

ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ МИКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА КОРМА ДЛЯ ЖИВОТНОВОДСТВА

© Фалалеева Д.Е.,
Платонов А.В., Рассохина И.И.



Дарья Евгеньевна Фалалеева

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация
e-mail: dariyafalaleeva@yandex.ru
ORCID: 0009-0000-8444-1273



Андрей Викторович Платонов

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация
e-mail: platonov70@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-1110-7116 ResearcherID: E-9310-2019



Ирина Игоревна Рассохина

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация
e-mail: rasskhinairina@mail.ru
ORCID: 0000-0002-6129-6912 ResearcherID: C-8173-2019

Широта проблемы поражения микотоксинами кормов растительного происхождения для сельскохозяйственных животных сегодня становится все более очевидной. Данные ООН демонстрируют, что до 30% мирового урожая поражено токсическими метаболитами, при этом в России проблема затрагивает около 80% зерна. В Вологодской области проблема стоит не менее остро: анализ образцов корма для крупного рогатого скота показал, что практически все они были поражены афлатоксинами и зеараленоном, 97% – ократоксином-А, менее трети образцов – ДОН. Угроза распространения микромицетов и их метаболитов очевидна для успешного развития агропромышленного комплекса, получения качественной продукции молочного и мясного животноводства, сохранения здоровья населения. Цель исследования – провести анализ отечественной и зарубежной литературы и выявить основные способы снижения уровня микотоксикологической нагрузки на корма для животноводства. На основании результатов исследований отечественных и зарубежных авторов в рамках обзора выделены следующие основные механизмы снижения содержания микотоксинов в кормах: трансформация (преобразование) токсинов в менее опасные вещества и снижение биодоступности токсинов с помощью различных сорбентов. Кроме того, определены следующие методы борьбы

с микотоксикологической нагрузкой: физические (излучение, механическое или термическое действия); химические (обработка веществами, вступающими в химические реакции с микотоксинами); биологические (обработка живыми бактериальными культурами, ферментными препаратами); сорбционные (использование разнообразных связывающих неорганических и органических агентов). Результаты проведенного обзора позволяют говорить об отсутствии единых радикальных способов снижения уровня микотоксинов в животноводческих кормах и пищевых продуктах. Необходимо разрабатывать комплексный инструментарий, сочетающий профилактические меры для животных, а также методы детоксикации и постоянный мониторинг кормов. Лишь комплексный подход может позволить минимизировать риск возникновения микотоксикозов, при этом сохранив здоровье животных и снизив финансовые издержки хозяйств.

Микотоксины, грибы-продуценты, фунгициды, бактерии, адсорбенты, ферментативно-пробиотические препараты.

Микотоксины представляют собой вторичные метаболиты микроскопических плесневых грибов. Современные исследования идентифицировали свыше 300 химических структур, относящихся к этому классу, причем количество грибов-продуцентов охватывает более 350 таксономических единиц (включая 10 000 лабораторных штаммов). Наибольшую эпидемиологическую значимость в глобальном масштабе имеют шесть основных групп: канцерогенные афлатоксины, нейротоксичный Т-2, эстрогенный зеараленон, нефропатогенный охратоксин-А, а также повсеместно распространенные фумонизины и дезоксиниваленол (известный как ДОН-токсин)¹ (Marín et al., 2013).

Известно, что микотоксины обладают сильной нефро- и гепатотоксичностью, вызывают иммунодефицитные состояния, тем самым представляют серьезную угрозу для жизни и здоровья животных и человека. Кроме того, данные метаболиты ухудшают использование протеина и минеральных веществ кормов, тормозят синтез белков, вызывают структурные нарушения в органах и тканях, а также отравления различной степени (Battilani et al., 2021). Поступление токси-

нов в организм животных даже в малых недиагностируемых количествах существенно снижает качество и количество сельскохозяйственной продукции. На сегодня 132 страны в мире серьезно относятся к проблеме поражения кормов микотоксинами и ведут контроль качества кормов для сельскохозяйственных животных и продуктов питания (Grenier et al., 2014; Gruber-Dorninger et al., 2019).

Микотоксикозы – серьезная проблема современного животноводства (Хон, Эсмагамбетов, 2014). Широта проблемы поражения микотоксинами кормов растительного происхождения для сельскохозяйственных животных сегодня становится все более очевидной. Данные ООН демонстрируют, что до 30% мирового урожая поражено токсическими метаболитами, при этом в России проблема затрагивает около 80% зерна (Aravind et al., 2004; Салливан, 2005; Попова и др., 2017). Такая высокая пораженность кормов растительного происхождения и пищевых продуктов токсинами согласуется и с результатами по оценке в них микроскопических грибов (их доля достигает 80–100%). Кроме того, превышение допустимых концентраций отмечается в 21% анализируе-

¹ Food and Agriculture Organization (FAO). (2018). Worldwide regulations for mycotoxins in food and feed in 2003. FAO Food and Nutrition Paper, 10, 1–78. URL: <http://www.fao.org/3/y5499e/y5499e00.htm>

мых случаев, что наносит существенный ущерб экономике России (Папазян, 2002).

Собственные результаты исследований уровня контаминации микотоксинами кормов, заготавливаемых сельхозпредприятиями Вологодской области, также демонстрируют крайне существенную проблему: все анализируемые образцы были заражены афлатоксинами и зеараленоном, 97% – охратоксином-А, менее трети образцов – ДОН. При этом значительная часть кормов одновременно была подвержена контаминации сразу двумя и более типами токсинов (Платонов и др., 2024).

Таким образом, угроза распространения микромицетов и их метаболитов очевидна для успешного развития АПК, получения качественной продукции молочного и мясного животноводства, сохранения здоровья населения. В связи с этим особую актуальность приобретает поиск путей снижения уровня контаминации кормов микотоксинами.

Цель исследования – провести анализ отечественной и зарубежной литературы и выявить основные способы снижения уровня микотоксикологической нагрузки на корма для животноводства.

Задачи:

– рассмотреть многообразие методов снижения уровня контаминации кормов микотоксинами;

– классифицировать существующие методы.

Современные стратегии детоксикации кормов включают гетерогенный комплекс методов – от использования органических адсорбентов растительного происхождения (травяные гранулы с высоким содержанием целлюлозных волокон) до применения инновационных комплексных препаратов с полимодальным механизмом действия. Первые реализуют физическую сорбцию за счет высокой удельной поверхности (до 450 м²/г), тогда как

вторые обеспечивают биотрансформацию токсинов через ферментативную деградацию и молекулярную инактивацию (Zhao et al., 2020; Loi et al., 2021). Анализ литературы позволяет выделить два основных механизма снижения содержания микотоксинов в кормах:

– трансформация (преобразование) токсинов в менее опасные вещества;

– снижение биодоступности токсинов с помощью различных сорбентов.

Среди методов целесообразно выделить следующие (Poppenberger et al., 2003; Kabak et al., 2006; Jouany, 2007; Jard et al., 2011; Попова, 2017; Alberts et al., 2017; Luo et al., 2018; Peng et al., 2018):

– физические (излучение, механическое или термическое действие);

– химические (обработка веществами, вступающими в химические реакции с микотоксинами);

– биологические (обработка живыми бактериальными культурами, ферментными препаратами);

– сорбционные (использование разнообразных связывающих неорганических и органических агентов).

Физические методы. Среди физико-термических технологий детоксикации кормового сырья особое место занимает микроволновая обработка (диапазон 2.45 ГГц), основанная на сочетанном воздействии электромагнитного излучения неионизирующего типа и объемного диэлектрического нагрева. Реализация метода осуществляется посредством резонансных камер или туннельных излучателей СВЧ-типа, генерирующих переменное поле частотой 915–2450 МГц. Данный метод безопасен и обладает рядом преимуществ по сравнению с обычным температурным нагревом: КПД преобразования электрической энергии в тепловую достигает 90% за счет прямого поглощения СВЧ-квантов полярными молекулами воды; отсутствие тепловой инерции

позволяет мгновенно регулировать режимы обработки; возможность локального воздействия на зоны с максимальной влажностью (очаги микробиологической контаминации); а также одновременная инактивация микробной биоты и грибковых токсинов за счет термомеханической дегградации их макромолекул. В отличие от конвекционного нагрева СВЧ-технология обеспечивает 3–4-кратное сокращение энергозатрат при равномерной деструкции токсикантов по всему объему продукта (Юсупова, Юсупов, 2012; Семенов и др., 2017).

Однако существует мнение, что микроволновое СВЧ-излучение малоэффективно в отношении снижения содержания микотоксинов. Так, в работе (Numanoglu et al., 2012) показано, что содержание ДОН после СВЧ-обработки при температуре 175 °С снижается лишь на 40%. Сходные результаты получены Г.Г. Юсуповой (Юсупова, 2003), Т.А. Толмачевой (Толмачева, 2013), О.М. Соболевой с соавт. (Соболева и др., 2019). Так, действие СВЧ-излучения мощностью 600 Вт и продолжительностью 90 с лишь частично разрушило афлатоксины В1 и В2 в зерне пшеницы, на 23% снизило содержание охратоксина-А в комбикорме, на 39% – Т-2 токсина в комбикорме и на 24% – Т-2 токсина в зерне пшеницы. Результаты российских и зарубежных ученых позволяют говорить о недостаточной эффективности СВЧ-излучения в отношении снижения уровня контаминации кормов микотоксинами (Юсупова, 2003; Numanoglu et al., 2012; Толмачева, 2013; Vearasilp et al., 2015; Shanakhat et al., 2018; Соболева и др., 2019).

Детоксикация кормовых субстратов под действием электромагнитного излучения реализуется через два ключевых механизма: термическую денатурацию токсичных соединений и радиолитическое расщепление. Интенсификация дан-

ных процессов прямо коррелирует с экспозицией (временем обработки) и плотностью энергии излучения (Вт/см²), что подтверждается экспериментальными данными (Herzallah et al., 2008). Показано, что при кратковременном действии на корма неионизирующего излучения афлатоксины разрушаются в меньшей степени, чем при воздействии гамма-излучением. При этом длительное воздействие (3–30 часов) солнечных лучей на корм привело к дегградации до 75% токсинов, а краткосрочное действие гамма-излучения – лишь на 37%, СВЧ-излучения – на 33% (Herzallah et al., 2008; Peng et al., 2018). Радиолит органических субстратов при обработке ионизирующим излучением индуцирует образование реактивных кислородных частиц, запускающих цепные реакции окислительной деструкции токсичных соединений (He et al., 2010). Ключевым фактором, модулирующим этот процесс, является массовая доля воды в матрице. Экспериментальные данные демонстрируют, что при влажности зернового сырья <12% даже сверхвысокие дозы гамма-излучения (до 50 кГр) не обеспечивают детоксикацию ДОН. Однако увеличение гигроскопичности субстрата до 25–30% позволяет достичь 98% редукции ДОН уже при дозе 5 кГр за счет синергии радиолитического окисления токсина (O'Neill et al., 1993; Stepanik et al., 2007; He, 2010).

Нагревание кормов – широко известный физический метод борьбы с содержанием токсинов. Эффективность термодеструкции микотоксинов, продемонстрированная в работе (Yumbe-Guevara et al., 2003), определяется триадой параметров: температурным режимом, экспозицией и гранулометрией сырья. Кинетика разрушения токсикантов имеет прямую зависимость от интенсификации термического воздействия. Экспериментальные

данные выявили нелинейный характер деградации: в диапазоне 140–180 °С скорость пиролитического распада ДОН, зеараленона и ниваленола не превышала 12 %/мин., тогда как при 200–220 °С наблюдалась экспоненциальная активация термоокислительных процессов с пиковой скоростью 58 %/мин. Критическим фактором оказалась дисперсность субстрата: измельчение зерновой матрицы до фракции <0,5 мм увеличивало удельную поверхность, обеспечивая полную деструкцию токсинов (100%) за 50 мин. В интактных зернах ячменя аналогичная обработка давала лишь 50% редукцию за счет ограниченной теплопроводности перикарпия (Yumbe-Guevara et al., 2003). Однако гипертермия (>200 °С) индуцирует нежелательные изменения: дегидратация с потерей водорастворимых нутриентов (витамины группы В); карбонизация целлюлозно-лигнинового комплекса; формирование меланоидинов, снижающих биодоступность протеинов. Как следствие, оптимизация параметров требует баланса между детоксикацией и сохранением питательной ценности кормов.

Технология паровой конверсии при сверхвысоких температурах нашла широкое применение в пищевой промышленности и производстве комбикормов. Экспериментальные работы (Pronyk et al., 2006) выявили корреляцию между параметрами паротермической обработки (110–185 °С) и редукцией ДОН в зерновом субстрате. Помимо температурно-временных характеристик, критическим фактором эффективности оказалась кинетика парового потока: максимальная деструкция ДОН (50%) достигалась при скорости струи 1,3 м/с, экспозиции 360 секунд и пиковой температуре 185 °С за счет синергии термогидролиза и кавитационного разрушения токсичных молекул. Возможность применения перегретого пара в отношении ДОН была показана и в исследова-

ниях (Liu et al., 2019), однако отсутствие данных о воздействии на афлатоксины, охратоксин-А и зеараленон указывает на ограниченную универсальность технологии (Pronyk et al., 2006; Liu et al., 2019).

Перспективным инновационным подходом к детоксикации сельхозсырья является применение низкотемпературной плазмы (НТП) – частично ионизированного газа (Ar, O₂, N₂), генерируемого в высоковольтных разрядах (5–30 кВ) при термодинамическом неравновесии (температура среды 20–40 °С). Результаты единичных на сегодняшний день исследований показали, что НТП эффективна для разрушения микотоксинов, в частности зеараленона и ДОН. Так, в работе (Ten Bosch et al., 2017) выявлена деградация многих микотоксинов, в том числе зеараленона, ДОН, фумонизина В1, Т-2 токсина при воздействии на сырье холодной плазмой на основе воздуха при атмосферном давлении. Полное разрушение спор *Aspergillus niger* и продуцируемых ими микотоксинов (афлатоксин В1) при обработке плодов пальмы холодной плазмой на основе аргона под давлением вдвое больше атмосферного в течение 9 мин отмечено в работе (Ouf et al., 2015), а деструкция афлатоксина В1 на 95–96% в арахисе под действием холодной воздушной плазмы показана (Devi et al., 2017). Аналогичное полное разрушение токсинов, продуцируемых грибами *Alternaria*, было получено (Wang et al., 2020) при обработке сырья холодной плазмой на основе воздуха в течение 5 мин. Таким образом, применение холодной плазмы является перспективным путем снижения содержания микотоксинов в сырье, однако в настоящее время результатов для однозначных выводов недостаточно (Ouf et al., 2015; Devi et al., 2017; Shanakhat et al., 2018; Wang et al., 2020).

Водная флотация способна снизить содержание микотоксинов в зерне. Так,

показано, что данный метод снижает содержание ДОН в зерне пшеницы на 23% (Visconti et al., 2004), а эффект в отношении зерна кукурузы достигает 27–70% в зависимости от типа токсина (Matumba et al., 2015). При этом простое замачивание и/или промывка зерна водой малоэффективны для удаления микотоксинов, содержание токсинов снижается лишь на 10–20%. Отмечается, что вода лишь частично смывает микромицеты и микотоксины с поверхности зерна (Visconti et al., 2004; Matumba et al., 2015; Peng et al., 2018).

Сортировка сырья – труднореализуемый в масштабах производства путь. Однако, результаты исследования по применению технологии ручной сортировки в отношении зерна кукурузы по цвету показали эффективность и принципиальную возможность такого метода для снижения содержания фумонизина В1 (Van der Westhuizen et al., 2011). Более экономически выгодной для промышленного применения уже в ближайшем будущем видится оптическая сепарация (Peng et al., 2018).

Гранулометрическая обработка зерна с последующей аспирационной сепарацией периферийных фракций демонстрирует потенциал для редукиции контаминантов, преимущественно ДОН. Однако технологическая применимость метода ограничена пищевым сектором, где допустимо удаление 12–15% массы сырья. В комбикормовом производстве подобная обработка экономически нецелесообразна из-за повышения себестоимости на 18–22% (логистика отходов, энергозатраты); деградации питательной ценности за счет потери клетчатки (до 40%) и липидного комплекса (Rios et al., 2009; Tibola et al., 2015). Так, сепарация 25% алейронового слоя пшеницы снижает уровень ДОН на 78% (Rios et al., 2009), а частичное удаление отрубей (8–12%) обеспечивает редукицию

10–42% токсинов в зависимости от гранулометрии помола. При этом наблюдается кумуляция контаминантов в периферийных слоях зерна: концентрация микотоксинов в отходах сепарации превышает исходные показатели в 1,8–2,3 раза за счет адсорбции на гидрофобных структурах эндосперма (Tibola et al., 2015).

Химические методы. Помимо снижения уровня содержания токсинов в сырье возможна предварительная борьба в полевых условиях с заражениями посевов токсинообразующими грибами. Для борьбы преимущественно используются химические фунгициды. Однако современные данные свидетельствуют, что защита растений против фузариевых грибов эффективна только в случае тотального фунгицидного эффекта препаратов по отношению к грибам рода *Fusarium*, т. е. их полного уничтожения (D’Mello et al., 1998).

Современные фитопатологические исследования выявили парадоксальный эффект: применение сублетальных доз фунгицидов (регламентированных при слабой контаминации семян) и индукторов системной резистентности растений может потенцировать биосинтез фузариотоксинов. Данный феномен обусловлен активацией оксидативного стресса, при котором H_2O_2 выполняет сигнальную функцию, стимулируя экспрессию генов *Tri5* и *Tri6*, ответственных за синтез ДОН. Так, исследователями показано, что сублетальные дозы фунгицидов «Проциоконазол», «Азоксистробин», а также комбинации «Проциоконазола» и «Флуоксастробина» индуцировали продукцию ДОН штаммом *F. graminearum* в лабораторных условиях через 48 ч после обработки (Audenaert et al., 2010). Аналогичный результат был получен в полевых условиях при обработке растений пшеницы низкими концентрациями данных фунгицидов (Сергеев и др., 1999; Audenaert et al., 2010).

При этом, как отмечают специалисты Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (ФАО), при использовании пестицидов в высоких концентрациях их остатки обнаруживаются почти в 40% используемых в пищу продуктов (Maksimov et al., 2011), что также снижает качество производимой продукции.

Биологические методы. Биологические методы снижения уровня микотоксинов включают применение трех типов препаратов: вносимые при кормлении животных, при кормозаготовке и под сева.

В кормлении животных снижение уровня токсикации возможно путем применения ферментных препаратов и пробиотических микроорганизмов. Основной механизм – ингибирование развития грибов-продуцентов в желудочно-кишечном тракте животных, в т. ч. путем синтеза ферментов (Massoud, Zoghi, 2022). Учитывая низкую стабильность ферментов при хранении, а также быструю инактивацию в кишечнике животных, наиболее эффективно и экономически целесообразно применять пробиотические препараты (De Oliveira et al., 2021).

Мировой ассортимент пробиотиков для биотрансформации микотоксинов весьма ограничен, на отечественном рынке известны, например, «Моноспорин» и «Бацелл» (ООО «Биотехагро», Краснодарский край), основа которых – спорообразующие бактерии *Bacillus subtilis* (Шкуратова и др., 2019). О возможности использования в рационе животных препарата «Энтероспорин» в количестве 10 мл/день говорится в работе Т.А. Шамиловой с соавторами. Данный препарат способен снизить выраженность афлатоксикоза, а также улучшить общее клиническое состояние животных (Шамилова и др., 2012). Кроме того, имеются данные о снижении влияния афлатоксинов и Т-2 токсина на морфобиохимические показате-

ли поросят и телят при совместном применении пробиотиков «Энтероспорин», «Спас» (основа – *Lactobacillus plantatum*) и сорбента «Фитосорб». Вероятно, именно бактерии *L. plantatum*, обладая высокой антагонистической активностью к широкому спектру патогенных и условно-патогенных микоорганизмов, нормализуют деятельность желудочно-кишечного тракта, улучшают усвоение корма, стимулируют обменные процессы (Коростелева и др., 2016).

Не менее эффективным в отношении снижения эффекта от действия микотоксинов оказался комплексный пробиотический препарат «Профорт» (основа два штамма *Bacillus megaterium* и *Enterococcus faecium*). Исследования Е.А. Йылдырым и соавторов показали, что бактерии *E. faecium* обладают крайне высоким потенциалом в биодеградации токсичных соединений (Йылдырым и др., 2019).

Помимо ферментативно-пробиотических препаратов возможно применение в рационах животных кормовых добавок, в состав которых входят секвенирующие агенты. Секвестранты представляют собой неабсорбирующие вещества, способные образовывать комплексы с токсинами, например ионами (меди, железа, никеля и др.) или микотоксинами и грибами-продуцентами (Герунов, 2022). К основным преимуществам данных веществ относятся высокая поглощающая способность, низкая всасываемость в системный кровоток, что снижает частоту проявления побочных эффектов и обеспечивает экологичность технологии (Норе, 2013).

Известно, что использование микробных препаратов при заготовке кормов может снизить количество грибов и их метаболитов. Так, препарат «Сахабакти-субтил» снижал количество плеснеобразующих грибов на 89% в сене и на 56% в сенаже, при этом число патогенных ми-

кроорганизмов сократилось на 89 и 25% соответственно (Похиленко, Перелыгин, 2007; Былгаева и др., 2016). Экспериментальные данные демонстрируют, что инокуляция силоса штаммами *Lactobacillus buchneri* и *Pediococcus pentosaceus* снижает уровень *F. graminearum* на 70–90% и концентрацию ДОН на 65% за счет подавления роста грибов через подкисление среды (pH < 4,2) и продукцию бактериоцинов (Pereyga et al., 2019), инокуляция штаммами *L. plantarum* и *L. buchneri* снижает содержание *F. graminearum* на 80%, а ДОН – на 65–70% (Канарская, Новикова, 2015). Об адсорбции афлатоксина В1 на 85–92% штаммами *Lactobacillus rhamnosus* и *L. casei* путем связывания его с пептидогликанами клеточной стенки сказано в работе (Zhao et al., 2021), при этом эффект усиливается в присутствии *B. subtilis*.

При возделывании культур также возможно применение различных микробных препаратов, которые способны подавлять развитие фитопатогенных организмов и тем самым снижать синтез их метаболитов. Известно применение препаратов на основе метаболитов бактерий, а также эпифитных и эндогенных бактерий. Например, в основе широко известных в России препаратов защитного действия «Фитоспорин-М» и «Интеграл» лежат два эндофитных штамма бактерий *B. subtilis* (Chen et al., 1995; Недорезков, 2003). Применение препаратов «Фитоспорин-М» и «Триходермин» (*Trichoderma asperellum*) способствует снижению на 40–60% содержания зеараленона в зерне за счет подавления развития *Fusarium* spp. (Сидоров и др., 2021), а обработка семян ячменя препаратом «Актинофит» (*Streptomyces griseoviridis*) снижает содержание ДОН на 55% (Иванов, Петрова, 2020).

Штаммы *B. subtilis* и *B. amyloliquefaciens* продуцируют липопептиды (сурфактин, итурин), подавляющие рост *F. graminearum* на 90% и синтез ДОН на 70% в пшенице

(Fira et al., 2018). Путем конкуренции за питательные ресурсы и секретируемые хитиназы *Trichoderma harzianum* снижает колонизацию колоса пшеницы *F. graminearum* на 80%, что уменьшает накопление ДОН на 65% (Matarese et al., 2012). Грамотрицательные бактерии *Pseudomonas fluorescens* активируют синтез салициловой кислоты в растениях кукурузы, снижая поражение *Aspergillus flavus* на 60% и накопление афлатоксина В1 на 50% (Pieterse et al., 2014).

Помимо использования микробных и ферментативно-пробиотических препаратов в кормлении, кормозаготовке и растениеводстве борьба с микотоксинами возможна совершенно иным путем – через создание трансгенных растений. Такие растения содержат гены, кодирующие ферменты-деструкторы токсинов. Например, для снижения содержания зеараленона в зерне кукурузы был клонирован и перенесен в геном кукурузы ген *zhd101*, изначально кодирующий щелочную лактонгидролазу у гриба *Clonostachys rosea* IFO 7063. Данная трансформация кукурузы привела к синтезу фермента в зерновках, что снижало содержание токсина в 5 раз. Аналогичная трансформация была проведена и в отношении содержания афлатоксинов в грецком орехе. Для этой цели ген фермента дигидрошикиматдегидрогеназы, который отвечает за превращение 5-дигидрошикимата в галловую кислоту, ввели в геном грецкого ореха (Muir et al., 2003; Igawa et al., 2007). В работе (Poppenberger et al., 2003) также показана возможность снижения токсичности ДОН путем его гликозилирования ферментом ДОН-глюкозилтрансферазой (Muir et al., 2003; Igawa et al., 2007).

Сорбционные методы. Адсорбенты микотоксинов можно разделить на неорганические и органические. Среди неорганических сорбентов максимальной селективностью в отношении афла-

токсинов обладают гидратированные натрий-кальциевые алюмосиликатные матрицы (HSCAS), демонстрирующие сорбционный потенциал 60–70 мг/г за счет ионообменных взаимодействий в мезопористой структуре (диаметр пор 2–5 нм). Для сравнения: природные бентониты с монтмориллонитовой основой связывают не более 9 мг/г токсинов из-за ограниченной удельной поверхности ($\leq 80 \text{ м}^2/\text{г}$ против $450 \text{ м}^2/\text{г}$ у HSCAS). Некоторые алюмосиликаты эффективны как против афлатоксинов, так и против зеараленона и фумонизина. Однако есть указания, что неорганические сорбенты, изготовленные на основе алюмосиликатов и бентонитов или цеолитов, не способны связывать наиболее часто обнаруживаемые в кормах средней полосы России микотоксины трихотеценовой группы (Т-2 токсин, ДОН) (Шкуратова и др., 2013; Guimarães et al., 2018).

Биополимерные сорбенты органической природы (хитозан, пектиновые комплексы) демонстрируют полифункциональную активность в отношении связывания ксенобиотиков микробного происхождения. Особый интерес представляет гликокаликс дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, структурные компоненты которого (β -глюканы, маннопротеины) обеспечивают селективную адсорбцию микотоксинов. Эффективность адсорбции Т-2 микотоксина зависит от влияния протеина, глюкана и маннана: ферментативный гидролиз протеина и маннана усиливает адсорбцию, глюканов – снижает адсорбцию (Канарская, 2012). Кроме того, микробные биопленки мицелиальных грибов и лак-

тобактерий (*Lactobacillus* spp.) проявляют кросс-реактивность к широкому спектру токсинов (афлатоксины, охратоксины) благодаря наличию тейхоевых кислот и пептидогликановых рецепторов. Современные разработки направлены на иммобилизацию этих культур в кормовых матрицах для *in situ* детоксикации.

К адсорбентам, полученным с использованием нанотехнологий, относится самый известный препарат с измененной молекулярной структурой – «Амадеит» (OLMIX, Франция), получаемый из монтмориллонита и олигосахаридов (Бурдаева, 2016).

Однако помимо токсинов сорбенты способны связывать и ценные компоненты кормов, например витамины и микроэлементы (Шкуратова, 2003; Jard et al., 2011; Guimarães, 2018). А адсорбенты на основе клеток бактерий могут вызывать излишнюю активацию иммунитета и аллергические реакции (Jard et al., 2011).

Заключение

В настоящее время не существует радикальных способов снижения уровня микотоксинов в животноводческих кормах и пищевых продуктах. Представленный обзор демонстрирует необходимость разработки комплексного инструментария, сочетающего профилактические меры для животных, методы детоксикации и постоянный мониторинг кормов. Лишь комплексный подход может позволить минимизировать риск возникновения микотоксикозов, при этом сохранив здоровье животных и снизив финансовые издержки хозяйств.

ЛИТЕРАТУРА

- Бурдаева К. (2016). Средства борьбы с микотоксинами. Краткий обзор рынка // Ценовик. № 6. С. 50–52.
- Былгаева А.А., Тарабукина Н.П., Неустроев М.П., Парникова С.И. (2016). Использование пробиотика в качестве консерванта при заготовке растительных кормов // Международный научно-исследовательский журнал. № 11 (53). С. 151–153.
- Герунов Т.В. (2022). Секвестранты микотоксинов: избирательность действия и побочные эффекты // Вестник Омского государственного аграрного университета. № 2 (46). С. 79–84.

- Иванов А.А., Петрова С.Н. (2020). Биопрепараты на основе актинобактерий для защиты зерновых культур // *Агрехимия*. № 8. С. 45–52.
- Йылдырым Е.А., Бражник Е.А., Ильина Л.А. [и др.] (2019). Современный пробиотик для здоровья кур // *Эффективное животноводство*. №. 4 (152). С. 66–67.
- Канарская А.В., Новикова И.И. (2015). Биоконтроль микотоксинов в кормах с использованием пробиотических культур // *Вестник РАСХН*. № 3. С. 45–50.
- Канарская З.А. (2012). Влияние полисахаридов клеточной стенки дрожжей на эффективность адсорбции Т-2 токсина // *Вестник Казанского университета*. № 15. С. 162–168.
- Коростелева В.П., Тремасов М.Я., Семенов Э. И., Тремасова А.М., Сагдеева З.Х. (2016). Сорбент «Фитосорб», пробиотики «Спас» и «Энтероспорин» для профилактики микотоксикозов животных // *Ветеринарный врач*. №. 5. С. 3–8.
- Недорезков В.Д. (2003). Биологическое обоснование применения эндофитных бактерий в защите пшеницы от болезней на Южном Урале. СПб., Пушкин: НИИ защиты растений. 41 с.
- Папазян Т.Т. (2002). Микотоксины: экономический риск и контроль // *Животноводство России*. № 7. С. 16–18.
- Платонов А.В., Ерегина С.В., Артамонов И.В. (2024). Результаты микотоксикологического мониторинга кормов крупного рогатого скота, заготовленных в Вологодской области // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. Т. 25. № 6. С. 1124–1136. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1124-1136
- Попова С.А., Скопцова Т.И., Лосякова Е.В. (2017). Микотоксины в кормах: причины, последствия, профилактика // *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. № 1. С. 16–23.
- Похиленко В.Д., Перельгин В.В. (2007). Пробиотики на основе спорообразующих бактерий и их безопасность // *Химическая и биологическая безопасность*. № 2-3. С. 20–41.
- Салливан Д.О. (2005). Микотоксины – тихая опасность // *Комбикорм*. № 1. С. 54–56.
- Семенов Э.И., Тремасов М.Я., Папуниди К.Х. [и др.] (2017). Методические рекомендации по диагностике, профилактике и лечению микотоксикозов животных. Москва: ФГБНУ «Росинформагротех». 68 с.
- Сергеев В.Р., Шуровенков О.Ю., Попов Ю.В. (1999). Протравливание семян зерновых культур. Рекомендации Всерос. НИИ защиты растений МСХП РФ // *Защита и карантин растений*. № 2. С. 1–12.
- Сидоров Д.В. [и др.] (2021). Эффективность микробных препаратов в снижении микотоксинов при возделывании кукурузы // *Достижения науки и техники АПК*. Т. 35. № 5. С. 23–28.
- Соболева О.М., Колосова М.М., Филипович Л.А. (2019). Электрофизический способ снижения количества микотоксинов в концентрированных кормах // *Достижения науки и техники АПК*. № 4. С. 64–66.
- Толмачева Т.А. (2013). Афлатоксины, их влияние на продовольственное сырье и методы обеззараживания // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. Серия: Пищевые и биотехнологии. № 2. С. 40–44.
- Хон Ф., Эсмагамбетов К. (2014). Стабильное размножение коров и телок – основной фактор эффективности молочного скотоводства // *Главный зоотехник*. № 12. С. 3–8.
- Шамилова Т.А., Матросова Л.Е., Семенов Э.И., Иванов А.В. (2012). Пробиотик в качестве профилактического средства при афлатоксикозе поросят // *Достижения науки и техники АПК*. №. 3. С. 67–69.
- Шкуратова И.А., Лебедева И.А., Ряпосова М.В. (2013). Пробиотики против микотоксикозов // *Животноводство России*. Специальный выпуск Свиноводство. С. 56–57.
- Шкуратова И.А., Лебедева И., Ряпосова М., Коноплева И., Бусыгин П. (2019). Профилактика микотоксикозов свиней с использованием пробиотиков // *Эффективное животноводство*. №. 8. С. 94–95.

- Юсупова Г.Г. (2003). Влияние СВЧ-энергии на микроскопические грибы и микотоксины // Вестник КрасГАУ. № 3. С. 236–238
- Юсупова Г.Г., Юсупов Р.Х. (2012). Электротермическое воздействие энергией СВЧ-поля – экологичное решение проблемы качества и безопасности зернового сырья // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». № 1. С. 9–11.
- Alberts J.F., Lilly M., Rheeder J.P. et al. (2017). Technological and community-based methods to reduce mycotoxin exposure. *Food Control*, 73, 101–109. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.07.028
- Aravind C.L., Patil V.S., Devegovda G., Umakant B., Gunpool S.P. (2004). The effectiveness of esterified glucomannan counteract mycotoxicosis in naturally contaminated feeds by serum productivity and biochemical parameters, and hematological parameters in broilers. *Poult. Sci.*, 82, 571–576. DOI: 10.1093/ps/82.4.571
- Audenaert K., Callewaert E., Höfte M., De Saeger S., Haesaert G. (2010). Hydrogen peroxide induced by the fungicide prothioconazole triggers deoxynivalenol (DON) production by *Fusarium graminearum*. *BMC Microbiology*, 10, 1–10. DOI: 10.1186/1471-2180-10-220
- Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J. et al. (2021). Mycotoxin mixtures in food and feed: Holistic evaluation of their toxicological interactions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(13), 2206–2222. DOI: 10.1080/10408398.2020.1773763
- Chen C., Bauske E.M., Musson G., Rodriguezkabana R., Kloepper J.W. (1995). Biological control of *Fusarium* wilt on cotton by use of endophytic bacteria. *Biological Control*, 5, 83–91. DOI: 10.1006/bcon.1995.1012
- De Oliveira C.A.F., Muaz K., de Almeida Møller C.O., Corassin C.H., Rattray F.P. (2021). Probiotics and mycotoxins. *Probiotics and Prebiotics in Foods*. DOI:10.1016/B978-0-12-819662-5.00005-7
- Devi Y., Thirumdas R., Sarangapani C., Deshmukh R.R., Annapure U.S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, 187–191. DOI: 10.1016/j.foodcont.2017.02.006
- D’Mello J., Macdonald A.M.C., Postel D., Dijksma W.T.P. (1998). Pesticide use and mycotoxin production in *Fusarium* and *Aspergillus* phytopathogens. *Eur. J. Plant Pathology*, 104, 741–751. DOI: 10.1023/A:1008637715929
- Fira D., Dimkić I., Berić T. et al. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus* species. *Journal of Biotechnology*, 285, 44–55. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2018.07.029
- Grenier B., Loureiro-Bracarense A.P., Leslie J.F., Oswald I.P. (2014). Physical and chemical methods for mycotoxin decontamination in maize. *Mycotoxin Reduction in Grain Chains*. DOI: 10.1002/9781118832790.ch9
- Gruber-Dorninger C., Jenkins T., Schatzmayr G. (2019). Global mycotoxin occurrence in feed: A ten-year survey. *Toxins*, 11(7), 375. DOI: 10.3390/toxins11070375
- Guimarães A., Santiago A., Teixeira J. et al. (2018). Anti-aflatoxigenic effect of organic acids produced by *Lactobacillus plantarum*. *International Journal of Food Microbiology*, 264, 31–38. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.017
- Herzallah S., Alshawabkeh K., Al Fataftah A. (2008). Aflatoxin decontamination of artificially contaminated feeds by sunlight, γ -radiation, and microwave heating. *Journal of Applied Poultry Research*, 17, 515–521. DOI: 10.3382/japr.2008-00009
- Hope J. (2013). A review of the mechanism of injury and treatment approaches for illness resulting from exposure to water-damaged buildings, mold, and mycotoxins. *The Scientific World Journal*, 1, 67–76. DOI: 10.1155/2013/767482
- Igawa T., Takahashi-Ando N., Ochiai N. (2007). Reduced contamination by the *Fusarium* mycotoxin zearalenone in maize kernels through genetic modification with a detoxification gene. *Appl. Environ. Microbiol.*, 73, 1622–1629. DOI: 10.1128/AEM.02322-06

- Jard G., Liboz T., Mathieu F., Guyonvarc'h A., Lebrihi A. (2011). Review of mycotoxin reduction in food and feed: from prevention in the field to detoxification by adsorption or transformation. *Food Additives & Contaminants*, 28(11), 1590–1609. DOI: 10.1080/19440049.2011.599926
- Jouany J.P. (2007). Methods for preventing, decontaminating and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 137(3-4), 342–362. DOI: 10.1016/j.anifeeds-ci.2007.06.009
- Kabak B., Dobson A.D.W., Var I. (2006). Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(8), 593–619. DOI: 10.1080/10408390500436185
- Liu Y., Li M., Bian K. et al. (2019). Reduction of deoxynivalenol in wheat with superheated steam and its effects on wheat quality. *Toxins*, 11(7), 414–420. DOI: 10.3390/toxins11070414
- Loi M., Fanelli F., Liuzzi V.C. et al. (2021). Mycotoxin biotransformation by native and commercial enzymes: Present and future perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(20), 7569–7582. DOI: 10.1007/s00253-021-11554-x
- Luo Y., Liu X., Li J. (2018). Updating techniques on controlling mycotoxins – a review. *Food Control*, 89, 123–132. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.01.016
- Maksimov I.V., Abizgil'dina R.R., Puzenkova L.I. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47, 333–345. DOI: 10.1134/S000368381104007X
- Marín S., Ramos A.J., Cano-Sancho G., Sanchis V. (2013). Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 60, 218–237. DOI: 10.1016/j.fct.2013.07.047
- Massoud R., Zoghi A. (2022). Potential probiotic strains with heavy metals and mycotoxins bioremoval capacity for application in foodstuffs. *Journal of Applied Microbiology*, 133(3), 1288–1307. DOI: 10.1111/jam.15699
- Matarese F., Sarrocco S., Vannacci G. (2012). Biocontrol of Fusarium head blight by *Trichoderma spp.* *Food Additives & Contaminants*, 29(9), 1398–1411. DOI: 10.1080/19440049.2012.689996
- Matumba L., Van Poucke C., Ediage E.N., Jacobs B., De Saeger S. (2015). Effectiveness of hand sorting, flotation/washing, dehulling and combinations thereof on the decontamination of mycotoxin-contaminated white maize. *Food Additives & Contaminants*, 32(6), 960–969. DOI: 10.1080/19440049.2015.1039770
- Muir R., Dandekar A., McGranahan G. et al. (2003). Genetic engineering and breeding of walnuts for control of aflatoxin. *Walnut Res. Ucdavis*, 407.
- Numanoglu E., Gökmen V., Uygun U., Koksel H. (2012). Thermal degradation of deoxynivalenol during maize bread baking. *Food Additives & Contaminants*, 29(3), 423–430. DOI: 10.1080/19440049.2011.636888
- O'Neill K., Damoglou A.P., Patterson M.F. (1993). The stability of deoxynivalenol and 3-acetyl deoxynivalenol to gamma irradiation. *Food Additives & Contaminants*, 10(2), 209–215. DOI: 10.1080/02652039309360880
- Ouf S.A., Basher A.H., Mohamed A.A. (2015). Inhibitory effect of double atmospheric pressure argon cold plasma on spores and mycotoxin production of *Aspergillus niger* contaminating date palm fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(15), 3204–3210. DOI: 10.1002/jsfa.7035
- Peng W-X., Marchal J.L.M., van der Poel A.F.B. (2018). Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing. *Animal Feed Science and Technology*, 237, 129–153. DOI: 10.1016/j.anifeeds-ci.2017.12.011
- Pereyra C.M., Alonso V.A., Rosa C.A. et al. (2019). Use of lactic acid bacteria and other probiotics in silage as a biocontrol strategy. *World Mycotoxin Journal*, 12(2), 133–144. DOI: 10.3920/WMJ2018.2365
- Pieterse C.M.J., Zamioudis C., Berendsen R.L. et al. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102340
- Poppenberger B., Berthiller F., Lucyshyn D. et al. (2003). Detoxification of the Fusarium mycotoxin deoxynivalenol by a UDP-glucosyltransferase from *Arabidopsis thaliana*. *J. Biol. Chem.*, 278, 47905–47914. DOI: 10.1074/jbc.M309163200

- Pronyk C., Cenkowski S., Abramson D. (2006). Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels. *Food Control*, 17(10), 789–796. DOI: 10.1016/j.foodcont.2005.05.013
- Rios G., Zakhia-Rozis N., Chaurand M. et al. (2009). Impact of durum wheat milling on deoxynivalenol distribution in the outcoming fractions. *Food Additives & Contaminants*, 26(4), 487–495. DOI: 10.1080/02652030802471342
- Shanakhat H., Sorrentino A., Raiola A. et al. (2018). Current methods for mycotoxins analysis and innovative strategies for their reduction in cereals: An overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(11), 4003–4013. DOI: 10.1002/jsfa.9041
- Stepanik T., Kost D., Nowicki T., Gaba D. (2007). Effects of electron beam irradiation on deoxynivalenol levels in distillers dried grain and solubles and in production intermediates. *Food Additives & Contaminants*, 24(9), 1001–1006. DOI: 10.1080/02652030701461027
- Ten Bosch L., Pfohl K., Avramidis G. et al. (2017). Plasma-based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* species. *Toxins*, 9(3), 97. DOI: 10.3390/toxins9030097
- Tibola C.S., Fernandes J.M.C., Guarienti E.M., Nicolau M. (2015). Distribution of *Fusarium* mycotoxins in wheat milling process. *Food Control*, 53, 91–95. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.01.022
- Van der Westhuizen L., Shephard G.S., Rheeder J.P. et al. (2011). Optimising sorting and washing of home-grown maize to reduce fumonisin contamination under laboratory-controlled conditions. *Food Control*, 22(3-4), 396–400. DOI: 10.1016/j.foodcont.2010.10.011
- Vearasilp S., Thobunluepop P., Thanapornpoonpong S., Pawelzik E., von Hörsten D. (2015). Radio frequency heating on lipid peroxidation, decreasing oxidative stress and aflatoxin B1 reduction in *Perilla frutescens* L. highland oil seed. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 5, 177–183. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.08.027
- Visconti A., Haidukowski E.M., Pascale M., Silvestri M. (2004). Reduction of deoxynivalenol during durum wheat processing and spaghetti cooking. *Toxicology Letters*, 153(1), 181–189. DOI: 10.1016/j.toxlet.2004.05.014
- Wang X., Wang S., Yan Y. et al. (2020). The degradation of *Alternaria* mycotoxins by dielectric barrier discharge cold plasma. *Food Control*, 117, 107333. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107333
- Yumbe-Guevara B.E., Imoto T., Yoshizawa T. (2003). Effects of heating procedures on deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone levels in naturally contaminated barley and wheat. *Food Additives & Contaminants*, 20(12), 1132–1140. DOI: 10.1080/02652030310001633762
- Zhao Z., Wang Q., Wang K. et al. (2020). Comparison of the adsorption behaviors of montmorillonite and macroporous resin for mycotoxins. *Toxins*, 12(5), 334. DOI: 10.3390/toxins12050334 DOI: 10.3390/toxins12050334
- Zhao L., Jin H., Lan J. et al. (2021). Detoxification of aflatoxin B1 by lactic acid bacteria in fermented foods. *Food Control*, 123, 107805. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107805 DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107805

Сведения об авторах

Дарья Евгеньевна Фалалеева – инженер-исследователь, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: dariyafalaleeva@yandex.ru)

Андрей Викторович Платонов – кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: platonov70@yandex.ru)

Ирина Игоревна Рассохина – научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: rasskhinairina@mail.ru)

MAIN WAYS FOR REDUCING MYCOTOXICOLOGICAL BURDEN ON ANIMAL FEED

Falaleeva D.E., Platonov A.V., Rassokhina I.I.

The breadth of the problem of mycotoxin damage to plant-based animal feed is becoming increasingly apparent today. UN data show that up to 30% of the world's crop is affected by toxic metabolites, while in Russia the problem affects about 80% of grain. In the Vologda Region, the problem is no less acute: analysis of cattle feed samples showed that almost all of them were affected by aflatoxins and zearalenone, 97% by ochratoxin-A, and less than a third of the samples were DON. The threat of the spread of micromycetes and their metabolites is obvious for the successful development of the agro-industrial complex, the production of high-quality dairy and meat products, and the preservation of public health. The aim of the study is to analyze Russian and foreign literature and identify the main ways to reduce the level of mycotoxicological burden on animal feed. Based on the research results of Russian and foreign authors, the review identifies the following main mechanisms for reducing the content of mycotoxins in feed: transformation (transformation) of toxins into less dangerous substances and reduction of the bioavailability of toxins using various sorbents. In addition, the following methods of combating mycotoxicological stress have been identified: physical (radiation, mechanical or thermal effects); chemical (treatment with substances that react chemically with mycotoxins); biological (treatment with live bacterial cultures, enzyme preparations); sorption (the use of a variety of binding inorganic and organic agents). The review results suggest that there are no single radical ways to reduce the level of mycotoxins in animal feed and food products. It is necessary to develop comprehensive tools that combine preventive measures for animals, as well as detoxification methods and constant feed monitoring. Only an integrated approach can minimize the risk of mycotoxicosis, while maintaining animal health and reducing the financial costs of farms.

Mycotoxins, producing fungi, fungicides, bacteria, adsorbents, enzymatic and probiotic preparations.

REFERENCES

- Alberts J.F., Lilly M., Rheeder J.P. et al. (2017). Technological and community-based methods to reduce mycotoxin exposure. *Food Control*, 73, 101–109. DOI: 10.1016/j.foodcont.2016.07.028
- Aravind C.L., Patil V.S., Devegovda G., Umakant B., Gunpool S.P. (2004). The effectiveness of esterified glucomannan counteract mycotoxicosis in naturally contaminated feeds by serum productivity and biochemical parameters, and hematological parameters in broilers. *Poult. Sci.*, 82, 571–576. DOI: 10.1093/ps/82.4.571
- Audenaert K., Callewaert E., Höfte M., De Saeger S., Haesaert G. (2010). Hydrogen peroxide induced by the fungicide prothioconazole triggers deoxynivalenol (DON) production by *Fusarium graminearum*. *BMC Microbiology*, 10, 1–10. DOI: 10.1186/1471-2180-10-220
- Battilani P., Toscano P., Van der Fels-Klerx H.J. et al. (2021). Mycotoxin mixtures in food and feed: Holistic evaluation of their toxicological interactions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(13), 2206–2222. DOI: 10.1080/10408398.2020.1773763
- Burdaeva K. (2016). Means of combating mycotoxins. A brief overview of the market. *Tsenovik*, 6, 50–52 (in Russian).
- Bylgaeva A.A., Tarabukina N.P., Neustroev M.P., Parnikova S.I. (2016). The use of probiotics as a preservative in the preparation of vegetable feed. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 11(53), 151–153 (in Russian).

- Chen C., Bauske E.M., Musson G., Rodriguezkabana R., Klopper J.W. (1995). Biological control of *Fusarium* wilt on cotton by use of endophytic bacteria. *Biological Control*, 5, 83–91. DOI: 10.1006/bcon.1995.1012
- De Oliveira C.A.F., Muaz K., de Almeida Møller C.O., Corassin C.H., Rattray F.P. (2021). Probiotics and mycotoxins. *Probiotics and Prebiotics in Foods*. DOI:10.1016/B978-0-12-819662-5.00005-7
- Devi Y., Thirumdas R., Sarangapani C., Deshmukh R.R., Annapure U.S. (2017). Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*, 77, 187–191. DOI: 10.1016/j.foodcont.2017.02.006
- D’Mello J., Macdonald A.M.C., Postel D., Dijksma W.T.P. (1998). Pesticide use and mycotoxin production in *Fusarium* and *Aspergillus* phytopathogens. *Eur. J. Plant Pathology*, 104, 741–751. DOI: 10.1023/A:1008637715929
- Fira D., Dimkić I., Berić T. et al. (2018). Biological control of plant pathogens by *Bacillus species*. *Journal of Biotechnology*, 285, 44–55. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2018.07.029
- Gerunov T.V. (2022). Mycotoxin sequestrants: Selectivity of action and side effects. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2(46), 79–84 (in Russian).
- Grenier B., Loureiro-Bracarense A.P., Leslie J.F., Oswald I.P. (2014). Physical and chemical methods for mycotoxin decontamination in maize. *Mycotoxin Reduction in Grain Chains*. DOI: 10.1002/9781118832790.ch9
- Gruber-Dorninger C., Jenkins T., Schatzmayr G. (2019). Global mycotoxin occurrence in feed: A ten-year survey. *Toxins*, 11(7), 375. DOI: 10.3390/toxins11070375
- Guimarães A., Santiago A., Teixeira J. et al. (2018). Anti-aflatoxigenic effect of organic acids produced by *Lactobacillus plantarum*. *International Journal of Food Microbiology*, 264, 31–38. DOI: 10.1016/j.ijfoodmicro.2017.10.017
- Herzallah S., Alshawabkeh K., Al Fataftah A. (2008). Aflatoxin decontamination of artificially contaminated feeds by sunlight, γ -radiation, and microwave heating. *Journal of Applied Poultry Research*, 17, 515–521. DOI: 10.3382/japr.2008-00009
- Hope J. (2013). A review of the mechanism of injury and treatment approaches for illness resulting from exposure to water-damaged buildings, mold, and mycotoxins. *The Scientific World Journal*, 1, 67–76. DOI: 10.1155/2013/767482
- Igawa T., Takahashi-Ando N., Ochiai N. (2007). Reduced contamination by the *Fusarium* mycotoxin zearalenone in maize kernels through genetic modification with a detoxification gene. *Appl. Environ. Microbiol*, 73, 1622–1629. DOI: 10.1128/AEM.02322-06
- Ivanov A.A., Petrova S.N. (2020). Biological products based on actinobacteria for the protection of grain crops. *Agrokhimiya*, 8, 45–52 (in Russian).
- Ilydyrym E.A., Brazhnik E.A., Il’ina L.A. et al. (2019). Modern probiotic for chicken health. *Effektivnoe zhitovnovodstvo*, 4(152), 66–67 (in Russian).
- Jard G., Liboz T., Mathieu F., Guyonvarc’h A., Lebrihi A. (2011). Review of mycotoxin reduction in food and feed: from prevention in the field to detoxification by adsorption or transformation. *Food Additives & Contaminants*, 28(11), 1590–1609. DOI: 10.1080/19440049.2011.599926
- Jouany J.P. (2007). Methods for preventing, decontaminating and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. *Animal Feed Science and Technology*, 137(3-4), 342–362. DOI: 10.1016/j.anifeeds-ci.2007.06.009
- Kabak B., Dobson A.D.W., Var I. (2006). Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 46(8), 593–619. DOI: 10.1080/10408390500436185
- Kanarskaya A.V., Novikova I.I. (2015). Biocontrol of mycotoxins in feed using probiotic cultures. *Vestnik RASKhN*, 3, 45–50 (in Russian).
- Kanarskaya Z.A. (2012). The effect of yeast cell wall polysaccharides on the efficiency of T-2 toxin adsorption. *Vestnik Kazanskogo universiteta*, 15, 162–168 (in Russian).

- Khon F., Esmagambetov K. (2014). Stable reproduction of cows and heifers is the main factor in the efficiency of dairy cattle breeding. *Glavnyi zootekhnik*, 12, 3–8 (in Russian).
- Korosteleva V.P., Tremasov M.Ya., Semenov E. I., Tremasova A.M., Sagdeeva Z.Kh. (2016). Sorbent “Phytosorb”, probiotics “Spas” and “Enterosporin” for the prevention of mycotoxicosis in animals. *Veterinarnyi vrach*, 5, 3–8 (in Russian).
- Liu Y., Li M., Bian K. et al. (2019). Reduction of deoxynivalenol in wheat with superheated steam and its effects on wheat quality. *Toxins*, 11(7), 414–420. DOI: 10.3390/toxins11070414
- Loi M., Fanelli F., Liuzzi V.C. et al. (2021). Mycotoxin biotransformation by native and commercial enzymes: Present and future perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(20), 7569–7582. DOI: 10.1007/s00253-021-11554-x
- Luo Y., Liu X., Li J. (2018). Updating techniques on controlling mycotoxins – a review. *Food Control*, 89, 123–132. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.01.016
- Maksimov I.V., Abizgil’dina R.R., Puzenkova L.I. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria as alternative to chemical crop protectors from pathogens. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 47, 333–345. DOI: 10.1134/S000368381104007X
- Marín S., Ramos A.J., Cano-Sancho G., Sanchis V. (2013). Mycotoxins: Occurrence, toxicology, and exposure assessment. *Food and Chemical Toxicology*, 60, 218–237. DOI: 10.1016/j.fct.2013.07.047
- Massoud R., Zoghi A. (2022). Potential probiotic strains with heavy metals and mycotoxins bioremoval capacity for application in foodstuffs. *Journal of Applied Microbiology*, 133(3), 1288–1307. DOI: 10.1111/jam.15699
- Matarese F., Sarrocco S., Vannacci G. (2012). Biocontrol of *Fusarium* head blight by *Trichoderma* spp. *Food Additives & Contaminants*, 29(9), 1398–1411. DOI: 10.1080/19440049.2012.689996
- Matumba L., Van Poucke C., Ediage E.N., Jacobs B., De Saeger S. (2015). Effectiveness of hand sorting, flotation/washing, dehulling and combinations thereof on the decontamination of mycotoxin-contaminated white maize. *Food Additives & Contaminants*, 32(6), 960–969. DOI: 10.1080/19440049.2015.1039770
- Muir R., Dandekar A., McGranahan G. et al. (2003). Genetic engineering and breeding of walnuts for control of aflatoxin. *Walnut Res. Ucdavis*, 407.
- Nedorezkov V.D. (2003). *Biologicheskoe obosnovanie primeneniya endofitnykh bakterii v zashchite pshenitsy ot boleznei na Yuzhnom Urale* [Biological Justification of the Use Of Endophytic Bacteria in Protecting Wheat from Diseases in the Southern Urals]. Saint Petersburg, Pushkin: NII zashchity rastenii.
- Numanoglu E., Gökmen V., Uygün U., Koksel H. (2012). Thermal degradation of deoxynivalenol during maize bread baking. *Food Additives & Contaminants*, 29(3), 423–430. DOI: 10.1080/19440049.2011.636888
- O’Neill K., Damoglou A.P., Patterson M.F. (1993). The stability of deoxynivalenol and 3-acetyl deoxynivalenol to gamma irradiation. *Food Additives & Contaminants*, 10(2), 209–215. DOI: 10.1080/02652039309360880
- Ouf S.A., Basher A.H., Mohamed A.A. (2015). Inhibitory effect of double atmospheric pressure argon cold plasma on spores and mycotoxin production of *Aspergillus niger* contaminating date palm fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(15), 3204–3210. DOI: 10.1002/jsfa.7035
- Papazyan T.T. (2002). Mycotoxins: Economic risk and control. *Zhivotnovodstvo Rossii*, 7, 16–18 (in Russian).
- Peng W-X., Marchal J.L.M., van der Poel A.F.B. (2018). Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing. *Animal Feed Science and Technology*, 237, 129–153. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2017.12.011
- Pereyra C.M., Alonso V.A., Rosa C.A. et al. (2019). Use of lactic acid bacteria and other probiotics in silage as a biocontrol strategy. *World Mycotoxin Journal*, 12(2), 133–144. DOI: 10.3920/WMJ2018.2365
- Pieterse C.M.J., Zamioudis C., Berendsen R.L. et al. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52, 347–375. DOI: 10.1146/annurev-phyto-082712-102340

- Platonov A.V., Ereghina S.V., Artamonov I.V. (2024). The results of ecotoxicological monitoring of cattle feed harvested in the Vologda region. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka*, 25(6), 1124–1136. DOI: 10.30766/2072-9081.2024.25.6.1124-1136 (in Russian).
- Pokhilenko V.D., Pereygin V.V. (2007). Probiotics based on spore-forming bacteria and their safety. *Khimicheskaya i biologicheskaya bezopasnost'*, 2-3, 20–41 (in Russian).
- Popova S.A., Skoptsova T.I., Losyakova E.V. (2017). Mycotoxins in feed: Causes, consequences, prevention. *Izvestiya Velikolukskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 1, 16–23 (in Russian).
- Poppenberger B., Berthiller F., Lucyshyn D. et al. (2003). Detoxification of the Fusarium mycotoxin deoxynivalenol by a UDP-glucosyltransferase from Arabidopsis thaliana. *J. Biol. Chem.*, 278, 47905–47914. DOI: 10.1074/jbc.M309163200
- Pronyk C., Cenkowski S., Abramson D. (2006). Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels. *Food Control*, 17(10), 789–796. DOI: 10.1016/j.foodcont.2005.05.013
- Rios G., Zakhia-Rozis N., Chaurand M. et al. (2009). Impact of durum wheat milling on deoxynivalenol distribution in the outgoing fractions. *Food Additives & Contaminants*, 26(4), 487–495. DOI: 10.1080/02652030802471342
- Sullivan D.O. (2005). Mycotoxins as a silent danger. *Kombikorm*, 1, 54–56 (in Russian).
- Semenov E.I., Tremasov M.Ya., Papunidi K.Kh. et al. (2017). *Metodicheskie rekomendatsii po diagnostike, profilaktike i lecheniyu mikotoksikozov zivotnykh* [Methodological Recommendations for the Diagnosis, Prevention and Treatment of Mycotoxicosis in Animals]. Москва: FGBNU "Rosinformagrotekh".
- Sergeev V.R., Shurovenkov O.Yu., Popov Yu.V. (1999). Pickling of grain seeds. Recommendations of All-Russian Research Institute of Plant Protection of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation. *Zashchita i karantin rastenii*, 2, 1–12 (in Russian).
- Shamilova T.A., Matrosova L.E., Semenov E.I., Ivanov A.V. (2012). Probiotic as a preventive agent for piglet aflatoxicosis. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 3, 67–69 (in Russian).
- Shanakhat H., Sorrentino A., Raiola A. et al. (2018). Current methods for mycotoxins analysis and innovative strategies for their reduction in cereals: An overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(11), 4003–4013. DOI: 10.1002/jsfa.9041
- Shkuratova I.A., Lebedeva I., Ryaposova M., Konopleva I., Busygin P. (2019). Prevention of mycotoxicosis in pigs using probiotics. *Effektivnoe zhitovnovodstvo*, 8, 94–95 (in Russian).
- Shkuratova I.A., Lebedeva I.A., Ryaposova M.V. (2013). Probiotics against mycotoxicosis. *Zhitovnovodstvo Rossii. Spetsial'nyi vypusk Svinovodstvo*, 56–57 (in Russian).
- Sidorov D.V. et al. (2021). The effectiveness of microbial preparations in reducing mycotoxins in corn cultivation. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 35(5), 23–28 (in Russian).
- Soboleva O.M., Kolosova M.M., Filipovich L.A. (2019). An electrophysical method for reducing the amount of mycotoxins in concentrated feed. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 4, 64–66 (in Russian).
- Stepanik T., Kost D., Nowicki T., Gaba D. (2007). Effects of electron beam irradiation on deoxynivalenol levels in distillers dried grain and solubles and in production intermediates. *Food Additives & Contaminants*, 24(9), 1001–1006. DOI: 10.1080/02652030701461027
- Ten Bosch L., Pfohl K., Avramidis G. et al. (2017). Plasma-based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium*, *Aspergillus* and *Alternaria* species. *Toxins*, 9(3), 97. DOI: 10.3390/toxins9030097
- Tibola C.S., Fernandes J.M.C., Guarienti E.M., Nicolau M. (2015). Distribution of *Fusarium* mycotoxins in wheat milling process. *Food Control*, 53, 91–95. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.01.022
- Tolmacheva T.A. (2013). Aflatoxins, their effect on food raw materials and disinfection methods. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Pishchevye i biotekhnologii*, 2, 40–44 (in Russian).
- Van der Westhuizen L., Shephard G.S., Rheeder J.P. et al. (2011). Optimising sorting and washing of home-grown maize to reduce fumonisin contamination under laboratory-controlled conditions. *Food Control*, 22(3-4), 396–400. DOI: 10.1016/j.foodcont.2010.10.011

- Vearasilp S., Thobunluepop P., Thanapornpoonpong S., Pawelzik E., von Hörsten D. (2015). Radio frequency heating on lipid peroxidation, decreasing oxidative stress and aflatoxin B1 reduction in *Perilla frutescens* L. highland oil seed. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 5, 177–183. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.08.027
- Visconti A., Haidukowski E.M., Pascale M., Silvestri M. (2004). Reduction of deoxynivalenol during durum wheat processing and spaghetti cooking. *Toxicology Letters*, 153(1), 181–189. DOI: 10.1016/j.toxlet.2004.05.014
- Wang X., Wang S., Yan Y. et al. (2020). The degradation of *Alternaria* mycotoxins by dielectric barrier discharge cold plasma. *Food Control*, 117, 107333. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107333
- Yumbe-Guevara B.E., Imoto T., Yoshizawa T. (2003). Effects of heating procedures on deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone levels in naturally contaminated barley and wheat. *Food Additives & Contaminants*, 20(12), 1132–1140. DOI: 10.1080/02652030310001633762
- Yusupova G.G. (2003). The effect of microwave energy on microscopic fungi and mycotoxins. *Vestnik KrasGAU*, 3, 236–238 (in Russian).
- Yusupova G.G., Yusupov R.Kh. (2012). Electrothermal exposure to microwave energy is an environmentally friendly solution to the problem of quality and safety of grain raw materials. *Vestnik Federal'nogo gosudarstvennogo obrazovatel'nogo uchrezhdeniya vysshego professional'nogo obrazovaniya "Moskovskii gosudarstvennyi agroinzhenernyi universitet imeni V.P. Goryachkina"*, 1, 9–11 (in Russian).
- Zhao L., Jin H., Lan J. et al. (2021). Detoxification of aflatoxin B1 by lactic acid bacteria in fermented foods. *Food Control*, 123, 107805. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107805 DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107805
- Zhao Z., Wang Q., Wang K. et al. (2020). Comparison of the adsorption behaviors of montmorillonite and macroporous resin for mycotoxins. *Toxins*, 12(5), 334. DOI: 10.3390/toxins12050334 DOI: 10.3390/toxins12050334

Information about the authors

Dar'ya E. Falaleeva – Research Engineer, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: dariyafalaleeva@yandex.ru)

Andrei V. Platonov – Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor, Leading Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: platonov70@yandex.ru)

Irina I. Rassokhina – Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: rasskhinairina@mail.ru)