

УДК: 619:615.9:616-079:577.2

DOI: 10.52419/issn2072-2419.2026.1.148

ИЗУЧЕНИЕ ЗАЩИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА СРЕДСТВ ПРОФИЛАКТИКИ СОЧЕТАННОГО МИКОТОКСИКОЗА ПО ОЦЕНКЕ ЭКСПРЕССИИ ПРОВОСПАЛИТЕЛЬНЫХ ЦИТОКИНОВ КРЫС

Тарасова Е.Ю. * – канд. биол. наук, зав. лабораторией ветеринарной санитарии (ORCID 0000-0002-9056-5798)

ФГБНУ «Федеральный центр токсикологической, радиационной
и биологической безопасности»

* evgenechka1885@gmail.com

Ключевые слова: сочетанный микотоксикоз, белые крысы, воспаление, селезенка, провоспалительные цитокины, профилактические комплексы

Key words: combined mycotoxicosis, white rats, inflammation, spleen, proinflammatory cytokines, prophylactic complexes

Финансирование: Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ. (Соглашение от 22.12.2025 № 4/2025-ПД-ВНИВИ)

Поступила: 04.01.2026

Принята к публикации: 05.03.2026

Опубликована онлайн: 01.04.2026



РЕФЕРАТ

Микотоксины являются частыми загрязнителями кормов для животных. Наиболее распространенными микотоксинами в кормах для животных являются зеараленон, Т-2 токсин, дезоксиниваленон, афлатоксины и т.д. В этой статье был рассмотрен молекулярный механизм комбинированного воздействия Т-2 токсина, афлатоксина В1 и зеараленона. Целью данного исследования являлось изучение влияния комплекса микотоксинов на степень экспрессии провоспалительных цитокинов (IL-1 β , IL-6, IFN- γ) мРНК селезенки белых крыс и оценка защитного потенциала разработанных комплексных средств для снижения индукции воспалительных процессов. опыты проведены на 80 белых крысах. Для воспроизведения микотоксикоза животные с основным рационом в течение 21 суток получали кристаллические микотоксины: афлатоксин В1 – 2,5 мг/кг; Т-2 токсин – 5 мг/кг; зеараленон – 2,0 мг/кг корма. В качестве средств защиты использовали три рецептуры профилактических комплексов, обладающих сорбционными, антиоксидантными, гепатопротекторными и иммуномодулирующими свойствами. Экспрессию мРНК провоспалительных цитокинов (IL-1 β , IL-6, IFN- γ) определяли методом количественной ПЦР в реальном времени в образцах селезенки. Экспрессия генов оценивалась по количеству копий кДНК в исследуемом материале с учётом нормирования показателя относительно количества копий ДНК

в той же пробе. Установлено, что ассоциированное воздействие микотоксинов вызывает усиление экспрессии генов провоспалительных цитокинов на уровне мРНК селезенки. Разработанные комплексы модулировали выработку провоспалительных цитокинов. Наиболее выраженный иммуномодулирующий потенциал показал профилактический комплекс на основе галлуазита, силимарина, β -глюканов и метионина. Полученные данные свидетельствуют, что данный профилактический комплекс является перспективным и требует дальнейшего изучения в качестве средства профилактики смешанных микотоксикозов у продуктивных животных.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Микотоксины – это низкомолекулярные, высокостабильные вторичные метаболиты, продуцируемые микроскопическими грибами, принадлежащими к родам *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* и т.д. Эти соединения обладают широким спектром химических структур и токсичности, включая тератогенное, мутагенное, канцерогенное, нефротоксическое, гепатотоксическое, иммунотоксическое действие и представляя значительную опасность для здоровья человека и животных [1-3].

В глобальном масштабе от 60% до 80% сельскохозяйственных культур загрязнены микотоксинами по всей пищевой цепи. Чувствительность к микотоксинам варьирует в зависимости от вида и возрастной группы, при этом молодые особи более чувствительны из-за неполного развития органов [4].

Учитывая глобальный рост содержания микотоксинов в кормах и пищевых продуктах, зафиксированный за последнее десятилетие, актуальной задачей остается поиск эффективных комплексных средств профилактики микотоксикозов [5].

Несмотря на многолетние исследования и внедрение передовых методов ведения сельского хозяйства и производства в пищевой цепи, наличие микотоксинов остается значимой проблемой. Все чаще изучаются комбинированные токсикологические эффекты от одновременного воздействия микотоксинов. В настоящее время афлатоксины, Т-2 токсин, зеараленон, дезоксиниваленон и т.д. считаются наиболее важными микотоксинами с точки зрения токсичности [6-9].

Афлатоксин В₁ считается наиболее опасным микотоксином из-за его генотоксических, канцерогенных свойств. Он относится к числу наиболее мощных мутагенных и канцерогенных веществ. Хроническое воздействие вызывает рак печени, снижение иммунитета и задержку роста и развития, в то время как высокие дозы вызывают острые симптомы, вплоть до летального исхода [1, 10].

Т-2 и НТ-2 токсины также регулярно обнаруживаются в зерновых культурах. Их хроническое воздействие вызывает общую токсичность, гемато- и иммунотоксичность, а также рвоту у животных при высокой концентрации. Тиольная группа в Т-2 токсине делает это соединение потенциальным ингибитором транскрипции РНК и трансляции белков. Он также предотвращает пролиферацию лимфоцитов, изменяя физиологию мембраны, нарушая выработку антител и изменяя рост дендритных клеток [3]. Считается, что Т-2 токсин связывает и инактивирует функцию пептидилтрансферазы в месте транскрипции, что приводит к подавлению синтеза белка. 60S рибосомальная система является наиболее известной молекулярной мишенью трихотеценов, особенно Т-2 токсина, и блокирует инициацию полипептидной цепи. Ингибирующее действие Т-2 токсина на уровне транскрипции и трансляции оказывает заметное влияние на растущие клетки, например, клетки слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта, костный мозг, гемопоэтические стволовые клетки и т.д. [11].

Зеараленон является распространенным загрязнителем кукурузы и других зерновых культур. Свиноматки являются наиболее чувствительным видом к его

эстрогенной активности. Структура зеараленона аналогична эстрогену, и он конкурирует с 17β -эстрадиолом за связывание с цитозольными эстрогенными рецепторами, вызывая репродуктивные проблемы и бесплодие. Более того, он обладает цитотоксическим и генотоксическим действием *in vivo* и *in vitro*, вызывает фрагментацию ДНК, образование микроядер в костном мозге и хромосомные aberrации, вызывает гепатотоксичность, нефротоксичность и нарушения в работе иммунной системы [12].

Учитывая множество патологических эффектов микотоксинов, крайне важно принимать меры по защите сельскохозяйственных животных от их воздействия. Накопление микотоксинов в зерне и комбикормах следует сводить к минимуму путем внедрения надлежащих сельскохозяйственных практик и подходящих условий хранения, но полное предотвращение образования микотоксинов практически невозможно [13]. Эффективная борьба с микотоксикозами животных в значительной степени заключается в изучении ответа организма на интоксикацию и применении профилактических и терапевтических средств [14]. Кроме классических подходов выявления последствий интоксикации и их снижения существуют методические подходы, основанные на стремительно развивающейся области науки «метаболомике» [15, 16]. В нашем случае выбран подход к изучению уровня экспрессии маркеров развития воспалительного процесса, а именно провоспалительных цитокинов.

Система цитокинов представляет собой универсальную, полиморфную, регуляторную сеть медиаторов, предназначенных для контроля процессов пролиферации, дифференцировки и функциональной активности клеточных элементов в кроветворной, иммунной и в других гомеостатических системах организма [17]. Все цитокины, а их в настоящее время известно более 30, по структурным особенностям и биологическому действию делятся на несколько самостоятельных групп, из них провоспалительные цитоки-

ны играют важную роль в иммунном ответе тканей и обеспечивают мобилизацию воспалительного ответа [18]. Однако информация о влиянии загрязненных сразу несколькими микотоксинами (афлатоксином В₁, зеараленоном и Т-2 токсином) рационов на экспрессию, связанных с воспалением генов селезенки, немногочисленна. На основании вышеизложенного важным вопросом в отношении микотоксинов является детальная характеристика их молекулярного механизма действия и влияния на здоровье животных и человека, что необходимо для создания эффективной стратегии профилактики и лечения микотоксикозов [19, 20].

В связи с этим целью данного исследования являлось изучение влияния комплекса микотоксинов на степень экспрессии провоспалительных цитокинов (IL-1 β , IL-6, IFN- γ) мРНК селезенки белых крыс и оценка защитного потенциала разработанных комплексных средств для снижения индукции воспалительных процессов. Ранее нами было изучено действие разработанных профилактических комплексов на клинический статус, гемато-биохимические показатели крови, структуру внутренних органов животных при воздействии микотоксинов [21, 22].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ / MATERIALS AND METHODS

Объектами исследования являлись комплексы препаратов, обладающие сорбционными, антиоксидантными, иммуномодулирующими, гепатопротекторными свойствами, микотоксины (Т-2 токсин, афлатоксин В₁, зеараленон), подопытные животные (белые крысы).

Белые крысы массой 150-170 г были распределены на восемь групп по десять крыс в каждой. Биологическим контролем служила первая группа крыс, крысам второй-пятой групп с кормом задавали микотоксины: афлатоксин В₁ – 2,5 мг/кг; Т-2 токсин – 5 мг/кг; зеараленон – 2,0 мг/кг корма. Дозы микотоксинов выбраны для воспроизведения подострого Т-2-, афла-, зеараленонмикотоксикоза с ярко выра-

женной клинической картиной. Крысы третьей-пятой групп дополнительно к токсичному рациону получали разработанные профилактические комплексы (соответственно первая (β -глюканы, шрот расторопши, витамин Е, аскорбиновая кислота, левамизол), вторая (бентонит, янтарная кислота, метилурацил; витамин А, пробиотический препарат «Флорин»), третья (галлуазит, метионин, β -глюканы, шрот расторопши)) в дозе 0,25 % от рациона. Шестой - восьмой группе крыс задавали первый, второй, третий профилактические комплексы в дозе 0,25 % дополнительно к основному рациону с целью оценки безвредности на молекулярном уровне. Экспериментальный период длился три недели.

Экспрессию мРНК провоспалительных цитокинов (IL-1 β , IL-6, и IFN- γ) определяли методом ОТ-ПЦР в реальном времени в образцах селезенки, извлеченных в конце эксперимента и подвергнутых заморозке (минус 70 °С). Для определения индукции провоспалительных цитокинов была выбрана селезенка, потому что она является вторичным (периферическим) лимфоидным органом,

играющим ведущую роль в воспалительной реакции и развитии приобретенного иммунитета. Тканевую РНК экстрагировали с помощью набора для экстракции РНК «Рибо-преп» (ФБУН ЦНИИ Эпидемиологии Роспотребнадзора, Россия). Лизис остатков ДНК в растворе РНК после выделения нуклеиновых кислот осуществляли путём добавления фермента «ДНКазы» в препарат, выделенных нуклеиновых кислот.

Нормализацию количества нуклеиновых кислот производили по результатам амплификации хромосомной ДНК (ген гамма-интерферона). Схожий подход был реализован в работах W.T. Porter и соавт. (2021) и А.А. Кожабад и соавт. (2021) [23, 24]. Обратную транскрипцию общей РНК проводили с использованием специфического обратного праймера с добавлением в основную смесь для ПЦР фермента MMLV-ревертазы (набор «Риверта-Л» (ЦНИИ Эпидемиологии, Россия)).

Реакции ПЦР с обратной транскрипцией в реальном времени проводили с использованием набора реагентов для проведения ПЦР-РВ (ЗАО «Синтол», Россия).

Таблица 1- Олигонуклеотидные праймеры для выбранных цитокинов

Специфичность генов	Олигонуклеотидные последовательности(5'→3')	Идентификационный номер
Интерлейкин 1- β F	tctccagtcaggcttctgtg	NM_031512.2
Интерлейкин 1- β R	ctcctcactgtcgaaagctgcta	
Интерлейкин 1- β P	(ROX) tgaagcagctatggcaactgtccc (BHQ2)	
Интерлейкин-6 F	aggaacgaaagtcaactccatctg	NM_012589.2
Интерлейкин-6 R	ttccttgatgactaacttctcagca	
Интерлейкин-6 P	(R6G) agacttccagccagttgccttcttg (BHQ1)	
Интерферон- γ F	ccatcagcaacaacataagtgtcat	NM_138880.3
Интерферон- γ R	tgaacttgccgatgtca	
Интерферон- γ P	(FAM) atcactaacttctcagcaacagtaagcaaa (BHQ1)	

Примечание: 1 F – прямой праймер; 2 R – обратный праймер; 3 P – зонд.

Условия амплификации были следующими: 37 °С в течение 30 мин, 95 °С в течение 5 мин, 40 циклов 95 °С в течение 15 с, 55 °С в течение 30 с, 72 °С в течение 5 с. Экспрессия генов оценивалась по количеству копий кДНК в исследуемом материале.

Специфические компоненты ПЦР основывались на генетической последовательности интерлейкинов и интерферона белых крыс.

Нуклеотидная последовательность, используемых олигонуклеотидов, показана в таблице 1.

ОТ-ПЦР проводили с использованием детектирующего амплификатора CFX 96 «Bio-Rad».

При обработке цифровых данных вычисляли следующие описательные статистики: среднеарифметическую (М) и стандартное отклонение ($\pm Sd$). Статистическую значимость межгрупповых отличий оценивали с использованием теста Манна–Уитни ($\alpha = 0,05$) с коррекцией р-критерия при помощи поправки на множественные сравнения Бонферрони. При обработке данных использовали программы Statistica 6.0 и MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ / RESULTS

У крыс, получавших корм, контаминированный микотоксинами, экспрессия мРНК IL-1 β , IL-6, IFN- γ была повышена

($p < 0,01$), что подтверждено пониженными значениями порогового цикла относительно группы биологического контроля (таблица 2).

Было показано, что предлагаемые профилактические комплексы ингибируют экспрессию генов IL-1 β , IL-6 и IFN- γ селезенки белых крыс, получавших Т-2 токсин, зеараленон и афлатоксин В₁. По IL-1 β значение порогового цикла снизилось в третьей, четвертой и пятой группах на 14,38 % ($p < 0,05$), 12,36 % и 7,06 % относительно группы биологического контроля, во второй группе – 20,77 % ($p < 0,01$) соответственно; по IL-6 и IFN γ – 15,0 % ($p < 0,05$), 17,9 % ($p < 0,05$), 8,7 % и 15,9 % ($p < 0,05$), 12,48 %, 7,89 %, в группе токсического контроля – 25,0 % ($p < 0,01$) и 28,75 % ($p < 0,01$).

Результаты амплификации мРНК провоспалительных цитокинов представлены на рисунке 1.

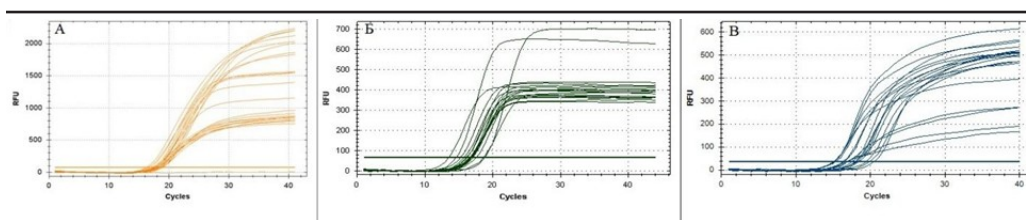
Эти результаты подтверждают наличие у разработанных профилактических комплексов противовоспалительных эффектов, наиболее выраженных у комплекса, в состав которого входит галлуазит, метионин, β -глюканы, шрот расторопши.

Влияние разработанных профилактических комплексов на экспрессию мРНК генов селезенки белых крыс, связанных с воспалением при смешанном микотоксикозе, представлено на рисунке 2.

Таблица 2- Циклы экспрессии провоспалительных цитокинов

Группа	Цикл провоспалительных цитокинов в ПЦР-РВ		
	IL-1 β	IL-6	IFN- γ
1	18,89 \pm 0,95	17,41 \pm 0,61	19,66 \pm 1,12
2	16,42 \pm 0,74**	14,80 \pm 0,23**	16,02 \pm 0,87**
3	17,18 \pm 0,86*	15,84 \pm 0,38*	17,64 \pm 0,96*
4	17,42 \pm 0,96	15,53 \pm 0,67*	18,08 \pm 0,72
5	18,05 \pm 0,73	16,52 \pm 0,22	18,66 \pm 0,54
6	18,47 \pm 1,02	17,53 \pm 0,75	19,08 \pm 1,08
7	18,51 \pm 0,99	17,25 \pm 0,91	19,03 \pm 0,79
8	18,54 \pm 0,82	17,34 \pm 0,89	19,24 \pm 0,55

Примечание: 1 * – $p < 0,05$; 2 ** – $p < 0,01$.



А - амплификация IL-1β; Б - амплификация IL-6; В - амплификация IFNγ

Рисунок 1 – Результаты ОТ-ПЦР мРНК провоспалительных цитокинов.

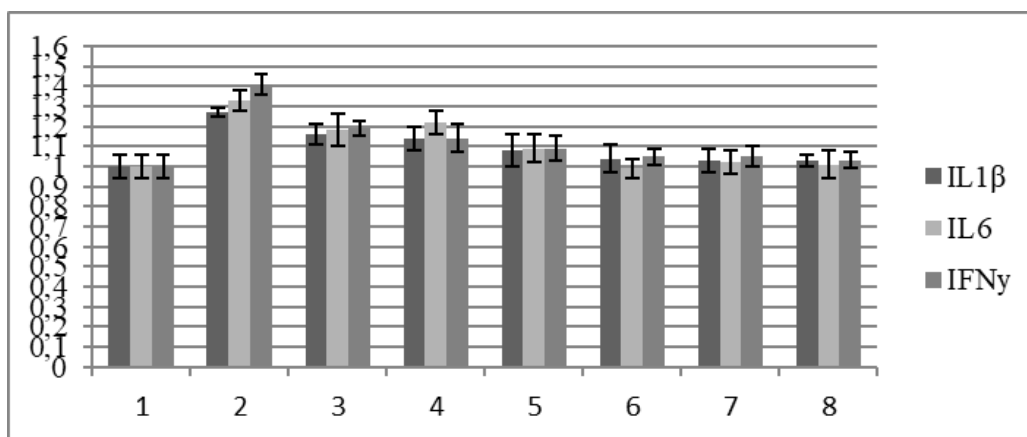


Рисунок 2 – Значения экспрессии провоспалительных цитокинов у белых крыс, выраженные в относительных единицах [AU].

Из рисунка 2 видно, что выработка цитокинов и воспалительная реакция селезенки вызваны потреблением корма, содержащего Т-2 токсин, зеараленон и афлатоксин В₁. Добавление профилактических комплексов модулирует воспалительный ответ у белых крыс за счет изменения экспрессии провоспалительных цитокинов селезенки.

Pistol G.C. и соавт. (2015) обнаружили, что зеараленон повышал экспрессию и синтез провоспалительных цитокинов (TNF-α, IL-8, IL-6, IL-1β) и не влиял на цитокины IFN-γ, IL-4 и IL-10 в селезенке. Авторы делают вывод, что воспалительная реакция может быть следствием активации сигнального пути JNK, а не p-38MAPK и NF-κB, экспрессия генов и белков которых подавляется действием зеараленона [25].

В исследованиях Wang Y.C. и соавт. (2012) зеараленон приводил к повыше-

нию уровня IL-2 и IFN-γ и снижению экспрессии гена IL-6 в стимулированных лимфоцитах селезенки домашней птицы [26], Choi et al. (2012) снижению уровня IL-1, IL-10 и IFN-γ в селезенке крыс, вакцинированных или невакцинированных против парвовируса [27].

Результаты J. Wang и соавт. (2025) [28] выявили выраженную токсичность и канцерогенность афлатоксина В₁, подтвержденные повышением уровня TNF-α и IL-6.

Исследования [29-31] генотоксичности показали, что *in vitro* токсичность Т-2 вызывает одноцепочечные разрывы ДНК, которые анализируются в первичных лимфоцитах тимуса, гепатоцитов и селезенки мышей BALB/c.

После образования пор в плазматической мембране клеток печени под воздействием афлатоксина В₁ высвобождаются провоспалительные медиаторы, такие как

IL-1 β и IL-18, которые стимулируют и привлекают нейтрофилы в ткань. Этот процесс приводит к инфильтрации нейтрофилов, набуханию клеток, гибели клеток и воспалительному поражению печени, известному как пироптоическое поражение печени. Более того, наблюдалось повышение уровня экспрессии IL-1 β и расщепленной каспазы-1, что указывает на то, что AFB1 не только вызывал некроз печеночной ткани, но и запускал пироптоз в гепатоцитах [10, 28].

Выявленные различия в наблюдаемых эффектах от ранее проведенных исследований могут быть вызваны различной токсичностью исследуемых микотоксинов, их сочетанным воздействием, высокими дозами и видом животных.

ВЫВОДЫ / CONCLUSION

Наиболее эффективным в снижении токсического действия T-2 токсина, зearаленона и афлатоксина B₁ по параметрам ингибирования экспрессии генов провоспалительных цитокинов в селезенке оказался профилактический комплекс, включающий галлуазит, метионин, β -глюканы, шрот расторопши.

Защитный эффект разработанной нами композиции можно объяснить сорбционными, антиоксидантными, иммуномодулирующими, гепатопротекторными свойствами, входящими в ее состав компонентов.

Полученные данные свидетельствуют о том, что разработанный в ФГБНУ «ФЦТРБ-ВНИВИ» профилактический комплекс является перспективным и требует дальнейшего изучения в качестве средства профилактики смешанных микотоксикозов у продуктивных животных. Разработанные комплексы не оказывали негативного влияния на индукцию провоспалительных цитокинов при добавлении их к основному рациону с целью изучения безвредности.

Выполнение текущего исследования позволило подобрать генетические маркеры провоспалительных цитокинов и апробировать их на биологических образцах животных, что является основой для выявления метаболического ответа при ис-

следовании воздействия микотоксинов на организм животных, и определения эффективности профилактики и терапии микотоксикозов. Интеграция этого подхода в профилактические стратегии имеет значительные перспективы для снижения негативного воздействия микотоксинов.

STUDY OF THE PROTECTIVE POTENTIAL OF MEANS FOR THE PREVENTION OF COMBINED MYCOTOXICOSIS BY ASSESSING THE EXPRESSION OF PROINFLAMMATORY CYTOKINES IN RATS

Tarasova E.Yu. * – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Veterinary Sanitation (ORCID 0000-0002-9056-5798)

Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety

* evgenechka1885@gmail.com

Funding: *This work was supported by a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan to higher education institutions, research organizations, and other organizations to support human resource development plans to encourage their research and teaching staff to defend doctoral dissertations and conduct research. (Agreement No. 4/2025-PD-VNIVI, dated December 22, 2025)*

ABSTRACT

Mycotoxins are common contaminants in animal feed. The most common mycotoxins in animal feed include zearalenone, T-2 toxin, deoxynivalenol, aflatoxins, and others. This article examined the molecular mechanism of the combined effects of T-2 toxin, aflatoxin B₁, and zearalenone. The aim of this study was to investigate the effect of a mycotoxin complex on the expression level of proinflammatory cytokines (IL-1 β , IL-6, IFN- γ) mRNA in the spleen of white rats and to evaluate the protective potential of the developed complex agents to reduce the induction of inflammatory processes. The experiments were conducted on 80 white rats. To reproduce mycotoxicosis, animals received crystalline mycotoxins with their ba-

sal diet for 21 days: aflatoxin B1 - 2.5 mg/kg; T-2 toxin - 5 mg/kg; zearalenone - 2.0 mg/kg of feed. Three formulations of prophylactic complexes with sorption, antioxidant, hepatoprotective and immunomodulatory properties were used as protective agents. Expression of mRNA of proinflammatory cytokines (IL-1 β , IL-6, IFN γ) was determined by quantitative real-time PCR in spleen samples. Gene expression was assessed based on the number of cDNA copies in the studied material, normalizing the indicator relative to the number of DNA copies in the same sample. It was found that associated exposure to mycotoxins causes increased expression of proinflammatory cytokine genes at the mRNA level in the spleen. The developed complexes modulated the production of proinflammatory cytokines. The prophylactic complex based on halloysite, silymarin, β -glucans, and methionine demonstrated the most pronounced immunomodulatory potential. The obtained data indicate that this prophylactic complex is promising and requires further study as a means of preventing mixed mycotoxicoses in food-producing animals.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gasperini, A. M. Unravelling the impact of mycotoxins on gut health: implications for inflammatory bowel disease / A. M. Gasperini, D. Faccenda, E. Garcia-Cela // *Current Opinion in Food Science*. – 2025. – Vol. 64. – 101316. – <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101316>.
2. Оценка общей токсичности кормов республики Татарстан / З. Х. Сагдеева, О. К. Ермолаева, А. Р. Валиев [и др.] // *Ветеринарный врач*. – 2020. – № 5. – С. 59-65. – <https://doi.org/10.33632/1998-698X.2020-5-59-65>.
3. Поиск эффективных адсорбентов Т-2 токсина / Е. Ю. Тарасова, Э. И. Семенов, А. Р. Валиев, Л. Е. Матросова // *Вестник Марийского государственного университета. Серия: Сельскохозяйственные науки. Экономические науки*. – 2019. – Т. 5, № 3(19). – С. 322-329. – <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2019-5-3-322-328>.
4. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25% / M. Eskola, G. Kos, C. T. Elliott [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2020. – Vol. 60 (16). – P. 2773–2789. – <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>.
5. Detriment of mycotoxin contamination in feed and nutrition-based prevention and control strategies: A review / S. Fan, K. Teng, J. Li [et al.] // *Toxicon*. – 2026. – Vol. 273. – 108996. – <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2026.108996>.
6. Эффективность энтеросорбентов различной природы при полимикотоксикозе свиней / Н. Н. Мишина, Э. И. Семенов, А. Ф. Хасиятуллин [и др.] // *Ветеринария*. – 2020. – № 11. – С. 49-53. – <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2020.23.11.49-53>.
7. Бурдов, Л. Г. О результатах анализа кормов на содержание микотоксинов / Л. Г. Бурдов, Л. Е. Матросова // *Ветеринарный врач*. – 2011. – № 2. – С. 7-9.
8. Влияние комбинированного действия микотоксинов и ионизирующего излучения на аллергическую сенсibilизацию / Э. И. Семенов, Н. Н. Мишина, А. Р. Валиев [и др.] // *Ветеринарный врач*. – 2023. – № 2. – С. 60-69. – https://doi.org/10.33632/1998-698X_2023_2_60.
9. Диагностика и ветеринарная помощь при отравлениях животных : (Общие принципы) / А. М. Трemasова, И. И. Идиятов, Э. И. Семенов [и др.]. – Казань : Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности, 2022. – 236 с.
10. Utilizing lemon peel extract and its nano-emulsion to control aflatoxin toxicity in rats / B. A. Sabry, A. N. Badr, K. A. Ahmed [et al.] // *Food Bioscience*. – 2022. – Vol. 50. – 101998. – <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101998>.
11. An update on T2-toxins: metabolism, immunotoxicity mechanism and human assessment exposure of intestinal microbiota / J. Zhang, X. Liu, Y. Su, T. Li // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8. – e10012. – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10012>.
12. Baicalin protects against zearalenone-

- induced chicks liver and kidney injury by inhibiting expression of oxidative stress, inflammatory cytokines and caspase signaling pathway / J. Xu, S. Li, L. Jiang [et al.] // *International Immunopharmacology*. – 2021. – Vol. 100. – 108097. – <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2021.108097>.
13. Review: Strategies and technologies in preventing regulated and emerging mycotoxin co-contamination in forage for safeguarding ruminant health / A. Gallo, A. Catellani, F. Ghilardelli [et al.] // *Animal*. – 2024. – Vol. 18. – 101280. – <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101280>.
14. Editorial: Predicting, managing, and minimizing mycotoxicosis in farm animals / J.A. Maguey-González, J.D. Latorre, S. Gomez-Rosales, A. Mendez-Albores // *Front. Fungal Biol.* – 2024. – Vol. 5. – 1519411. – <https://doi.org/10.3389/ffunb.2024.1519411>.
15. Evaluation of Untargeted Metabolomic and Mycotoxin Profiles in Corn Silage and High-Moisture Corn / M. Lapris, V. Novara, M. Masseroni [et al.] // *Toxins (Basel)*. – 2025. – Vol. 17(5). – 214. <https://doi.org/10.3390/toxins17050214>.
16. Proinflammatory cytokines interleukin-18 and interleukin-6 mediate anorexia induction by trichothecene deoxynivalenol and its congeners / C. Zhou, Z. Qin, H. Zhang [et al.] // *Front. Vet. Sci.* – 2024. – Vol. 11. – 1521424. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1521424>.
17. The flavonoid chrysin protects against zearalenone induced reproductive toxicity in male mice / L. Del Fabbro, C.R. Jesse, M.G. de Gomes [et al.] // *Toxicol.* – 2019. – Vol. 165. – P. 13-21.
18. Fungi and mycotoxin types, toxicity, mechanisms, and control of mycotoxin contamination: a review / Z. Zhang, X. Qi, Y. Wang [et al.] // *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess.* – 2025. – Vol. 42(12). – P. 1692-1716. – <https://doi.org/10.1080/19440049.2025.2575980>.
19. Mycotoxin Contamination: Occurrence, Biotransformation, Pathogenic Mechanisms, and Strategies for Nutritional Intervention / C. Yao, M. Ye, C. Wang [et al.] // *Molecules*. – 2025. – Vol. 30(19). – P. 3860. <https://doi.org/10.3390/molecules30193860>.
20. Effects of lipoic acid on immune function, anti-oxidant defense system, and inflammation-related gene expression in broiler chickens fed aflatoxin-contaminated diets / Y. Li, Q. Ma, L. Zhao [et al.] // *Int. J. Mol. Sci.* – 2014. – Vol. 15. – P. 5649-5662.
21. The effectiveness of a feed additive with galloisite in rat mycotoxicosis / E. Tarasova, L. Matrosova, G. Kashevarov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 548. – 02014. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454802014>.
22. Efficiency of the complex mycotoxin adsorbent "Galluasorb" in combined mycotoxicosis of pigs / E. Tarasova, L. Matrosova, S. Tanaseva [et al.] // *Bio Web of Conferences : International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024)*. – 2024. – 07019. – <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413007019>.
23. Normalization of SARS-CoV-2 viral load via RT-qPCR provides higher-resolution data for comparison across time and between patients / W.T. Porter, E.J. Kelley, J.R. Bowers, D.M. Engelthaler // *Virus Res.* – 2021. – Vol. 306. – 198604. – <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2021.198604>.
24. Droplet digital PCR of viral DNA/RNA, current progress, challenges, and future perspectives / A.A. Kojabad, M. Farzanehpour, H.E.G. Galeh [et al.] // *J. Med. Virol.* – 2021. – Vol. 93(7). – P. 4182-4197. – <https://doi.org/10.1002/jmv.26846>.
25. Zearalenone mycotoxin affects immune mediators, MAPK signalling molecules, nuclear receptors and genome-wide gene expression in pig spleen / G.C. Pistol, B. Craicu, M. Motiu [et al.] // *PLoS One*. – 2015. – № 10 (5). – 0127503. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone>.
26. Effect of zearalenone on calcium homeostasis of splenic lymphocytes of chickens in vitro / Y.C. Wang, J.L. Deng, S.W. Xu [et al.] // *Poultry Science*. 2012. – Vol. 91. – P. 1956–1963.
27. Zearalenone affects immune-related parameters in lymphoid organs and serum of

- rats vaccinated with porcine parvovirus vaccine / B.K. Choi, J.H. Cho, S.H. Jeong [et al.] // *Toxicological research*. – 2012. – Vol. 28. – P. 279-288. – <https://doi.org/10.5487/TR.2012.28.4.279>.
28. Inhibition of aflatoxin B1-induced murine hepatocyte pyroptosis by *Bacillus amyloliquefaciens* by activation of the Nrf2/HO-1 pathway / J. Wang, Y. Zhao, Y. Zhou [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2025. – Vol. 302. – 118688. – <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118688>.
29. Can plant phenolic compounds alleviate toxic effects induced by mycotoxins? A narrative review / M.K.M. Evangelista da Costa, L. Schmidt, J. E. Welke, P. R. Augusti // *Food Bioscience*. – 2025. – Vol. 71. – 107339. – <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107339>.
30. Immunotoxic effect and mechanisms of *Fusarium* mycotoxins on human immune cells: A focus on T cells and macrophages / J. Yang, X. Wang, Q. Zhang [et al.] // *Toxicology*. – 2025. – Vol. 515. – 154170. – <https://doi.org/10.1016/j.tox.2025.154170>.
31. Review article: Recent advances in enzyme technologies for mitigating mycotoxin contamination in poultry feed / C. Gruber-Dorninger, M. Aleschko, A. Höbartner-Gußl [et al.] // *Journal of Applied Poultry Research*. – 2025. – Vol. 34. – 100544. – <https://doi.org/10.1016/j.japr.2025.100544>.
- REFERENCES**
1. Gasperini, A. M Unravelling the impact of mycotoxins on gut health: implications for inflammatory bowel disease / A. M. Gasperini, D. Faccenda, E. Garcia-Cela // *Current Opinion in Food Science*. – 2025. – Vol. 64. – 101316. – <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2025.101316>.
2. Assessment of the general toxicity of feed in the Republic of Tatarstan / Z. Kh. Sagdeeva, O. K. Ermolaeva, A. R. Valiev [et al.] // *The Veterinarian*. – 2020. – No. 5. – P. 59-65. – <https://doi.org/10.33632/1998-698X.2020-5-59-65>. (In Russ.)
3. Search for effective adsorbents of T-2 toxin / E. Yu. Tarasova, E. I. Semenov, A. R. Valiev, L. E. Matrosova // *Bulletin of the Mari State University. Series: Agricultural Sciences. Economic Sciences*. – 2019. – Vol. 5, No. 3 (19). – P. 322-329. – <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2019-5-3-322-328>. (In Russ.)
4. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: Validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25% / M. Eskola, G. Kos, C. T. Elliott [et al.] // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. – 2020. – Vol. 60 (16). – P. 2773-2789. – <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1658570>.
5. Detriment of mycotoxin contamination in feed and nutrition-based prevention and control strategies: A review / S. Fan, K. Teng, J. Li [et al.] // *Toxicon*. – 2026. – Vol. 273. – 108996. – <https://doi.org/10.1016/j.toxicon.2026.108996>.
6. The effectiveness of enterosorbents of various natures in polymycotoxicosis of pigs / N. N. Mishina, E. I. Semenov, A. F. Khasiyatullin [et al.] // *Veterinary Medicine*. – 2020. – No. 11. – P. 49-53. – <https://doi.org/10.30896/0042-4846.2020.23.11.49-53>. (In Russ.)
7. Burdov, L. G. On the results of the analysis of feed for the content of mycotoxins / L. G. Burdov, L. E. Matrosova // *The Veterinarian*. – 2011. – No. 2. – P. 7-9. (In Russ.)
8. The influence of the combined action of mycotoxins and ionizing radiation on allergic sensitization / E. I. Semenov, N. N. Mishina, A. R. Valiev [et al.] // *The Veterinarian*. – 2023. – No. 2. – P. 60-69. – https://doi.org/10.33632/1998-698X_2023_2_60. (In Russ.)
9. The influence of the combined action of mycotoxins and ionizing radiation on allergic sensitization / E. I. Semenov, N. N. Mishina, A. R. Valiev [et al.] // *The Veterinarian*. – 2023. – No. 2. – P. 60-69. (In Russ.)
10. Utilizing lemon peel extract and its nano-emulsion to control aflatoxin toxicity in rats / B. A. Sabry, A. N. Badr, K. A. Ahmed [et al.] // *Food Bioscience*. – 2022. – Vol. 50. – 101998. – <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101998>.
11. An update on T2-toxins: metabolism, immunotoxicity mechanism and human assessment exposure of intestinal microbiota / J. Zhang, X. Liu, Y. Su, T. Li // *Heliyon*. –

2022. – Vol. 8. – e10012. – <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10012>.
12. Baicalin protects against zearalenone-induced chicks liver and kidney injury by inhibiting expression of oxidative stress, inflammatory cytokines and caspase signaling pathway / J. Xu, S. Li, L. Jiang [et al.] // *International Immunopharmacology*. – 2021. – Vol. 100. – 108097. – <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2021.108097>.
13. Review: Strategies and technologies in preventing regulated and emerging mycotoxin co-contamination in forage for safeguarding ruminant health / A. Gallo, A. Catellani, F. Ghilardelli [et al.] // *Animal*. – 2024. – Vol. 18. – 101280. – <https://doi.org/10.1016/j.animal.2024.101280>.
14. Editorial: Predicting, managing, and minimizing mycotoxicosis in farm animals / J.A. Maguey-González, J.D. Latorre, S. Gomez-Rosales, A. Mendez-Albores // *Front. Fungal Biol.* – 2024. – Vol. 5. – 1519411. – <https://doi.org/10.3389/ffunb.2024.1519411>.
15. Evaluation of Untargeted Metabolomic and Mycotoxin Profiles in Corn Silage and High-Moisture Corn / M. Lapris, V. Novara, M. Masseroni [et al.] // *Toxins (Basel)*. – 2025. – Vol. 17(5). – 214. <https://doi.org/10.3390/toxins17050214>.
16. Proinflammatory cytokines interleukin-18 and interleukin-6 mediate anorexia induction by trichothecene deoxynivalenol and its congeners / C. Zhou, Z. Qin, H. Zhang [et al.] // *Front. Vet. Sci.* – 2024. – Vol. 11. – 1521424. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1521424>.
17. The flavonoid chrysin protects against zearalenone induced reproductive toxicity in male mice / L. Del Fabbro, C.R. Jesse, M.G. de Gomes [et al.] // *Toxicol.* – 2019. – Vol. 165. – P. 13-21.
18. Fungi and mycotoxin types, toxicity, mechanisms, and control of mycotoxin contamination: a review / Z. Zhang, X. Qi, Y. Wang [et al.] // *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess.* – 2025. – Vol. 42(12). – P. 1692-1716. – <https://doi.org/10.1080/19440049.2025.2575980>.
19. Mycotoxin Contamination: Occurrence, Biotransformation, Pathogenic Mechanisms, and Strategies for Nutritional Intervention / C. Yao, M. Ye, C. Wang [et al.] // *Molecules*. – 2025. – Vol. 30(19). – P. 3860. <https://doi.org/10.3390/molecules30193860>.
20. Effects of lipoic acid on immune function, anti-oxidant defense system, and inflammation-related gene expression in broiler chickens fed aflatoxin-contaminated diets / Y. Li, Q. Ma, L. Zhao [et al.] // *Int. J. Mol. Sci.* – 2014. – Vol. 15. – P. 5649-5662.
21. The effectiveness of a feed additive with galloisite in rat mycotoxicosis / E. Tarasova, L. Matrosova, G. Kashevarov [et al.] // *E3S Web of Conferences*. – 2024. – Vol. 548. – 02014. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454802014>.
22. Efficiency of the complex mycotoxin adsorbent "Galluasorb" in combined mycotoxicosis of pigs / E. Tarasova, L. Matrosova, S. Tanaseva [et al.] // *Bio Web of Conferences : International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2024)*. – 2024. – 07019. – <https://doi.org/10.1051/bioconf/202413007019>.
23. Normalization of SARS-CoV-2 viral load via RT-qPCR provides higher-resolution data for comparison across time and between patients / W.T. Porter, E.J. Kelley, J.R. Bowers, D.M. Engelthaler // *Virus Res.* – 2021. – Vol. 306. – 198604. – <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2021.198604>.
24. Droplet digital PCR of viral DNA/RNA, current progress, challenges, and future perspectives / A.A. Kojabad, M. Farzanehpour, H.E.G. Galeh [et al.] // *J. Med. Virol.* – 2021. – Vol. 93(7). – P. 4182-4197. – <https://doi.org/10.1002/jmv.26846>.
25. Zearalenone mycotoxin affects immune mediators, MAPK signalling molecules, nuclear receptors and genome-wide gene expression in pig spleen / G.C. Pistol, B. Craicu, M. Motiu [et al.] // *PLoS One*. – 2015. – № 10 (5). – 0127503. – <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127503>.
26. Effect of zearalenone on calcium homeostasis of splenic lymphocytes of chickens in vitro / Y.C. Wang, J.L. Deng, S.W. Xu [et al.] // *Poultry Science*. 2012. – Vol. 91. – P.

1956–1963.

27. Zearalenone affects immune-related parameters in lymphoid organs and serum of rats vaccinated with porcine parvovirus vaccine / B.K. Choi, J.H. Cho, S.H. Jeong [et al.] // *Toxicological research*. – 2012. – Vol. 28. – P. 279–288. – <https://doi.org/10.5487/TR.2012.28.4.279>.

28. Inhibition of aflatoxin B1-induced murine hepatocyte pyroptosis by *Bacillus amyloliquefaciens* by activation of the Nrf2/HO-1 pathway / J. Wang, Y. Zhao, Y. Zhou [et al.] // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2025. – Vol. 302. – 118688. – <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118688>.

29. Can plant phenolic compounds alleviate toxic effects induced by mycotoxins? A nar-

rative review / M.K.M. Evangelista da Costa, L. Schmidt, J. E. Welke, P. R. Augusti // *Food Bioscience*. – 2025. – Vol. 71. – 107339. – <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107339>.

30. Immunotoxic effect and mechanisms of *Fusarium* mycotoxins on human immune cells: A focus on T cells and macrophages / J. Yang, X. Wang, Q. Zhang [et al.] // *Toxicology*. – 2025. – Vol. 515. – 154170. – <https://doi.org/10.1016/j.tox.2025.154170>.

31. Review article: Recent advances in enzyme technologies for mitigating mycotoxin contamination in poultry feed / C. Gruber-Dorninger, M. Aleschko, A. Höbartner-Gußl [et al.] // *Journal of Applied Poultry Research*. – 2025. – Vol. 34. – 100544. – <https://doi.org/10.1016/j.japr.2025.100544>.