидами проводили на 3-е сутки после инокуляции [34, 35]. В схему исследований были включены следующие варианты:

- 1) Контроль;
- 2) Осирис, КЭ, 2,0 л/га, эпоксиконазол, 37,5 г/л + метконазол, 27,5 г/л;
- 3) Магнелло, КЭ, 1,0 л/га, дифеноконазол, 100 г/л + тебуконазол, 250 г/л.

Опрыскивание проводили с помощью ручного опрыскивателя Inter eko 1,5 из расчета 300 л рабочего раствора на 1 га. Площадь опытной делянки – 10 м², повторность – 4-кратная.

Оценка развития болезни. Учет развития фузариоза колоса осуществляли после появления первых признаков болезни, а далее – каждые 7 дней. Степень поражения болезнью определяли

на основании 5-балльной шкалы¹: 0 – отсутствие поражения; 1 – поражено до 10 % поверхности колоса; 2 – поражено 11–25 % поверхности колоса; 3 – поражено 26–50 % поверхности колоса; 4 – поражено свыше 50 % поверхности колоса.

Перевод баллов поражения в процентную категорию осуществляли на основании формулы (1)²:

$$R = \frac{\Sigma(n \times b)}{N \times K} \times 100, \quad (1)$$

где $\Sigma(n \times b)$ – сумма произведений числа больных растений (n) на соответствующий им балл поражения (b); N – общее количество учетных растений, шт.; K – наивысший балл поражения шкалы учета для перевода балльной оценки развития болезни в процентную категорию.

Биологическую эффективность (БЭ) защитных мероприятий, выраженную в процентах, рассчитывали по формуле (2)³:

$$\text{БЭ} = \frac{M_k - M_o}{M_k} \times 100, \quad (2)$$

где M_k – показатель развития болезни в контроле (защитные мероприятия не проводились); M_o – показатель развития болезни в опыте (с защитными мероприятиями).

Стадии развития растений озимой пшеницы приведены в соответствии с десятичным кодом ВВСН.

Уборка урожая. Уборку урожая зерна в полевых опытах проводили путем прямого комбайнирования и обмолота с учетной делянки комбайном Hege MDW, после чего определяли бункерный, а затем амбарный вес зерна в пересчете на стандартную 14%-ную влажность и 100%-ную чистоту. Хозяйственную эффективность рассчитывали на основе величины сохраненного урожая, полученной за счет проведения защитных мероприятий по сравнению с контролем.

Оценка инфицированности семян. Опыт проводили в лабораторных условиях на картофельно-сахарозном агаре (КСА) в чашках Петри. Анализировали среднюю пробу каждого варианта, которую готовили из 4 повторностей. Зерна поверхностно дезинфицировали в 1%-ном растворе гипохлорита натрия, дважды промывали в стерильной дистиллированной воде, после чего просушивали между слоями стерильной фильтровальной бумаги и стерильным пинцетом раскладывали на поверхность КСА с добавлением 5%-ного раствора стрептомицина (для подавления роста бактерий) и детергента Triton X-100 (для ограничения линейного роста грибов). Чашки инкубировали при температуре 22–25 °С в течение 7 дней, после чего анализировали инфицированность зерен грибами.

Зараженность семян грибом *F. culmorum* (X) в процентах вычисляли по формуле (3):

$$X = \frac{n}{N} \times 100, \quad (3)$$

где n – суммарное количество зерен, зараженных анализируемым видом гриба, шт.; N – количество зерен, взятых для анализа, шт.

2. Влияние культуры, сорта, а также продолжительности хранения зерна на накопление микотоксинов. Изучали поражаемость фузариозом сорта следующих зерновых культур: озимая пшеница – Богатка, Нутка, Элегия; озимое тритикале – Бальгико, Динамо, Динаро; яровой ячмень – Батька, Ладны, Фэст.

¹ Шипилова Н. П., Нефедова Л. И., Ивашенко В. Г. Диагностика фузариозного поражения колоса и заражения зерна на северо-западе России / Н. П. Шипилова, // Сборник методических рекомендаций по защите растений / Всерос. науч.-исслед. ин-т защиты растений ; гл. ред. К. В. Новожилов. СПб., 1998. С. 208–220.

² Болезни зерновых культур / С. Д. Здрожевская [и др.] // Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты растений ; ред. С. Ф. Буга. Несвиж, 2007. С. 61–101.

³ Болезни зерновых культур / С. Д. Здрожевская [и др.] // Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве / Науч.-практ. центр НАН Беларуси по земледелию, Ин-т защиты растений ; ред. С. Ф. Буга. Несвиж, 2007. С. 61–101.

Хранение образцов. Образцы хранили при температуре 20 ± 2 °C и влажности воздуха 30–40 %. Содержание микотоксинов определяли спустя 3, 6 и 9 месяцев хранения образцов.

Оценка накопления микотоксинов. Содержание микотоксинов в зерне определяли в Республиканском контрольно-испытательном комплексе по качеству и безопасности продуктов питания Научно-практического центра НАН Беларуси по продовольствию в 2019–2020 гг.:

1) содержание Т-2 токсина определяли методом иммуноферментного анализа (ИФА) по методике, разработанной и утвержденной в установленном порядке РУП «Белорусский государственный институт метрологии»⁴.

МВИ. МН 2479–2006 «Методика выполнения измерения Т-2 токсина с использованием тест-системы «Ридаскрин® ФАСТ Т-2 ТОКСИН» в зерновых и зернобобовых культурах и продуктах их переработки». Сущность метода заключается в конкурентном взаимодействии антигена с антителами, приводящем к образованию комплекса антиген-антитело, последующей окраской комплекса с помощью субстрата и хромогена и измерении оптической плотности полученного раствора на планшетном фотометре Biotek ELX-800, которая обратно пропорциональна количеству искомого микотоксина в исследуемом образце. Точность иммуноферментных методов анализа при доверительной вероятности $p = 0,95$ составляет ± 20 %;

2) содержание ДОН и ЗЕН определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) с применением иммуноаффинной колоночной очистки экстракта по межгосударственным стандартам:

ГОСТ EN 15891–2013 «Продукты пищевые. Определение дезоксиниваленола в продовольственном зерне, продуктах его переработки и продуктах на зерновой основе для питания грудных детей и детей раннего возраста. Для этого проводили экстракцию микотоксина из пробы водой, очистку полученного экстракта на колонке с сорбентом и количественное определение с помощью ВЭЖХ со спектрофотометрическим детектированием в ультрафиолетовой области спектра с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1260⁵;

ГОСТ EN 15850–2013 Продукты пищевые. Определение зеараленона в продуктах для детского питания на кукурузной основе, ячменной, кукурузной и пшеничной муке, поленте и продуктах на зерновой основе для питания грудных детей и детей раннего возраста. Метод ВЭЖХ заключается в применении иммуноаффинной колоночной очистки экстракта и флуориметрическом детектировании путем экстракции определяемого микотоксина водно-ацетонитрильной смесью, очистке и концентрированию экстракта на иммуноаффинной колонке, заполненной сорбентом, содержащем антитела специфичные к зеараленону и количественном определении с помощью ВЭЖХ и применением обращенно-фазовой аналитической колонки и флуориметрическим детектированием с использованием жидкостного хроматографа Agilent 1200⁶.

Статистическая обработка данных. Оценку значимости различий при анализе хозяйственной эффективности фунгицидов осуществляли с помощью однофакторного анализа с вычислением наименьшей существенной разницы (НСР) при уровне значимости $p = 0,05$.

Результаты и их обсуждение

1. Влияние фунгицидов на накопление микотоксинов в зерне озимой пшеницы. Инокуляция озимой пшеницы грибом *F. culmorum* обусловила интенсивное проявление фузариоза колоса в посевах культуры. В контроле степень поражения достигала 53,7 % к стадии поздней молоч-

⁴ Методика выполнения измерения Т-2 токсина с использованием тест-системы «Ридаскрин® ФАСТ Т-2 ТОКСИН» в зерновых и зернобобовых культурах и продуктах их переработки : МВИ. МН 2479–2006. Дата утверждения 17.05.2006. Минск : ОДО «КомПродСервис», 2006. 13 с.

⁵ Продукты пищевые. Определение дезоксиниваленола в продовольственном зерне, продуктах его переработки и продуктах на зерновой основе для питания грудных детей и детей раннего возраста. Метод ВЭЖХ с применением иммуноаффинной колоночной очистки экстракта и спектрофотометрического детектирования в ультрафиолетовой области спектра : ГОСТ EN 15891–2013. Введ. 01.03.2016. Минск : Госстандарт, 2016. 20 с.

⁶ Продукты пищевые. Определение зеараленона в продуктах для детского питания на кукурузной основе, ячменной, кукурузной и пшеничной муке, поленте и продуктах на зерновой основе для питания грудных детей и детей раннего возраста. Метод ВЭЖХ с применением иммуноаффинной колоночной очистки экстракта и флуориметрическим детектированием : ГОСТ EN 15850–2013. Введ. 01.11.2016. Минск : Госстандарт, 2016. 20 с.

ной спелости (ст. 77), тогда как с обработкой колоса фунгицидами развитие болезни было существенно ниже на протяжении всего учетного периода (табл. 1). При этом биологическая эффективность была выше при применении препарата Осирис, КЭ – 79,2–83,2 %, что обусловило также более низкую по сравнению с фунгицидом Магнелло, КЭ инфицированность зерен грибом *F. culmorum*.

Таблица 1. Влияние фунгицидов на развитие фузариоза колоса и инфицированность зерна озимой пшеницы, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси, 2019 г.

Table 1. Effect of fungicides on *Fusarium* head blight severity and contamination of winter wheat seeds, Institute of Plant Protection, National Academy of Sciences of Belarus, 2019

Вариант опыта	Фузариоз колоса				Инфицированность зерен, %
	ст. 73–75		ст. 77		
	R, %	БЭ, %	R, %	БЭ, %	
Контроль	13,0	–	53,7	–	70,0
Осирис, КЭ	2,7	79,2	9,0	83,2	43,0
Магнелло, КЭ	4,3	66,9	26,8	50,1	60,0

Примечание. R – развитие; БЭ – биологическая эффективность.

Интенсивное развитие фузариоза колоса обусловило значительное снижение урожайности в контроле по сравнению с фунгицидной защитой – на 7,9–8,2 ц/га, или 12,3–12,8 % при НСР₀₅ 3,9 ц/га (табл. 2).

Таблица 2. Влияние фунгицидов на урожайность озимой пшеницы, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси, 2019 г.

Table 2. Effect of fungicides on winter wheat yield, Institute of Plant Protection, National Academy of Sciences of Belarus, 2019

Вариант опыта	Масса 1000 зерен, г	Урожайность, ц/га	Сохраненный урожай,	
			ц/га	%
Контроль	38,4	64,0	–	–
Осирис, КЭ	41,4	72,2	8,2	12,8
Магнелло, КЭ	41,2	71,9	7,9	12,3
НСР ₀₅		3,9		

Поскольку грибок *F. culmorum* является одним из наиболее широко распространенных продуцентов опасных микотоксинов (ДОН и ЗЕН), представляло интерес изучение их содержания во всех вариантах опыта. Установлено, что массовая доля ЗЕН не превышала установленную норму, однако в варианте с обработкой фунгицидом Магнелло, КЭ значение показателя превышало таковой в контроле и в варианте с обработкой Осирис, КЭ (табл. 3). Массовая доля микотоксина ДОН превышала нормируемое значение во всех вариантах опыта, однако в варианте без обработки она была в 2,0–2,1 раза выше по сравнению с вариантами, обработанными фунгицидами. В вариантах с обработкой озимой пшеницы изучаемыми фунгицидами не отмечено различий в содержании ДОН. Это подтверждают литературные данные, согласно которым действующие вещества, входящие в состав фунгицидов Осирис, КЭ и Магнелло, КЭ, в частности, метконазол и тебуконазол, в настоящее время относятся к числу наиболее эффективных не только в снижении развития фузариоза колоса, но и накопления микотоксинов [24, 25]. Действующие вещества из класса триазолов ингибируют синтез стерола, который является существенным компонентом мембран грибов, вследствие этого нарушается их проницаемость.

Представленный уровень развития фузариоза колоса в посевах озимой пшеницы с искусственной инокуляцией существенно превосходит степень поражения болезнью в естественных условиях. В этой связи представляло интерес изучение особенностей накопления микотоксинов в зерне на естественном фоне поражения фузариозом колоса.

Таблица 3. Влияние фунгицидов на содержание микотоксинов в зерне озимой пшеницы, Научно-практический центра НАН Беларуси по продовольствию, 2019 г., мг/кг

Table 3. Effect of fungicides on mycotoxins content in winter wheat grain, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuffs, 2019, mg/kg

Вариант опыта	Массовая доля ЗЕН		Массовая доля ДОН	
	фактическая	нормируемое значение*	фактическая	нормируемое значение*
Контроль	0,0823	Не более 1,0	2,2835	Не более 0,7
Осирис, КЭ	0,0415		1,1299	
Магнелло, КЭ	0,1859		1,0865	

*Согласно Техническому регламенту Таможенного союза 015/2011.

2. Влияние культуры, сорта, а также продолжительности хранения зерна на накопление микотоксинов. Погодные условия в 2019 г. сложились неблагоприятно для поражения колоса изучаемых культур фузариозом. Так, на всех сортах озимого тритикале признаков болезни не было отмечено. Степень поражения озимой пшеницы не превышала 7,0 %, ярового ячменя – 5,0 % (табл. 4).

Результаты анализа содержания ЗЕН в образцах представлены в табл. 5. Во всех вариантах опыта не отмечено превышения содержания микотоксина. На фоне низкой степени поражения фузариозом колоса затруднительно проанализировать влияние сорта и культуры на накопление зеараленона. Тем не менее в зерне всех сортов ярового ячменя не обнаружено присутствия ЗЕН. В образцах зерна озимого тритикале сорта Бальтико массовая доля данного микотоксина была выше по сравнению с другими сортами на протяжении всего периода хранения – 6,0–21,0 мкг/кг. Из проанализированных сортов озимой пшеницы более высокие значения ЗЕН были отмечены на сорте Элегия – 5,1–18,7 мкг/кг.

ДОН относится к числу наиболее часто встречающихся микотоксинов в зерне [18]. В нашем опыте спустя 3 мес после уборки он был обнаружен во всех образцах, за исключением сорта Фэст на яровом ячмене и сорта Динаро на озимом тритикале (табл. 6). В некоторых образцах зерновых культур (ярового ячменя – сорта Батька и Ладны, озимой пшеницы – сорта Богатка и Нутка) с увеличением продолжительности хранения содержание ДОН не обнаруживалось. Это может быть связано с известным фактом снижения инфицированности зерна при продолжительном хранении (так называемое оздоровление семян).

В то же время на сортах Бальтико и Динамо озимого тритикале, а также сорте Элегия озимой пшеницы массовая доля ДОН существенно возростала спустя 6 мес после закладки на хранение. Контаминация зерна сортов озимого тритикале микотоксинами при отсутствии признаков поражения колоса фузариозом свидетельствует о бессимптомном проявлении болезни.

Таблица 4. Развитие фузариоза колоса в посевах сортов зерновых культур, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси, 2019 г., %

Table 4. *Fusarium* head blight severity on cereal crops, Institute of Plant Protection, National academy of sciences of Belarus, 2019, %

Сорт	Развитие	
	ст. 73–75	ст. 75–83
<i>Озимая пшеница</i>		
Богатка	6,0	7,0
Нутка	4,0	6,0
Элегия	3,0	6,0
<i>Яровой ячмень*</i>		
Батька	2,3	5,0
Ладны	3,3	3,3
Фэст	4,0	4,0

* Представлен комплекс болезней (фузариоз + гельминтоспориоз).

Таблица 5. Массовая доля зеараленона в зерне различных сортов зерновых культур, Научно-практический центра НАН Беларуси по продовольствию, 2019–2020 гг. мкг/кг

Table 5. Mass fraction of zearalenone in grain of different varieties of cereals, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuffs, 2019-2020, µg/kg

Сорт	Нормируемое значение*, мкг/кг	Продолжительность хранения, мес.		
		3	6	9
<i>Яровой ячмень</i>				
Батька	Не более 1000	Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
Ладны				
Фэст				
<i>Озимое тритикале</i>				
Бальтико	Не нормируется	21,0	14,7	6,0
Динамо		8,1	8,7	2,3
Динаро		7,0	5,0	1,5
<i>Озимая пшеница</i>				
Богатка	Не более 1000	5,3	9,6	1,1
Нутка		Не обнаружено	7,4	Не обнаружено
Элегия		18,7	5,7	5,1

*Согласно Техническому регламенту Таможенного союза 015/2011.

Таблица 6. Массовая доля дезоксиниваленола в зерне различных сортов зерновых культур, Научно-практический центра НАН Беларуси по продовольствию, 2019–2020 гг., мкг/кг

Table 6. Mass fraction of deoxynivalenol in grain of different varieties of cereals, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuffs, 2019-2020, µg/kg

Сорт	Нормируемое значение*, мкг/кг	Продолжительность хранения, мес.		
		3	6	9
<i>Яровой ячмень</i>				
Батька	Не более 1000	97,5	Не обнаружено	Не обнаружено
Ладны		97,2		
Фэст		Не обнаружено		
<i>Озимое тритикале</i>				
Бальтико	Не нормируется	185,6	258,4	36,5
Динамо		118,6	348,6	55,0
Динаро		Не обнаружено	Не обнаружено	Не обнаружено
<i>Озимая пшеница</i>				
Богатка	Не более 700	38,8	Не обнаружено	Не обнаружено
Нутка		149,2	Не обнаружено	Не обнаружено
Элегия		26,6	118,8	10,6

*Согласно Техническому регламенту Таможенного союза 015/2011.

Данные по содержанию Т-2 токсина представлены в табл. 7. Во всех образцах на протяжении периода исследований его массовая доля не превышала максимально допустимых значений.

Таблица 7. Массовая доля Т-2 токсина в зерне различных сортов зерновых культур, Научно-практический центра НАН Беларуси по продовольствию, 2019–2020 гг. мг/кг

Table 7. Mass fraction of T-2 toxin in grain of different varieties of cereals, Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuffs, 2019-2020, mg/kg

Культура	Сорт	Нормируемое значение*, мг/кг	Продолжительность хранения, мес.		
			3	6	9
Яровой ячмень	Батька	Не более 0,1	Менее 0,05	Менее 0,05	Менее 0,03
	Ладны				0,043
	Фэст				

Окончание табл. 7

Культура	Сорт	Нормируемое значение*, мг/кг	Продолжительность хранения, мес.		
			3	6	9
Озимое тритикале	Бальтико	Не более 0,1	Менее 0,05	Менее 0,05	0,041
	Динамо				0,032
	Динаро				Менее 0,03
Озимая пшеница	Богатка				
	Нутка				
	Элегия				

*Согласно Техническому регламенту Таможенного союза 015/2011.

Таким образом, полученные результаты позволили установить, что содержание зеараленона при хранении зерна в течение 9 мес с учетом погрешности измерения практически не меняется. Следует отметить, что яровой ячмень независимо от сорта является наиболее устойчивым к накоплению данного микотоксина. Самым устойчивым к накоплению ЗЕН является сорт озимой пшеницы Нутка – содержание ЗЕН в нем после 9 месяцев хранения не обнаружилось. Напротив, установлено, что все исследуемые сорта озимого тритикале содержат ЗЕН, причем его количество за весь период хранения не увеличивается и не превышает 2 % от нормируемого значения. Наименее устойчива к накоплению дезоксиниваленола озимое тритикале, содержание ДОН в нем после 9 месяцев хранения было 36,5–55,0 мкг/кг. Содержание Т-2 токсина в зерне исследуемых культур на протяжении всего изучаемого срока хранения составило менее 0,05 мг/кг.

Выводы

1. В опыте с искусственным заражением колоса озимой пшеницы грибом *F. culmorum* и последующим применением фунгицидов отмечена более высокая биологическая эффективность (79,2–83,2 %) препарата Осирис, КЭ в снижении развития фузариоза колоса. Применение фунгицидов обусловило повышение показателей хозяйственной эффективности по сравнению с вариантом без обработки, в том числе урожайности на 12,3–12,8 %. В вариантах с защитой колоса содержание ДОН было в 2,0–2,1 раза ниже по сравнению с контролем.

2. При естественном поражении колоса зерновых культур (озимые пшеница и тритикале, яровой ячмень) различных сортов отмечено депрессивное проявление фузариоза колоса. Установлено, что яровой ячмень независимо от сорта более устойчив к накоплению микотоксинов, в частности ЗЕН. Содержание микотоксинов в зерне озимых пшеницы и тритикале варьировало в зависимости от сорта и продолжительности хранения.

3. Полученные данные имеют фундаментальное и прикладное значение и могут быть использованы широким кругом специалистов для обоснования и разработки мероприятий по снижению накопления микотоксинов в зерне.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке БРФФИ в рамках научно-исследовательского проекта «Комплексная оценка накопления микотоксинов в процессе хранения пищевых продуктов», договор № Б19МЛДГ-009.

Список использованных источников

1. Анализ результатов мониторинга загрязнения микотоксинами продовольственного зерна урожая 2005–2016 гг. / И. Б. Седова [и др.] // Успехи мед. микологии. – 2018. – Т. 19. – С. 329–330.
2. Сезонна динаміка накопичення микотоксинів у зерні кукурудзи / О. В. Камінська [та ін.] // Біоресурси і природокористування. – 2020. – Т. 12, № 1–2. – С. 47–55. <https://doi.org/10.31548/bio2020.01.006>
3. Integrated control of Fusarium head blight and deoxynivalenol mycotoxin in wheat / L. Shah [et al.] // Plant Pathology. – 2018. – Vol. 67, N 3. – P. 532–548. <https://doi.org/10.1111/ppa.12785>
4. Parry, D. W. Fusarium ear blight (scab) in small grain cereals – a review / D. W. Parry, P. Jenkinson, L. McLeod // Plant Pathology. – 1995. – Vol. 44, N 2. – P. 207–238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02773.x>
5. Composition and predominance of Fusarium species causing Fusarium head blight in winter wheat grain depending on cultivar susceptibility and meteorological factors / T. Birr [et al.] // Microorganisms. – 2020. – Vol. 8, N 4. – Art. 617. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040617>

6. Molecular and morphological diversity of *Fusarium* species in Finland and northwestern Russia / T. Yli-Mattila [et al.] // *Europ. J. of Plant Pathology*. – 2004. – Vol. 110, N 5/6. – P. 573–585. <https://doi.org/10.1023/b:ejpp.0000032397.65710.69>
7. Wheat infecting *Fusarium* species in Poland – their chemotypes and frequencies revealed by PCR assay / L. Stepień [et al.] // *J. of Appl. Genetics*. – 2008. – Vol. 49, N 4. – P. 433–441. <https://doi.org/10.1007/bf03195644>
8. *Wolny-Kołodka, K.* Species composition and molecular assessment of the toxigenic potential in the population of *Fusarium* spp. isolated from ears of winter wheat in southern Poland / K. Wolny-Kołodka, A. Lenart-Boroń, P. Boroń // *J. of Appl. Botany a. Food Quality*. – 2015. – Vol. 88, N 1. – P. 139–144.
9. *Гагкаева, Т. Ю.* Зараженность зерна пшеницы грибами *Fusarium* и *Alternaria* на юге России в 2010 году / Т. Ю. Гагкаева, Ф. Б. Ганнибал, О. П. Гаврилова // *Защита и карантин растений*. – 2012. – № 1. – С. 37–41.
10. Зараженность грибами рода *Fusarium* и контаминация микотоксинами зерна овса и ячменя на севере Нечерноземья / О. П. Гаврилова [и др.] // *С.-х. биология*. – 2009. – Т. 44, № 6. – С. 89–93.
11. *Крупенько Н. А.* Видовой состав грибов-возбудителей фузариоза колоса озимой пшеницы / Н. А. Крупенько // *Научные стремления* – 2018 : сб. материалов Междунар. науч.-практ. молодеж. конф. в рамках Междунар. науч.-практ. инновац. форума «INMAX'18» (Минск, 4–5 дек. 2018 г.) : в 2 ч. / Центр молодеж. инноваций, Мин. гор. технопарк. – Минск, 2018. – Ч. 2. – С. 12–13.
12. Effects of zearalenone and its derivatives on the innate immune response of swine / D. E. Marin [et al.] // *Toxicon*. – 2010. – Vol. 56, N 6. – P. 956–963. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2010.06.020>
13. *Pestka, J. J.* Deoxynivalenol: mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance / J. J. Pestka // *Arch. of Toxicology*. – 2010. – Vol. 84, N 9. – P. 663–679. <https://doi.org/10.1007/s00204-010-0579-8>
14. Development and validation of a liquid chromatography/atmospheric pressure photoionization-tandem mass spectrometric method for the analysis of mycotoxins subjected to commission regulation (EC) No. 1881/2006 in cereals / A. L. Capriotti [et al.] // *J. of Chromatography A*. – 2010. – Vol. 1217, N 39. – P. 6044–6051. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.018>
15. Risk assessment of *Fusarium* mycotoxins in Lithuanian small cereal grains / A. Mankevičiene [et al.] // *Food Control*. – 2011. – Vol. 22, N 6. – P. 970–976. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.12.004>
16. *Xu, X.* Effects of environmental conditions on the development of *Fusarium* ear blight / X. Xu // *Europ. J. of Plant Pathology*. – 2003. – Vol. 109, N 7. – P. 683–689. <http://doi.org/10.1023/A:1026022223359>
17. The occurrence of *Fusarium* species and mycotoxins in Kenyan wheat / J. Muthomi [et al.] // *Crop Protection*. – 2008. – Vol. 27, N 8. – P. 1215–1219. <http://doi.org/10.1023/A:1026022223359>
18. Прогноз зараженности семян озимой пшеницы фузариозной инфекцией / В. В. Чекмарев [и др.] // *Защита и карантин растений*. – 2012. – № 1. – С. 41–43.
19. Multilocus genotyping and molecular phylogenetics resolve a novel head blight pathogen within the *Fusarium graminearum* species complex from Ethiopia / K. O'Donnell [et al.] // *Fungal Genetics a. Biology*. – 2008. – Vol. 45, N 11. – P. 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2008.09.002>
20. Мониторинг грибов рода *Fusarium* link. и их микотоксинов на зерне пшеницы в Западной Сибири / Е. Ю. Торопова [и др.] // *Агрохимия*. – 2019. – № 5. – С. 76–82. <https://doi.org/10.1134/S0002188119050119>
21. Особенности образования дезоксиниваленола и зearаленона в зерне пшеницы, пораженной фузариозом колоса / Л. С. Львова [и др.] // *Микология и фитопатология*. – 1997. – Т. 31, вып. 6. – С. 52–58.
22. Biological control as a strategy to reduce the impact of mycotoxins in peanuts, grapes and cereals in Argentina / S. N. Chulze [et al.] // *Food Additives a. Contaminants. Part A*. – 2015. – Vol. 32, N 4. – P. 471–479. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.984245>
23. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley / S. N. Wegulo [et al.] // *Crop Protection*. – 2015. – Vol. 73. – P. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
24. Effect of dose rate of azoxystrobin and metconazole on the development of *Fusarium* head blight and the accumulation of deoxynivalenol (DON) in wheat grain / S. R. Pirgozliev [et al.] // *Europ. J. of Plant Pathology*. – 2002. – Vol. 108, N 5. – P. 469–478. <https://doi.org/10.1023/A:1016010812514>
25. *Klix, M. B.* Comparison of the declining triazole sensitivity of *Gibberella zeae* and increased sensitivity achieved by advances in triazole fungicide development / M. B. Klix, J. A. Verreet, M. Beyer // *Crop Protection*. – 2007. – Vol. 26, N 4. – P. 683–690. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.06.006>
26. Efficacy of triazole-based fungicides for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol control in wheat: a multivariate meta-analysis / P. A. Paul [et al.] // *Phytopathology*. – 2008. – Vol. 98, N 8. – P. 999–1011. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-9-0999>
27. Effect of fungicides on the development of *Fusarium* head blight, yield and deoxynivalenol accumulation in wheat inoculated under field conditions with *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum* / M. Haidukowski [et al.] // *J. of the Science of Food a. Agriculture*. – 2005. – Vol. 85, N 2. – P. 191–198. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1965>
28. Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain / D. R. Simpson [et al.] // *Europ. J. of Plant Pathology*. – 2001. – Vol. 107. – P. 421–431. <https://doi.org/10.1023/A:1011225817707>
29. *Ramirez, M. L.* Impact of environmental factors and fungicides on growth and deoxynivalenol production by *Fusarium graminearum* isolates from Argentinian wheat / M. L. Ramirez, S. N. Chulze, M. Magan // *Crop Protection*. – 2004. – Vol. 23, N 2. – P. 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.07.005>
30. *Boyacioglu, D.* Effect of three systemic fungicides on deoxynivalenol (vomitoxin) production by *Fusarium graminearum* in wheat / D. Boyacioglu, N. S. Hettiarachchy, R. W. Stack // *Canad. J. of Plant Science*. – 1992. – Vol. 72, N 1. – P. 93–101.

31. Bala, B. K. Drying and storage of cereal grains / B. K. Bala. – 2nd ed. – Chichester : Wiley Blackwell, 2016. – 352 p.
32. Контаминация зерна в Западной Сибири грибами *Alternaria* и их микотоксинами / А. С. Орина [и др.] // Вест. защиты растений. – 2021. – Т. 104, № 3. – С. 153–162. <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-3-15019>
33. Буга, С. Ф. Особенности патогенеза колоса озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при инокуляции грибами *Fusarium* spp. / С. Ф. Буга, О. В. Артемова, А. Г. Ильюк // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2005. – № 4. – С. 71–76.
34. Ильюк, А. Г. Вредоносность фузариоза колоса озимой пшеницы / А. Г. Ильюк, С. Ф. Буга // Защита растений : сб. науч. тр. / Ин-т защиты растений Нац. акад. наук Беларуси. – Минск, 2006. – Вып. 30, ч. 1 : Стратегия и тактика защиты растений. – С. 227–230.
35. Effect of application timing of metconazole on Fusarium head blight development and mycotoxin contamination in wheat and barley / H. Tateishi [et al.] // J. of Pesticide Science. – 2014. – Vol. 39, N 1. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D12-077>

References

1. Sedova I. B., Kiseleva M. G., Chalyi Z. A., Aksenov I. V., Zakharova L. P., Tutel'yan V. A. Analysis of the results of monitoring the contamination of food grain with mycotoxins in 2005-2016. *Uspekhi meditsinskoi mikologii = Advances in Medical Mycology*, 2018, vol. 19, pp. 329-330 (in Russian).
2. Kaminska O. V., Marchenko T. V., Kyryk M. M., Shevchenko L. V. Seasonal dynamics of accumulation of mycotoxins in corn grain. *Bioresursi i prirodokoristuvannya = Biological Resources and Nature Management*, 2020, vol. 12, no. 1-2, pp. 47-55 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31548/bio2020.01.006>
3. Shah L., Ali A., Yahya M., Zhu Y., Wang S., Si H., Rahman H., Ma C. Integrated control of Fusarium head blight and deoxynivalenol mycotoxin in wheat. *Plant Pathology*, 2018, vol. 67, no. 3, pp. 532-548. <https://doi.org/10.1111/ppa.12785>
4. Parry D. W., Jenkinson P., McLeod L. Fusarium ear blight (scab) in small grain cereals – a review. *Plant Pathology*, 1995, vol. 44, no. 2, pp. 207-238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02773.x>
5. Birr T., Hasler M., Verreet J. A., Klink H. Composition and predominance of Fusarium species causing Fusarium head blight in winter wheat grain depending on cultivar susceptibility and meteorological factors. *Microorganisms*, 2020, vol. 8, no. 4, art. 617. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8040617>
6. Yli-Mattila T., Paavanen-Huhtala S., Parikka P., Konstantinova P., Gagkaeva T. Y. Molecular and morphological diversity of Fusarium species in Finland and northwestern Russia. *European Journal of Plant Pathology*, 2004, vol. 110, no. 5/6, pp. 573-585. <https://doi.org/10.1023/b:ejpp.0000032397.65710.69>
7. Stepień Ł., Popiel D., Koczyk G., Chełkowski J. Wheat infecting Fusarium species in Poland – their chemotypes and frequencies revealed by PCR assay. *Journal of Applied Genetics*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 433-441. <https://doi.org/10.1007/bf03195644>
8. Wolny-Koładka K., Lenart-Boroń A., Boroń r. Species composition and molecular assessment of the toxigenic potential in the population of Fusarium spp. isolated from ears of winter wheat in southern Poland. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2015, vol. 88, no. 1, pp. 139-144.
9. Gagkaeva T. Yu., Gannibal F. B., Gavrilova O. P. Infestation of wheat grain with Fusarium и Alternaria fungi in the south of Russia in 2010. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine*, 2012, no. 1, pp. 37-41 (in Russian).
10. Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Yu., Burkin A. A., Kononenko G. P. Mycological infection by Fusarium strains and mycotoxins contamination of oats and barley in the north of Nonchernozem'e. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2009, vol. 44, no. 6, pp. 89-93 (in Russian).
11. Krupen'ko N. A. Species composition of fungi-causative agents of fusarium ear of winter wheat. *Nauchnye stremleniya - 2018: sbornik materialov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi molodezhnoi konferentsii v ramkakh Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo innovatsionnogo foruma «INMAX'18» (Minsk, 4-5 dekabrya 2018 g.)* [Scientific aspirations - 2018: collection of papers of the International scientific and practical youth conference within the framework of the International scientific and practical innovation forum “INMAX'18” (Minsk, December 4-5, 2018)]. Minsk, 2018, pt. 2, pp. 12-13 (in Russian).
12. Marin D. E., Taranu I., Burlacu R., Tudor D. S. Effects of zearalenone and its derivatives on the innate immune response of swine. *Toxicon*, 2010, vol. 56, no. 6, pp. 956-963. <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2010.06.020>
13. Pestka J. J. Deoxynivalenol: mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance. *Archives of Toxicology*, 2010, vol. 84, no. 9, pp. 663-679. <https://doi.org/10.1007/s00204-010-0579-8>
14. Capriotti A. L., Foglia P., Gubbiotti R., Rocca C., Samperi R., Laganà A. Development and validation of a liquid chromatography/atmospheric pressure photoionization-tandem mass spectrometric method for the analysis of mycotoxins subjected to commission regulation (EC) No. 1881/2006 in cereals. *Journal of Chromatography A*, 2010, vol. 1217, no. 39, pp. 6044-6051. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2010.07.018>
15. Mankevičienė A., Butkutė B., Gaurilčikienė I., Dabkevičius Z., Supronienė S. Risk assessment of Fusarium mycotoxins in Lithuanian small cereal grains. *Food Control*, 2011, vol. 22, no. 6, pp. 970-976. <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.12.004>
16. Xu X. Effects of environmental conditions on the development of Fusarium ear blight. *European Journal of Plant Pathology*, 2003, vol. 109, no. 7, pp. 683-689. <http://doi.org/10.1023/A:1026022223359>

17. Muthomi J. W., Ndung'u J. K., Gathumbi J. K., Mutitu E. W., Wagacha J. M. The occurrence of *Fusarium* species and mycotoxins in Kenyan wheat. *Crop Protection*, 2008, vol. 27, no. 8, pp. 1215-1219. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.03.001>
18. Chekmaryev V. V., Kobyl'skaya G. V., Buchneva G. N., Korabel'skaya O. I. Forecasting the *Fusarium* blight infections of winter wheat seeds. *Zashchita i karantin rastenii = Plant Protection and Quarantine*, 2012, no. 1, pp. 41-43 (in Russian).
19. O'Donnell K., Ward T. J., Aberra D., Kistler H. C., Aoki T., Orwig N., Kimura M., Bjørnstad Å., Klemsdal S. S. Multilocus genotyping and molecular phylogenetics resolve a novel head blight pathogen within the *Fusarium graminearum* species complex from Ethiopia. *Fungal Genetics and Biology*, 2008, vol. 45, no. 11, pp. 1514-1522. <https://doi.org/10.1016/j.fgb.2008.09.002>
20. Toropova E. Yu., Vorob'eva I. G., Mustafina M. A., Selyuk M. P. *Fusarium* link. Fungi on the wheat grains in Western Siberia. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 2019, no. 5, pp. 76-82 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0002188119050119>
21. L'vova L. S., Kizlinko O. I., Shulgina A. P., Omelchenko M. D., Zakharova L. P., Piminova V. V., Gagkaeva T. Yu. Peculiarities of deoxynivalenol and zearalenon synthesis in wheat grain infected by fusariosis of spike. *Mikologiya i fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*, 1997, vol. 31, iss. 6, pp. 52-58 (in Russian).
22. Chulze S. N., Palazzini J. M., Torres A. M., Barros G., Ponsone M. L., Geisen R., Schmidt-Heydt M., Köhl J. Biological control as a strategy to reduce the impact of mycotoxins in peanuts, grapes and cereals in Argentina. *Food Additives and Contaminants. Part A*, 2015, vol. 32, no. 4, pp. 471-479. <https://doi.org/10.1080/19440049.2014.984245>
23. Wegulo S. N., Baenziger P. S., Nopsa J. H., Bockus W. W., Hallen-Adams H. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Protection*, 2015, vol. 73, pp. 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
24. Pirgozliev S. R., Edwards S. G., Hare M. C., Jenkinson P. Effect of dose rate of azoxystrobin and metconazole on the development of *Fusarium* head blight and the accumulation of deoxynivalenol (DON) in wheat grain. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, vol. 108, no. 5, pp. 469-478. <https://doi.org/10.1023/A:1016010812514>
25. Klix M. B., Verreet J.-A., Beyer M. Comparison of the declining triazole sensitivity of *Gibberella zeae* and increased sensitivity achieved by advances in triazole fungicide development. *Crop Protection*, 2007, vol. 26, no. 4, pp. 683-690. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.06.006>
26. Paul P. A., Lipps P. E., Hershman D. E., McMullen M. P., Draper M. A., Madden L. V. Efficacy of triazole-based fungicides for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol control in wheat: a multivariate meta-analysis. *Phytopathology*, 2008, vol. 98, no. 9, pp. 999-1011. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-98-9-0999>
27. Haidukowski M., Pascale M., Perrone G., Pancaldi D., Campagna C., Visconti A. Effect of fungicides on the development of *Fusarium* head blight, yield and deoxynivalenol accumulation in wheat inoculated under field conditions with *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, vol. 85, no. 2, pp. 191-198. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1965>
28. Simpson D. R., Weston G. E., Turner J. A., Jennings P., Nicholson P. Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. *European Journal of Plant Pathology*, 2001, vol. 107, pp. 421-431. <https://doi.org/10.1023/A:1011225817707>
29. Ramirez M. L., Chulze S. N., Magan M. Impact of environmental factors and fungicides on growth and deoxynivalenol production by *Fusarium graminearum* isolates from Argentinian wheat. *Crop Protection*, 2004, vol. 23, no. 2, pp. 117-125. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2003.07.005>
30. Boyacioglu D., Hettiarachchy N. S., Stack R. W. Effect of three systemic fungicides on deoxynivalenol (vomitoxin) production by *Fusarium graminearum* in wheat. *Canadian Journal of Plant Science*, 1992, vol. 72, no. 1, pp. 93-101.
31. Bala B. K. *Drying and storage of cereal grains*. 2nd ed. Chichester, Wiley Blackwell, 2016. 352 p.
32. Orina A. S., Gavrilova O. P., Gagkaeva T. Y., Gogina N. N. Contamination of grain in West Siberia by *Alternaria* fungi and their mycotoxins. *Vestnik zashchity rastenii = Plant Protection News*, 2021, vol. 104, no. 3, pp. 153-162 (in Russian). <https://doi.org/10.31993/2308-6459-2021-104-3-15019>
33. Buga S. F., Artiomova O. V., Iliuk A. G. Pathogenesis peculiarities of winter wheat (*Triticum aestivum* Z.) ear at inoculation of *Fusarium* spp. Fungi. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2005, no. 4, pp. 71-76 (in Russian).
34. Il'yuk A. G., Buga S. F. The harmfulness of *Fusarium* spike of winter wheat. *Zashchita rastenii: sbornik nauchnykh trudov = Plant protection: collection of scientific papers*. Minsk, 2006, iss. 30, pt. 1, pp. 227-230 (in Russian).
35. Tateishi H., Miyake T., Mori M., Sakuma Y., Saishoji T. Effect of application timing of metconazole on *Fusarium* head blight development and mycotoxin contamination in wheat and barley. *Journal of Pesticide Science*, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1584/jpestics.D12-077>

Информация об авторах

Крупенько Наталья Александровна – кандидат биологических наук, доцент, зав. лабораторией фитопатологии, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси (ул. Мира, 2, 223011, аг. Прилуки, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: krupenko_natalya@mail.ru; <http://orcid.org/0000-0002-0015-4945>

Information about the authors

Natalia A. Krupenko - Ph.D. (Biological), Assistant Professor. Institute of Plant Protection, the National Academy of Sciences of Belarus (2, Mira Str., ag. Priluki 223011, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: krupenko_natalya@mail.ru

Alexander G. Zhukovsky - Ph.D. (Agriculture), Assistant Professor. Institute of Plant Protection, the National Academy

Жуковский Александр Геннадьевич – кандидат с.-х. наук, доцент, зам. директора по науке, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси (ул. Мира, 2, 223011, аг. Прилуки, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: zhukow_a@mail.ru ; <http://orcid.org/0000-0002-4788-9308>

Халаев Алексей Николаевич – научный сотрудник лаборатории фитопатологии, Институт защиты растений, Национальная академия наук Беларуси (ул. Мира, 2, 223011, аг. Прилуки, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: halexi@live.ru ; <http://orcid.org/0000-0003-2551-4422>

Комарова Наталья Викторовна – кандидат технических наук, начальник Республиканского контрольно-испытательного комплекса по качеству и безопасности продуктов питания РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: rkik-npc@mail.ru ; <http://orcid.org/0000-0002-82810-7975>

Почицкая Ирина Михайловна – кандидат с.-х. наук, ведущий научный сотрудник группы научных исследований Республиканского контрольно-испытательного комплекса по качеству и безопасности продуктов питания РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pochitskaja@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5347-6676>

of Sciences of Belarus (2, Mira Str., ag. Priluki 223011, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: zhukow_a@mail.ru

Aleksei N. Khalaev - Institute of Plant Protection, the National Academy of Sciences of Belarus (Mira Str., 2, ag. Priluki 223011, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: halexi@live.ru

Natalia V. Komarova - Ph.D. (Technology). Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food” (29, Kozlova Str., Minsk 220037, Republic of Belarus). E-mail: aleko-2006@tut.by

Irina M. Pochitskaya - Ph.D. (Agriculture). Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Food (29, Kozlova Str., Minsk 220037, Republic of Belarus). E-mail: pochitskaja@yandex.ru