

УДК 619:579.62:615.9

DOI 10.30914/2411-9687-2025-11-2-110-117

**ЗАМАСКИРОВАННЫЕ МИКОТОКСИНЫ:
МЕТАБОЛИЗМ И ТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ (ОБЗОР)****Ф. Р. Вафин, Э. И. Семёнов, Н. Н. Мишина, А. М. Сайфутдинов***Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности,
г. Казань, Российская Федерация*

Аннотация. Введение. Замаскированные микотоксины, которые изменяют свою структуру в растениях, трудно выявить с помощью традиционных методов. Некоторые из них, например, иммуноферментный анализ, могут обнаруживать замаскированные формы, в то время как другие, такие как высокоэффективная жидкостная хроматография, не всегда эффективны. В процессе переработки продуктов микотоксины могут изменяться, и многие из новых соединений оказываются менее токсичными. Однако для анализа замаскированных микотоксинов требуется специальная подготовка, что может привести к недооценке общего содержания микотоксинов в образцах. **Целью** данной работы являлось всестороннее исследование научных трудов отечественных и зарубежных авторов, посвященных актуальным проблемам замаскированных микотоксинов, их источникам, механизмам действия и влиянию на здоровье человека и животных. **Материалы и методы.** Методологической базой исследований стали научные труды отечественных и иностранных ветеринарных специалистов, которые специализируются в области токсикологии. **Результаты исследований, обсуждение.** По мнению многих авторов, проведенные исследования позволяют сделать вывод, что в настоящее время отсутствуют токсикокинетические и токсикодинамические исследования, позволяющие адекватно оценить опасность или риск, связанные с замаскированными микотоксинами по сравнению с их исходными формами. Хотя некоторые из изученных веществ имеют низкую общую токсичность, повышенная биодоступность и возможность частичной реактивации замаскированных микотоксинов в процессе пищеварения у млекопитающих могут представлять угрозу для здоровья. **Заключение.** Можно сделать вывод, что в настоящее время не существует токсикокинетических и токсикодинамических исследований, которые позволили бы оценить опасность или риск, связанные с замаскированными микотоксинами, по сравнению с исходными микотоксинами. Несмотря на низкую общую токсичность нескольких исследованных веществ, возможно, повышенная биодоступность и частичная реактивация замаскированных микотоксинов во время пищеварения у млекопитающих по-прежнему представляют угрозу для здоровья.

Ключевые слова: замаскированные микотоксины, микотоксикозы, контаминированные корма, конъюгированные формы, адсорбция, зеараленон, фумонизин В1, охратоксин А, Т-2 токсин

Благодарности. Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан». (Соглашение от 16.12.2024 № 157/2024-ПД).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Замаскированные микотоксины: метаболизм и токсикологическое значение (обзор) / Ф. Р. Вафин, Э. И. Семёнов, Н. Н. Мишина, А. М. Сайфутдинов // Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки». 2025. Т. 11. № 2. С. 110–117. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2025-11-2-110-117>

MASKED MYCOTOXINS: METABOLISM AND TOXICOLOGICAL SIGNIFICANCE (REVIEW)**F. R. Vafin, E. I. Semenov, N. N. Mishina, A. M. Saifutdinov***Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety, Kazan, Russian Federation*

Abstract. Introduction. Masked mycotoxins that change their structure in plants are difficult to detect using traditional methods. Some of them, such as enzyme immunoassay, can detect masked forms, while others, such as

high-performance liquid chromatography, are not always effective. Mycotoxins can change during food processing, and many of the new compounds are less toxic. However, the analysis of masked mycotoxins requires special preparation, which can lead to an underestimation of the total mycotoxin content in the samples. The aim of this work is a comprehensive study of scientific papers by domestic and foreign authors devoted to the current problems of masked mycotoxins, their sources, mechanisms of action and impact on human and animal health. **Materials and methods.** The methodological basis of the research was the scientific works of domestic and foreign veterinary specialists who specialize in the field of toxicology. **Results, discussion.** According to many authors, the studies conducted allow us to conclude that there are currently no toxicokinetic and toxicodynamic studies that would allow us to adequately assess the hazard or risk associated with masked mycotoxins compared to their original forms. Although some of the substances studied have low overall toxicity, the increased bioavailability and the possibility of partial reactivation of masked mycotoxins during digestion in mammals may pose a health threat. **Conclusion.** It can be concluded that there are currently no toxicokinetic and toxicodynamic studies that would allow us to assess the hazard or risk associated with masked mycotoxins compared to their original mycotoxins. Despite the low overall toxicity of several of the substances studied, it is possible that the increased bioavailability and partial reactivation of masked mycotoxins during digestion in mammals still pose a health threat.

Key words: masked mycotoxins, mycotoxicoses, contaminated feed, conjugated forms, adsorption, zearalenone, fumonisin B1, ochratoxin A, T-2 toxin

Acknowledgements. The work was carried out at the expense of a grant from the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, provided to young candidates of sciences (postdoctoral students) in order to defend their doctoral dissertations, carry out research work, and perform their work functions in scientific and educational organizations of the Republic of Tatarstan as part of the State Program of the Republic of Tatarstan "Scientific and Technological Development of the Republic of Tatarstan". (Agreement dated 16.12.2024 No. 157/2024-PD).

The authors declare no conflict of interest.

For citation: Vafin F. R., Semenov E. I., Mishina N. N., Saifutdinov A. M. Masked mycotoxins: metabolism and toxicological significance (review). *Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics"*, 2025, vol. 11, no. 2, pp. 110–117. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2025-11-2-110-117>

Введение

Опасность для здоровья, связанная с продуктами питания, может возникать из-за инфекционных агентов и токсичных соединений. Микроорганизмы, попадающие в организм с пищей, могут вызывать заболевания, а токсичные вещества приводят к отравлениям и долгосрочным негативным последствиям. Химические загрязнители поступают из различных источников, включая непреднамеренные загрязнители и токсичные метаболиты растений. Хотя оценить влияние этих веществ сложно, существуют меры по ограничению воздействия синтетических соединений, таких как пестициды, которые требуют токсикологической оценки. Природные токсины, включая микотоксины, представляют собой вторичные метаболиты, вырабатываемые грибами, и могут быть более опасными, чем искусственные добавки.

Замаскированные микотоксины, которые изменяют свою структуру в растениях, сложно обнаружить традиционными методами. Некоторые методы, такие как иммуноферментный анализ,

могут реагировать на замаскированные формы, в то время как другие, основанные на высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) – нет. При переработке продуктов микотоксины могут изменяться, и большинство образующихся соединений менее токсичны. Замаскированные микотоксины требуют специальной обработки для анализа, и их наличие может приводить к недооценке общего содержания микотоксинов в образцах.

Некоторые преобразования микотоксинов могут снижать их токсичность, что следует рассматривать как детоксикацию. Оценка токсичности всех форм микотоксинов важна для оценки рисков для здоровья. Необходимы новые методы анализа, которые будут учитывать замаскированные формы, чтобы обеспечить защиту потребителей. Признание токсикологической значимости замаскированных микотоксинов может способствовать разработке общих показателей токсичности для регулирующих органов и производителей продуктов питания.

Целью данной работы являлось обобщение имеющихся на сегодняшний день знаний об определении, распространении, токсичности и воздействии замаскированных микотоксинов.

Материалы и методы

В ходе данного обзорного исследования была осуществлена систематическая оценка литературы, посвященной замаскированным микотоксинам и их воздействию на здоровье как человека, так и животных. Для анализа собранных данных использовались методы тематического анализа, что позволило выявить ключевые направления и тенденции в исследованиях, связанных с замаскированными микотоксинами.

Результаты исследования, обсуждение

Замаскированный дезоксиниваленол. Известно, что зерновые культуры, зараженные грибами, вырабатывающими ДОН, способны обезвреживать данный микотоксин. В этом контексте одним из основных путей является конъюгация дезоксиниваленола (ДОН) с глюкозой, в результате чего образуется дезоксиниваленол-3-глюкозид (ДЗГ), который был выделен из зараженной пшеницы. Ацетилированные производные ДОН, 3-ацетил-ДОН (ЗАДОН) и 15-ацетил-ДОН (15АДОН), которые, как правило, встречаются вместе с ДОН, особенно в зерновых культурах, обычно считаются метаболитами, вырабатываемыми грибами.

До сих пор считалось, что ДЗГ содержится в пшенице, кукурузе (зернах), ячмене, солоде. В публикации [1] представлены данные по зерновым культурам, показывающие, что относительная доля ДЗГ по отношению к ДОН довольно стабильна и в среднем составляет около 20 % в рассмотренных образцах зерновых культур. Однако соотношение ДЗГ:ДОН варьировалось в зависимости от года и генотипа, но достигало 46 % и даже 70 %. С помощью более чувствительного метода было обнаружено, что 80 % из 116 проанализированных образцов муки содержат ДЗГ в концентрации от 5 до 72 мкг/кг. Интересно, что авторы сообщили, что в некоторых образцах пшеницы содержание ДЗГ было значительно выше (до 2,7 раз) по сравнению с ДОН.

Есть основания полагать, что ДЗГ может высвобождаться в процессе обработки пищевых продуктов в результате ферментативной деградации полисахаридов. Например, было показано,

что уровень ДЗГ повышается после соложения ячменных зерен, и загрязнитель попадает в пиво. Хотя уровень ДЗГ в зернах был ниже предела обнаружения, он повышался в процессе прорастания, что приводило к накоплению конъюгата ДОН в зародыше. Этот «отход» процесса солодоращения используется в кормовой промышленности и при производстве пищевых добавок из-за высокого содержания белка. Некоторые предварительные данные также указывают на присутствие в пиве ди- и триглицозилованных форм ДОН, которые считаются продуктами распада олигоглицозилованных предшественников [2]. Однако ДОН, присоединенный более чем к одному сахаридному остатку, до сих пор не был систематически проанализирован, и поэтому его вклад в общее содержание ДОН неясен. Предварительные данные в этом контексте были получены после количественного определения замаскированного ДОН в образцах ячменя, зараженного естественным путем, с помощью процедуры кислотного гидролиза [3]. В 18 проанализированных образцах содержание маскированного ДОН составляло от 6 до 21 % от общего содержания ДОН. Кроме того, для определения содержания маскированного ДОН в образцах кукурузы и пшеницы методом иммуоферментного анализа [4] был применен кислотный гидролиз. После гидролиза содержание ДОН в кукурузе и пшенице увеличилось на 7–75 %. Это увеличение нельзя объяснить присутствием 3-амино-ДОН и 15-амино-ДОН. В ходе последующего исследования 72 из 86 образцов кукурузы были проанализированы на наличие замаскированного ДОН [2]. Среднее увеличение содержания ДОН после гидролиза трифторметансульфоновой кислотой составило 14 %.

Недавно в пшеничных зернах, искусственно зараженных грибами *Fusarium*, был впервые обнаружен новый глюкозид микотоксина *Fusarium* – фузаренон-Х-глюкозид. В том же образце зерна был обнаружен еще один глюкозид микотоксина – ниваленол-глюкозид. По оценкам авторов, более 15 % фузаренона-Х и ниваленола были преобразованы в соответствующие глюкозиды.

Замаскированный зеараленон. Зеараленон, эстрогенное соединение, вырабатываемое несколькими видами *Fusarium* во время заражения мелкозерновых злаков и кукурузы, эффективно преобразуется в свой глюкозный конъюгат

в инфицированных тканях растений. Культуры клеточных суспензий кукурузы могут модифицировать зеараленон (ЗЕН) после его преобразования в метаболиты первой фазы, α -зеараленон и β -зеараленон (β -ЗЕН), и вырабатывать глюкозные конъюгаты соответствующих соединений, особенно зеараленон-14-глюкозид (314Г). *Arabidopsis thaliana* может преобразовывать ЗЕН и его метаболиты во множество извлекаемых конъюгированных соединений, включая глюкозиды, малонилглюкозиды, дигексозиды и пентозилгексозиды.

На сегодняшний день лишь несколько исследований продемонстрировали наличие этих метаболитов в сельскохозяйственных культурах. Исследование 10 образцов зерна пшеницы показало, что относительная доля 314Г по отношению к ЗЕН в среднем составляет около 27 % [5]. В ходе исследования содержания экстрагируемых конъюгированных микотоксинов *Fusarium* в сырье и готовой продукции на основе злаков ни в одном из 84 проанализированных продуктов на основе злаков не было обнаружено 314Г, α -зеараленон (α -ЗЕЛ) или β -зеараленон (β -ЗЕЛ), α -зеараленон-14- β -Д-глюкопиранозид (α -ЗЕЛГ) или β -зеараленон-14- β -Д-глюкопиранозид (β -ЗЕЛГ). Однако зеараленон-14-сульфат (314С) был обнаружен в различных продуктах (пшеничной муке, цельнозерновом пшеничном хлебе, кукурузной муке, хлопьях из отрубей, мюсли), хотя и в низких концентрациях, при этом наибольшее количество – 6,1 мкг/кг – было обнаружено в хлопьях из отрубей [6]. Тридцать образцов различных продуктов питания и кормов, включая кукурузу, пшеницу, овес, кукурузные хлопья и хлеб, были проанализированы на содержание ЗЕН, α - и β -ЗЕЛ, 314Г, α -ЗЕЛГ, β -ЗЕЛГ, 314С. Содержание ЗЕН в продуктах питания и кормах составило 80 %. α -ЗЕЛ и β -ЗЕЛ, соответственно, были обнаружены в 53 и 63 % образцов. 314Г был обнаружен в девяти образцах в концентрации от следов до 274 мкг/кг. В одном образце кукурузы совместное присутствие 314Г (274 мкг/кг), 314С (51 мкг/кг), β -ЗЕЛС (92 мкг/кг) и относительно низкое содержание ЗЕЛ (59 мкг/кг) позволяет предположить, что примерно 90 % доступного ЗЕН было метаболизировано [7].

Замаскированный фумонизин. В нескольких исследованиях сообщалось о наличии замаскированных фумонизинов в продуктах питания, которые можно определить только после проведения гидролиза. В частности, было замечено,

что после щелочного гидролиза загрязненных кукурузных продуктов (например, экструдированных продуктов, таких как кукурузные хлопья) количество высвобожденного фумонизина часто превышало допустимые нормы.

Несколько авторов сообщали о возможности образования ковалентных связей между трикарбосильным фрагментом и гидроксильными группами углеводов или аминокислотами аминокислот при нагревании [8]. Однако другое явление маскировки, основанное на вероятном физическом встраивании микотоксинов в структуру макромолекулярных компонентов (таких как крахмал) [9], может сильно влиять на точность измерения фумонизина. Таким образом, при оценке наличия замаскированных фумонизинов следует учитывать и другие механизмы маскировки, такие как комплексообразование или физическое связывание. Для дальнейшего изучения взаимодействия фумонизинов с матрицей сырой кукурузы была применена модель переваривания *in vitro* к сырой кукурузе и продуктам на основе кукурузы, чтобы оценить возможное высвобождение связанных фумонизинов в результате ферментативной дезагрегации матрицы [10].

Впервые о присутствии замаскированных фумонизинов в кукурузе было сообщено в 2003 году [11]. Образцы кукурузы были проанализированы на наличие как свободных фумонизинов, так и связанных с белком фумонизинов, которые были извлечены с помощью додецилсульфата натрия и измерены как гидролизованный фумонизин В1 (ФВ1) после щелочного гидролиза. В среднем после гидролиза содержание ФВ1 было в 2,6 раза выше. Аналогичный подход был применен к 30 образцам продуктов из кукурузы, прошедших термическую обработку, и во всех образцах был обнаружен связанный ФВ1 на значительном уровне. Также сообщалось о наличии связанных фумонизинов в 21 продукте без глютена на уровне концентрации, сопоставимом или превышающем концентрацию исходных форм. 97 образцов кукурузы, собранных в Италии, были проанализированы на наличие свободных и общих фумонизинов сразу после сбора урожая. Замаскированные фумонизины были обнаружены во всех образцах в концентрации от 0,05 до 40 мг/кг. Общее количество фумонизинов, полученных после щелочного гидролиза, составило от 0,05 до 69 мг/кг, что значительно выше, чем количество свободных фумонизинов в 82 из 97 образцов.

Методы определения. Для определения микотоксинов в пищевых продуктах используется большое разнообразие аналитических методов, в том числе хроматографические методы, такие как тонкослойная хроматография, газовая или жидкостная хроматография, а также иммунохимические методы, такие как иммуноферментный анализ. Иммунохимические методы могут реагировать более чем на одно соединение (например, микотоксин и его производное), что приводит к единому результату. С другой стороны, хроматографические методы позволяют определить каждое соединение как отдельный параметр [12].

Все аналитические методы, применимые к исходным микотоксинам, потенциально подходят и для их конъюгированных форм. Однако здесь следует подчеркнуть, что для анализа доступны только растворимые анализируемые вещества. Замаскированные формы не могут быть обнаружены без обработки образцов, которая превращает их в растворимые формы, в то время как растворимые конъюгированные формы можно определить после экстракции типичными растворителями, используемыми при определении микотоксинов. Существует несколько методов преобразования метаболитов микотоксинов в их исходные формы. После гидролиза любой метод, позволяющий определить исходные микотоксины, можно расширить, включив в него метаболиты микотоксинов, даже если аналитические стандарты для конъюгированных форм недоступны. Недостатком косвенных методов является то, что эффективность гидролиза можно оценить только путем мониторинга остаточных сигналов структурно идентифицированных конъюгатов микотоксинов после гидролиза. Кроме того, эти методы не позволяют различать разные конъюгаты одного и того же исходного токсина [13].

Токсикологические аспекты. Поскольку замаскированные токсины представляют собой новую проблему, неудивительно, что по большинству типов токсикологических исследований, таких как генотоксичность, краткосрочная и долгосрочная токсичность, включая канцерогенность, исследования репродукции и развития, данные недоступны. Известно, что конъюгация представляет собой процесс детоксикации, в связи с чем представляется вероятным, что конъюгированные микотоксины проявляют более низкую острую токсичность по сравнению с их исходными соединениями. Это подтверждается данными для

D14Г, которые показали резко сниженную способность ингибировать синтез белка рибосом пшеницы *in vitro* по сравнению с ДОН. Кроме того, 314Г обладает гораздо меньшей эстрогенной активностью по сравнению с ЗЕН 16 [14]. До сих пор не проводилось конкретных исследований биодоступности замаскированных микотоксинов. Основываясь на имеющихся знаниях о микотоксинах и всасывании ксенобиотиков, можно предположить, что конъюгация может изменить их биодоступность. Этот вопрос особенно интересен в случае фумонизинов, которые очень плохо всасываются в исходной форме [15].

Доступно лишь несколько конкретных исследований метаболизма замаскированных микотоксинов. Авторы продемонстрировали, что 314Г расщепляется во время пищеварения, а у свиней ЗЕН расщепляется на α -ЗЕЛ и β -ЗЕЛ, которые впоследствии конъюгируются с глюкуроновой кислотой и выводятся с мочой. Судя по этим данным, вероятно, что токсическое (эстрогенное) воздействие 314Г на млекопитающих такое же, как и у ЗЕН. Поскольку биодоступность ЗЕН и без того очень высока, возможное повышение биодоступности 314Г не должно иметь значения [16; 17].

В исследованиях была описана гидролитическая судьба ДЗГ при переваривании *in vitro* [18]. Было обнаружено, что ДЗГ устойчив к соляной кислоте, что позволяет предположить, что он не будет гидролизироваться в желудке млекопитающих. Хотя цитозольная β -глюкозидаза человека также не оказывала гидролитического эффекта, несколько молочнокислых бактерий, выделенных из кишечника, таких как *Enterococcus durans*, *E. mundtii* или *Lactobacillus plantarum*, высвобождали ДОН из его гликозида. Хотя потенциальное расщепление ДЗГ во время пищеварения было доказано, необходимы исследования *in vivo*, чтобы описать высвобождение ДОН из ДЗГ в более количественном выражении. Предварительные результаты показывают, что ДЗГ частично расщепляется до ДОН, который был обнаружен вместе с его глюкуронидом в моче крыс.

До сих пор не проводилось конкретных токсикологических исследований связанных фумонизинов. Существует мало доказательств того, что фумонизины метаболизируются у животных, хотя они явно выводятся с желчью. Фумонизины выводятся в основном с фекалиями, либо в неизменном виде, либо с потерей одной или обеих боковых цепей трикарбоновых кислот [6].

Заключение

Можно сделать вывод, что в настоящее время отсутствуют адекватные токсикокинетические и токсикодинамические исследования, позволяющие оценить опасность или риск, связанные с замаскированными микотоксинами, по сравнению с исходными микотоксинами. Несмотря на то, что некоторые исследования указывают на более низкую токсичность отдельных замаскированных микотоксинов, потенциально повышенная биодоступность и частичная реактивация этих соединений во время пищеварения у млеко-

питающих по-прежнему представляют серьезную угрозу для здоровья. Особенно не хватает данных о долгосрочных эффектах, влиянии на разные возрастные группы и взаимодействия с другими загрязнителями. Необходимы дальнейшие исследования *in vivo* для всесторонней оценки токсичности, биодоступности и метаболизма замаскированных микотоксинов, а также для разработки адекватных методов оценки риска и установления соответствующих нормативных требований к их содержанию в пищевых продуктах и кормах.

1. Desmarchelier A., Seefelder W. Survey of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3- glucoside in cereal-based products by liquid chromatography electrospray ionization tandem mass spectrometry // *World Mycotoxin Journal*. 2011. № 4. Pp. 29–35. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23025486> (дата обращения: 17.02.25).
2. Deoxynivalenol, deoxynivalenol-3-glucoside, and enniatins: the major mycotoxins found in cereal-based products on the Czech market / A. Malachova, Z. Dzuman [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2011. Vol. 59. Pp. 12990–12997. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22070284> (дата обращения: 17.02.25).
3. Occurrence of free and conjugated Fusarium mycotoxins in cereal-based food / O. Vendl, C. Crews, S. MacDonald [et al.] // *Food Additives & Contaminants Part A*. 2010. Vol. 27. Pp. 1148–1152. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20496251> (дата обращения: 17.02.25).
4. Zhou B., He G. Q., Schwarz P. B. Occurrence of bound deoxynivalenol in Fusarium head blight-infected barley (*Hordeum vulgare* L.) and malt as determined by solvolysis with trifluoroacetic acid // *Journal of Food Protection*. 2008. Vol. 71. Pp. 1266–1269. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18592758> (дата обращения: 17.02.25).
5. New insights into the human metabolism of the Fusarium mycotoxins deoxynivalenol and zearalenone / B. Warth, M. Sulyok, [et al.] // *Toxicology Letters*. 2013. Vol. 220 (1). Pp. 88–94. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23623764> (дата обращения: 17.02.25).
6. Evaluation of the cytotoxic properties, gene expression profiles and secondary signalling responses of cultured cells exposed to fumonisin B1, deoxynivalenol and zearalenone mycotoxins / J. F. Wentzel, M. J. Lombard [et al.] // *Archives of Toxicology*. 2017. Vol. 91 (5). Pp. 2265–2282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1872-y>
7. Deglucosylation of zearalenone-14-glucoside in animals and human liver leads to underestimation of exposure to zearalenone in humans / Sh. Yang, H. Zhang [et al.] // *Archives of Toxicology*. 2018. Vol. 92 (9). Pp. 2779–2791. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2267-z>
8. Role of maize hybrids and their chemical composition in Fusarium infection and Fumonisin production / C. Dall'Asta, C. Falavigna, G. Galaverna [et al.] // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2012. Vol. 60. Pp. 3800–3808. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22409349> (дата обращения: 17.02.25).
9. Ponce-García N., Serna-Saldivar S. O., García-Lara S. / Fumonisin and Their Analogues in Contaminated Corn and its Processed Foods – A Review // *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2018. No. 11. Pp. 2183–2203. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1502476>
10. Difficulties in fumonisin determination: the issue of hidden fumonisins / C. Dall'Asta, M. Mangia, Berthiller [et al.] // *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2009. Vol. 395. Pp. 1335–1345. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19588126> (дата обращения: 17.02.25).
11. Variation of *Fusarium* Free, Masked, and Emerging Mycotoxin Metabolites in Maize from Agriculture Regions of South Africa / T. I. Ekwomadu, T. A. Dada, N. Nleya [et al.] // *Toxins*. 2020. No. 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins12030149>
12. Preparation and characterization of the conjugated Fusarium mycotoxins zearalenone-4O-beta-D-glucopyranoside, alpha-zearalenol-4O-beta-D-glucopyranoside and betazearalenol-4O-beta-D-glucopyranoside by MS/MS and twodimensional NMR / F. Berthiller, C. Hametner [et al.] // *Food Additives and Contaminants*. 2009. Vol. 26. Pp. 207–213. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19680891> (дата обращения: 17.02.25).
13. Molecular Regulation of Fungal Secondary Metabolism / W. Yu, R. Pei [et al.] // *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2023. Vol. 39. No. 8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03649-6>
14. Ветеринарно-санитарная оценка качества и безопасности молока коров при использовании в рационе кормовой добавки «Экофит» / С. Ю. Смоленцев, Т. О. Николаева [и др.] // *Ветеринарный врач*. 2025. № 1. С. 41–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/veterinarno-sanitarnaya-otsenka-kachestva-i-bezopasnosti-moloka-korov-pri-ispolzovanii-v-ratsione-kormovoy-dobavki-ekofit?ysclid=mc08awkrtr653803832> (дата обращения: 17.02.25).
15. Якупова Л. Ф., Папуниди Э. К., Смоленцев С. Ю. Изучение эффективности цеолита и СВЧ-обработки зерна, пораженного микотоксинами, на белых крысах // *Вестник Марийского государственного университета. Серия «Сельскохозяйственные науки. Экономические науки»*. 2022. Т. 8. № 2. С. 166–172. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-2-166-172>

16. Ali N., Degen G. H. Urinary biomarkers of exposure to the mycoestrogen zearalenone and its modified forms in German adults // *Archives of Toxicology*. 2018. Vol. 92. Pp. 2691–2700. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2261-5> (дата обращения: 17.02.25).
17. Digestibility and absorption of deoxynivalenol-3- β -glucoside in in vitro models. / Nijs M. De, H. J. Van den Top [et al.] // *World Mycotoxin Journal*. 2012. Vol. 5. Pp. 319–324. URL: https://www.researchgate.net/publication/273979067_Digestibility_and_absorption_of_deoxynivalenol-3-ss-glucoside_in_in_vitro_models (дата обращения: 17.02.25).
18. Минимизация матричного эффекта при индикации т-2 токсина методом in-ELISA в растительных пробах / И. Н. Штыров, А. Ф. Хасиятуллин, А. Р. Валиев [и др.] // *Ветеринарный врач*. 2021. № 1. С. 56–62. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-matrichnogo-effekta-pri-indikatsii-t-2-toksina-metodom-in-elisa-v-rastitelnyh-probah?ysclid=mc08zerb9w989372072> (дата обращения: 17.02.25).

Статья поступила в редакцию 04.03.2025 г.; одобрена после рецензирования 01.04.2025 г.; принята к публикации 14.04.2025 г.

Об авторах

Вафин Фаниль Рафаэлевич

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории микотоксинов, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, ул. Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2274-8074>, vafin.fr@mail.ru

Семёнов Эдуард Ильясович

доктор ветеринарных наук, заведующий отделением токсикологии, главный научный сотрудник, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3029-7170>, semyonovai@bk.ru

Мишина Наиля Наримановна

кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией фармакологии лекарственных средств отделения токсикологии, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9312-0970>, mishinanailyan@yandex.ru

Сайфутдинов Александр Маратович

кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией физико-химического и прецизионного анализа, Федеральный центр токсикологической, радиационной и биологической безопасности (420075, Российская Федерация, г. Казань, Научный городок, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7098-0767>, alex.saufutdinov@gmail.ru

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

1. Desmarchelier A., Seefelder W. Survey of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3- glucoside in cereal-based products by liquid chromatography electrospray ionization tandem mass spectrometry. *World Mycotoxin Journal*, 2011, no. 4, pp. 29–35. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23025486> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
2. Malachova A., Dzuman Z. [et al.] Deoxynivalenol, deoxynivalenol-3-glucoside, and enniatins: the major mycotoxins found in cereal-based products on the Czech market. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, vol. 59, pp. 12990–12997. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22070284> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
3. Vendl O., Crews C. [et al.] Occurrence of free and conjugated Fusarium mycotoxins in cereal-based food. *Food Additives & Contaminants Part A*, 2010, vol. 27, pp. 1148–1152. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20496251> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
4. Zhou B., He G.Q., Schwarz P. B. Occurrence of bound deoxynivalenol in Fusarium head blight-infected barley (*Hordeum vulgare* L.) and malt as determined by solvolysis with trifluoroacetic acid. *Journal of Food Protection*, 2008, vol. 71, pp. 1266–1269. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18592758> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
5. Warth B., Sulyok M. [et al.] New insights into the human metabolism of the Fusarium mycotoxins deoxynivalenol and zearalenone. *Toxicology Letters*, 2013, vol. 220 (1), pp. 88–94. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23623764> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
6. Wentzel J. F., Lombard M. J. [et al.] Evaluation of the cytotoxic properties, gene expression profiles and secondary signalling responses of cultured cells exposed to fumonisin B1, deoxynivalenol and zearalenone mycotoxins. *Archives of Toxicology*, 2017, vol. 91 (5), pp. 2265–2282. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1872-y>
7. Yang Sh., Zhang H. [et al.] Deglucosylation of zearalenone-14-glucoside in animals and human liver leads to underestimation of exposure to zearalenone in humans. *Archives of Toxicology*, 2018, vol. 92 (9), pp. 2779–2791. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2267-z>

8. Dall'Asta C., Falavigna C. [et al.] Role of maize hybrids and their chemical composition in Fusarium infection and Fumonisin production. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, vol. 60, pp. 3800–3808. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22409349> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
9. Ponce-García N., Serna-Saldivar S. O., Garcia-Lara S. Fumonisin and Their Analogues in Contaminated Corn and its Processed Foods – A Review. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2018, no. 11, pp. 2183–2203. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2018.1502476>
10. Dall'Asta C., Mangia M. [et al.] Difficulties in fumonisin determination: the issue of hidden fumonisins. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, vol. 395, pp. 1335–1345. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19588126> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
11. Ekwomadu T. I., Dada T. A. [et al.] Variation of *Fusarium* Free, Masked, and Emerging Mycotoxin Metabolites in Maize from Agriculture Regions of South Africa. *Toxins*, 2020, no. 3. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins12030149>
12. Berthiller F., Hametner C. [et al.] Preparation and characterization of the conjugated *Fusarium* mycotoxins zearalenone-4O-beta-D-glucopyranoside, alpha-zearalenol-4O-beta-D-glucopyranoside and betazearalenol-4O-beta-D-glucopyranoside by MS/MS and twodimensional NMR. *Food Additives and Contaminants*, 2009, vol. 26, pp. 207–213. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19680891> (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
13. Yu W., Pei R. [et al.] Molecular Regulation of Fungal Secondary Metabolism. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2023, vol. 39, no. 8. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03649-6>
14. Smolentsev S. Yu., Nikolaeva T. O. [et al.] Veterinarno-sanitarnaya otsenka kachestva i bezopasnosti moloka korov pri ispol'zovanii v ratsion kormovoi dobavki "Ekofit" [Veterinary and sanitary assessment of the quality and safety of cow's milk when using the feed additive "ecofit" in the diet]. *Veterinarnyi vrach* = Veterinarian, 2025, no. 1, pp. 41–47. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/veterinarno-sanitarnaya-otsenka-kachestva-i-bezopasnosti-moloka-korov-pri-ispolzovanii-v-ratsione-kormovoy-dobavki-ekofit?ysclid=mc08awkrtr653803832> (accessed 17.02.25). (In Russ.).
15. Yakupova L. F., Papunidi E. K., Smolentsev S. Yu. Izuchenie effektivnosti tseolita i SVCh-obrabotki zerna, porazhennogo mikotoksinami, na belykh krysakh [Study the effectiveness of zeolite and microwave treatment of grain affected by mycotoxins on white rats]. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Sel'skokhozyaistvennyye nauki. Ekonomicheskie nauki"* = Vestnik of the Mari State University. Chapter "Agriculture. Economics". 2022, vol. 8, no. 2 (30), pp. 166–172. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2022-8-2-166-172>
16. Ali N., Degen G. H. Urinary biomarkers of exposure to the mycoestrogen zearalenone and its modified forms in German adults. *Archives of Toxicology*, 2018, vol. 92, pp. 2691–2700. (In Eng.). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00204-018-2261-5>
17. Nijs M. De, Van den Top H. J. [et al.] Digestibility and absorption of deoxynivalenol-3-β-glucoside in in vitro models. *World Mycotoxin Journal*, 2012, vol. 5, pp. 319–324. Available at: https://www.researchgate.net/publication/273979067_Digestibility_and_absorption_of_deoxynivalenol-3-ss-glucoside_in_in_vitro_models (accessed 17.02.2025). (In Eng.).
18. Shtyrov I. N., Khasiyatullin A. F. [et al.] Minimizatsiya matrichnogo effekta pri indikatsii t-2 toksina metodom in-ELISA v rastitel'nykh probakh [Minimization of the matrix effect when indicating T-2 toxin by in-ELISA in plant samples]. *Veterinarnyi vrach* = Veterinarian, 2021, no. 1, pp. 56–62. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/minimizatsiya-matrichnogo-effekta-pri-indikatsii-t-2-toksina-metodom-in-elisa-v-rastitelnyh-probah?ysclid=mc08zerb9w989372072> (accessed 17.02.25). (In Russ.).

The article was submitted 04.03.2025; approved after reviewing 01.04.2025; accepted for publication 14.04.2025.

About the authors

Fanil R. Vafin

Ph. D. (Biology), Senior Researcher at the Mycotoxin Laboratory, Federal Center for Toxicological, Radiation, and Biological Safety (2 Nauchny Gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2274-8074>, vafin.fr@mail.ru

Eduard I. Semenov

Dr. Sci. (Veterinary), Chief Researcher, Head of the Toxicology Department, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2-Nauchny Gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3029-7170>, semyonovei@bk.ru

Nailya N. Mishina

Ph. D. (Biology), Leading Researcher of the Laboratory, Acting Head of the Laboratory of Pharmacology of Medicinal Products of the Department of Toxicology, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (2-Nauchny Gorodok, Kazan 420075, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9312-0970>, mishinanailyan@yandex.ru

Alexander M. Saifutdinov

Ph. D. (Chemical), Leading Researcher, Head of the Physicochemical and Precision Analysis Laboratory, Federal Center for Toxicological, Radiation and Biological Safety (420075, Russian Federation, Kazan, Nauchny Gorodok 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7098-0767>, alex.saifutdinov@gmail.ru

All authors have read and approved the final manuscript.