

Стратегические ориентиры обеспечения биобезопасности зерновых в экстремальных условиях изменения климата

И. Ю. Потороко[✉], А. В. Малинин¹, А. М. Я. Кади¹, В. Анйум¹, О. П. Неверова²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Аннотация. В совокупности эффективных действий для обеспечения продовольственной безопасности и целей устойчивого развития агропромышленного комплекса РФ необходимо определить стратегические ориентиры в целях преобразования агропродовольственных систем на основе концепции ФАО «Безопасные пищевые продукты всегда и для всех». Загрязнение микотоксинами (МТ) пищевых продуктов является глобальной проблемой современности, для Российской Федерации наиболее известными продуцентами МТ являются токсигенные плесени родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* и *Alternaria*. Наиболее опасными считаются афлатоксины, вырабатываемые плесневыми грибами *Aspergillus flavus* или *A. parasiticus*, благодаря распространенности и гепатотоксическим и канцерогенным свойствам. Цель работы – формирование доказательной базы присутствия токсигенных плесеней в зерновой массе пшеницы, полученной в экстремальных погодных условиях урожая 2023 г., для прогнозирования рисков биобезопасности при переработке. В работе приведены доказательные исследования присутствия токсигенных микромицетов и спрогнозированы риски накопления вторичных метаболитов. Для формирования доказательной базы в исследовании применяли **методы:** молекулярное моделирование типов связей с использованием стратегии докинг-анализа *in silico*; ИК-Фурье-спектроскопию для исследования функциональных групп, определяющих риски присутствия вторичных метаболитов (МТ). **Научная новизна** полученных данных обусловлена применением новых методов для идентификации рисков нарушения биобезопасности зерновых масс в условиях глобального изменения климата. В **результате** применения методов анализа *in silico* в сочетании с визуальной микроскопией; ИК-Фурье-спектроскопии обеспечена идентификация токсигенных плесеней и спрогнозированы риски формирования маскированных форм в углеводно-белковый комплекс эндосперма зерна.

Ключевые слова: токсигенные плесени, докинг-анализ, вторичные метаболиты, климат, биобезопасность

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ) в рамках проекта 24-16-20028.

Для цитирования: Потороко И. Ю., Малинин А. В., Кади А. М. Я., Анйум Вариша, Неверова О. П. Стратегические ориентиры обеспечения биобезопасности зерновых в экстремальных условиях изменения климата // Аграрный вестник Урала. 2024. Т. 24, № 10. С. 1334–1344. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1334-1344>.

Дата поступления статьи: 28.07.2024, **дата рецензирования:** 22.08.2024, **дата принятия:** 02.09.2024.

Strategic guidelines for ensuring biosafety of cereals in extreme conditions of climate change

I. Yu. Potoroko[✉], A. V. Malinin¹, A. M. Y. Kadi¹, V. Anjum¹, O. P. Neverova²

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Abstract. Together with effective actions to ensure food security and the goals of sustainable development of the Agro-industrial complex of the Russian Federation, it is necessary to define strategic guidelines for the transformation of agro-food systems, based on the FAO concept of Safe food products always and for everyone. Mycotoxin (MT) contamination of food products is a global problem of our time, for the Russian Federation the most famous producers of MT are toxigenic molds of the genera *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* and *Alternaria*. The most dangerous are aflatoxins produced by the common mold fungi *Aspergillus flavus* or *A. Parasiticus*, due to their prevalence and hepatotoxic and carcinogenic properties. **The purpose** of the study is to form an evidence base for the presence of toxigenic molds in the grain mass of wheat obtained in extreme weather conditions of the 2023 harvest to predict biosafety risks during processing. The paper presents evidence-based studies of the presence of toxigenic micromycetes and predicts the risks of accumulation of secondary metabolites. To form the evidence base, the following **methods** were used in the study: molecular modeling of bond types using the in silico docking analysis strategy; FTIR to study functional groups that determine the risks of the presence of secondary metabolites (MT). **The scientific novelty** of the data obtained is due to the use of new methods to identify the risks of violating the biosafety of grain masses in the context of global climate change. As a **result** of the application of in silico analysis methods in combination with visual microscopy; The identification of toxigenic molds was ensured by FTIR and the risks of the formation of masked forms in the carbohydrate-protein complex of the grain endosperm were predicted.

Keywords: toxigenic molds, docking analysis, secondary metabolites, climate, biosafety

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation (RSF) within the framework of the project 24-16-20028.

For citation: Potoroko I. Yu., Malinin A. V., Kadi A. M. Y., Anjum V., Neverova O. P. Strategic guidelines for ensuring biosafety of cereals in extreme conditions of climate change. *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2024; 24 (10): 1334–1344. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2024-24-10-1334-1344>. (In Russ.)

Date of paper submission: 28.07.2024, **date of review:** 22.08.2024, **date of acceptance:** 02.09.2024.

Постановка проблемы (Introduction)

Продовольственная безопасность РФ является одним из главных факторов обеспечения национальной безопасности страны, ее суверенитета в долгосрочном периоде, а также условием реализации стратегического национального приоритета повышения качества жизни российских граждан путем гарантирования высоких стандартов жизнеобеспечения. Вместе с тем для достижения показателей продовольственной безопасности есть ряд важных объективных проблем текущего периода, которые следует учитывать: во-первых, смягчение рисков глобального потепления климата, которое в последние годы охватывает территории Уральского региона; во-вторых, обеспечение устойчивости рынка продовольственного сырья и продуктов его переработки. В совокупности эффективных действий для целей устойчивого развития агропромышлен-

ного комплекса (АПК) необходимо преобразование агропродовольственных систем на основе принятой FAO в 2021 году концепции «Безопасные пищевые продукты всегда и для всех».

В преломлении к региональным особенностям территорий РФ стратегические ориентиры улучшения качества питания и обеспечения биобезопасности пищевой продукции охватывают прежде всего производство зерна и продуктов его переработки, которые определяют устойчивость позиций страны на мировом и государственном уровнях [1; 2; 5]. Другим по значимости стратегическим ориентиром является минимизация рисков снижения биобезопасности продовольственного сырья, что возможно реализовать на основе мониторинга новых потенциально опасных загрязнителей химической и биологической природы. Данные риски, усугубляемые на фоне применения интенсивных технологий воз-

делывания и глобального изменения климата для зерновых масс, на протяжении многих лет остаются актуальной проблемой. Статистические данные глобальной распространенности новых микотоксинов в сельскохозяйственных культурах и кормах для животных, а также их токсичности для домашнего скота стабильно показывают положительную динамику [6].

Безусловно, значительное увлажнение земельных угодий на фоне интенсивных осадков провоцирует загрязнение токсигенными микромицетами сырья и продуктов его переработки микотоксинами (МТ), что является глобальной проблемой современности, обозначенной в программных документах ФАО. Для территорий Российской Федерации наиболее известными продуцентами регулируемых МТ являются микромицеты родов *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium* и *Alternaria*. Присутствие их вторичных метаболитов в продовольственном зерне урожая 2020 года подтверждено массивом данных, представленных в открытых источниках, прослеживаются устойчивые риски микоинтоксикации для потенциальных потребителей продуктов переработки зерна, причем по отдельным видам установлены весьма критичные значения. Зафиксирован рост частоты обнаружения высоких уровней контаминации МТ разных зерновых масс, а также расширение ареалов распространения токсигенных микромицетов [3; 12].

Фактически в текущий момент идентифицированы сотни микотоксинов, вместе с тем предметом токсикологических исследований и общественного беспокойства для пищевых продуктов и кормов считаются наиболее опасными афлатоксины, вырабатываемые плесневыми грибами *Aspergillus flavus* или *A. parasiticus*, благодаря распространенности и гепатотоксическим и канцерогенным свойствам [4].

Особую озабоченность обуславливают метадачные, полученные группой ученых Таиланда в части распространенности новых форм МТ, которые весьма реалистично доказывают, что новые формы микотоксинов все больше определяют риски для продовольствия. В число новых форм МТ отнесены фузариновая кислота (ФУС), энниатин (ЭНН), кулморин, апицидин, бутенолид, фусапролиферин, токсины альтернариоза, ауурофузарин, эмодин, ниваленол (НИВ), боверицин (БЕА), диацетоксипирпенол (ДАС), патулин (РАТ), монилиформин (МОН) и стеригматоцистин. Среди них выделены и идентифицированы наиболее распространенные загрязнители (рис. 1) зерновых и других кормовых культур во всем мире. Отмечаются чрезвычайно высокие вариативности концентрации их накопления. Так, концентрации НИВ, БЕА и ЭНН во всех сельскохозяйственных товарах варьировались от 0,1 до 15 600, от 0,01 до 8 854 и от 0,25 до 10 000 мкг/кг соответственно. Токсическое действие смесей воз-

никающих и регулируемых микотоксинов в настоящий момент изучено недостаточно [7; 12; 17].

Сложно расшифровать дозы, при которых наблюдаются токсические и нетоксические эффекты. Для этой группы соединений необходима кумулятивная оценка риска, особенно при низких уровнях воздействия, чтобы смягчить их влияние на здоровье населения. Как правило, домашний скот (свиньи и птица) демонстрирует более выраженные вредные синергетические и аддитивные эффекты после контакта с кормовыми культурами и комбикормами, контаминированными новыми и регулируемыми микотоксинами, по сравнению с рационами, загрязненными только новыми формами.

Таким образом, существует необходимость в непрерывном и долгосрочном (многолетнем) мониторинге сельскохозяйственной продукции на наличие как новых, так и регулируемых микотоксинов, чтобы гарантировать биобезопасность продуктов питания и кормов в цепочках поставок.

Целью работы является формирование доказательной базы присутствия токсигенных плесеней в зерновой массе пшеницы, полученных в экстремальных погодных условиях урожая 2023 года, для прогнозирования и минимизации рисков биобезопасности при переработке.

Методология и методы исследования (Methods)

Достижение цели работы может быть обеспечено за счет поэтапного решения поставленных задач:

В первом блоке работ на первом этапе исследований в качестве объектов для исследования определены партии зерновых масс мягкой пшеницы из хозяйств, территориально расположенных в трех климатических зонах, подверженных в 2023 году экстремальным погодным условиям на фоне длительных проливных дождей. Образцы зерна пшеницы (образец 1 после обмолота; образцы 2 и 3 после элеваторной сушки) отобраны от партий в соответствии с требованиями НД (согласно ГОСТ 13586.3-2015 и ГОСТ 31904-2012). Критериальные показатели оценки входного контроля состояния включали: влажность, % (ГОСТ 13586.5-2015 «Метод воздушно-тепловой сушки путем высушивания проб зерна при фиксированной температуре до постоянной массы»); количество проросших (испорченных) зерен (визуально, методом количественного выделения фракции); натура, г/л (ГОСТ 10840-2017); микроскопия микромицетов (культивирование на поверхности зерна в условиях избыточной влажности) и пересадка на среду Чапека (агар Чапека (CZA) или среда Чапека – Докса – питательная среда для размножения грибов и других организмов в лабораторных условиях).

На втором этапе на основе оптических результатов макро- и микроскопии микромицетов проводили прогностические исследования идентификации токсигенных плесеней, направленные в последую-

шем на оценку рисков формирования маскированных в белково-углеводный комплекс форм микотоксинов с применением стратегии *in silico*. «Докинг-анализ» молекулярного моделирования типов и силы формируемых связей проводили с использованием AutoDock 4.2. Лиганд МТ был загружен в виде SDF-файлов с 3D-структурой из PubChem и оптимизирован с использованием ввода лигандов в AD 4.2. Оптимизированные молекулы-лиганды МТ были состыкованы с усовершенствованными рецепторами протейна и амилозы с помощью AutoDock 4.2. Стыковку осуществляли с использованием метода генетического алгоритма Ламарка (LGA). Результаты стыковки были проанализированы с использованием инструмента визуализации молекулярной графики PyMOL [5].

Во второй блоке работ проводили исследования для формирования доказательной базы применимой для оценки токсигенных микромицетов в пищевых системах сырья и продуктов. Для этих целей применяли ИК-Фурье-спектроскопию, которая применима для исследования функциональных групп, определяющих обнаружение и идентификацию микроорганизмов и выделяемых метаболитов. Определение осуществляли на основе инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и получением FTIR-спектров на приборе UV-3600 (Shimadzu, Япония), оснащенный высокочувствительным термостабильным детектором DLATGS. Угол дифракции сканировали при 30 град, целевом напряжении 40 кВ и токе 25 мА. Образцы сканировали в диапазоне волн 4000–400 см⁻¹. Количество сканирований составило 30 для каждого измерения образца, а разрешение – 4 см⁻¹ в трех репликах в режиме поглощения в соответствии с законом Бугера – Ламберта – Бера.

Результаты (Results)

В соответствии с методологией исследования входными показателями для исследований были приняты: влажность, %; количество проросших зерен, %; натура, г/л, результаты оценки которых представлены на рис. 2. Следует отметить прежде всего внешнее состояние образцов зерновой массы, которое оценивали визуально; цвет и запах образцов зерна на момент проведения исследований характеризуется значительными отличиями ввиду разности периода выемки партии для исследования и степени подверженности увлажнению. Наблюдались явные признаки солоделого запаха у первого образца, что коррелирует с показателем «влажность».

Выраженность отклонений по состоянию зерен наиболее значима у второго образца, что обусловлено количеством испорченных зерен. Так, в образцах 1 и 2 при явных отклонениях по показателю «количество испорченных зерен» установлено значительное количество проросших зерен (соответственно 23 ± 1,25 % и 46 ± 1,50 %). Именно обозначенные образцы отстают от нормы по показателю «натура», в отличие от третьего образца, имеющего пороговое значение (730 ± 20,5 г/л). Влажность образцов 2 и 3 зерна пшеницы урожая 2023 года находится в пределах регламентируемых значений (11–13 %), а первый образец, выемка которого осуществлялась после обмолота, имеет высокое значение показателя «влажность» – на уровне 21 ± 1,5 %. Полученные результаты свидетельствуют о серьезных отклонениях по показателям качества зерна мягкой пшеницы урожая 2023 года, обмолоченного в южной части территорий региона, фактически зафиксирована его малопригодность для продовольственных целей.

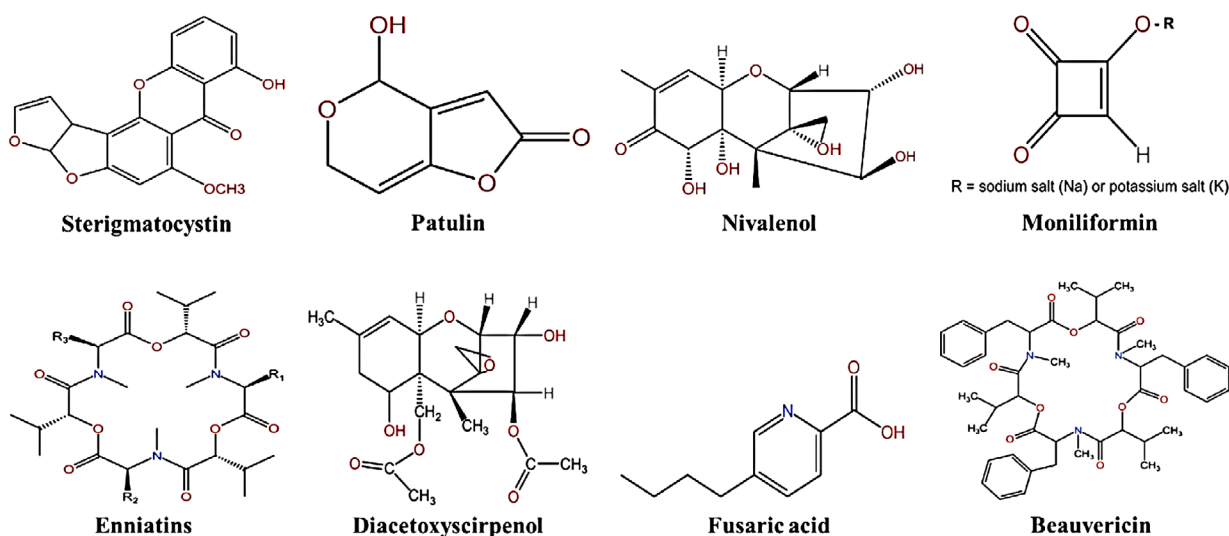


Рис. 1. Химическая структура восьми новых микотоксинов [12]
Fig. 1. Chemical structures of the eight emerging mycotoxins [12]

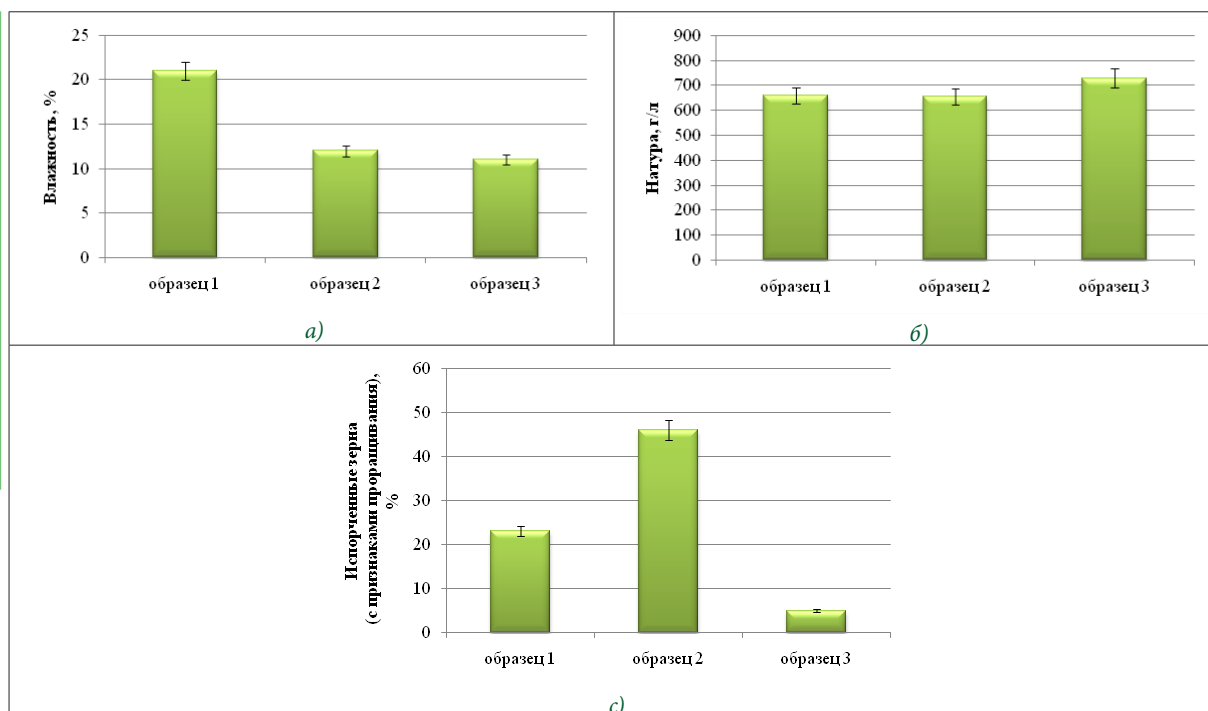


Рис. 2 Результаты оценки контроля качества зерна пшеницы (n = 3):
 а) влажность, %; б) натура, г/л; в) фракция испорченных зерен, %

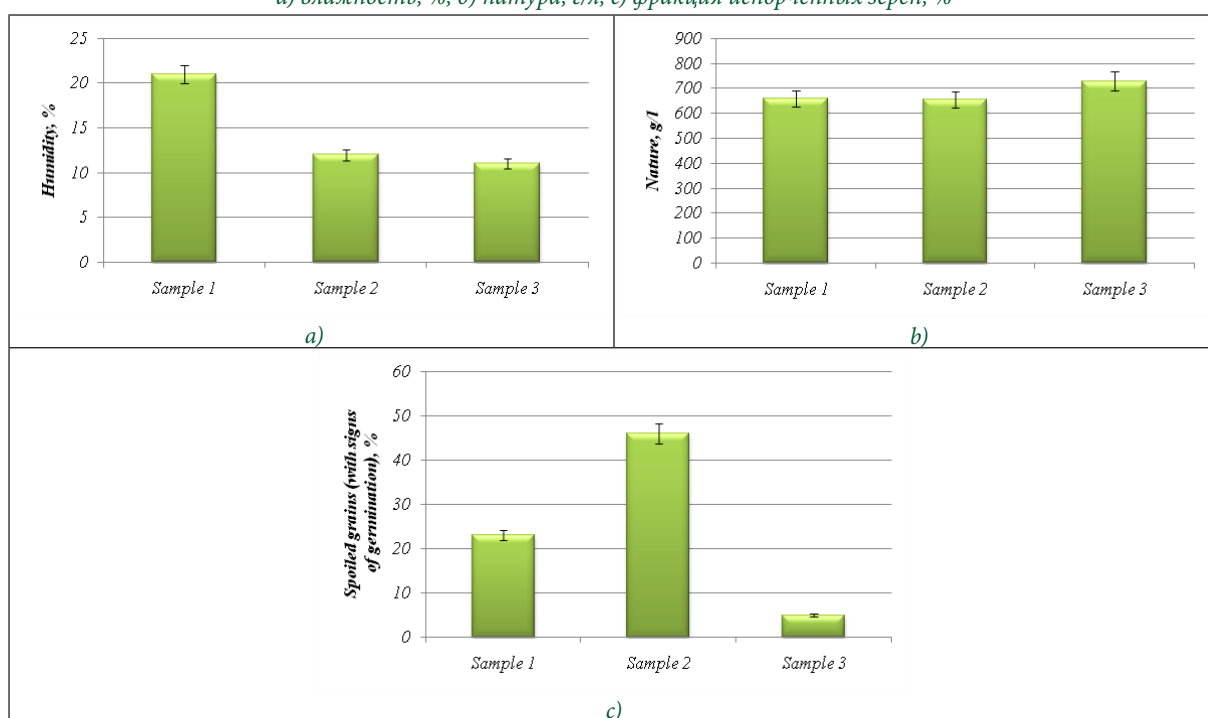


Fig. 2– Results of the assessment of incoming quality control of wheat grain (n = 3):
 a) humidity, %; b) natura, g/l; c) spoiled grains (with signs of germination), %

Следующей задачей для установления рисков микоинтоксикации зерновой массы при последующем хранении являлась идентификация представителей мицелиальной микрофлоры, потенциально присутствующей на поверхности зерна. Известно, что несколько факторов влияют на грибковую инвазию, колонизацию, рост и последующее произ-

водство микотоксинов, к значимым благоприятным условиям для роста грибов и выработки микотоксина относятся температура и показатель активности воды (aw), оптимальная температура накопления МТ несколькими формами колеблется от 20 до 30 °С. Результаты тестирования микрофлоры представлены в таблице 1.

Таблица 1
 Результаты микроскопической идентификации микромицетов

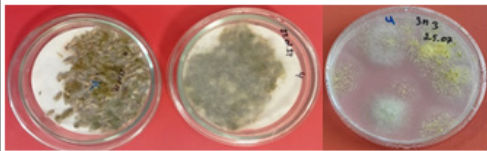
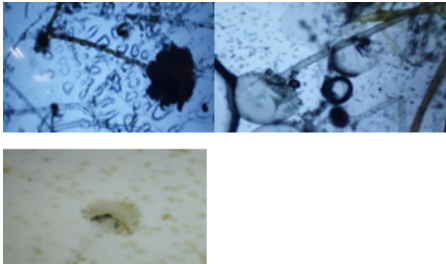

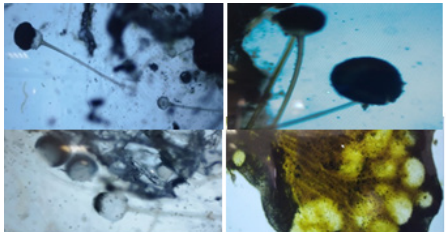

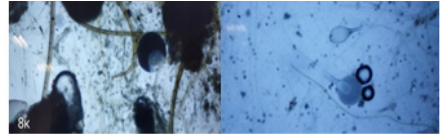
№	Макроскопическая визуализация	Микроскопическая визуализация	Результат идентификации [11; 15; 16]
Образец 1			<i>Aspergillus flavus</i> (yellow); <i>Aspergillus parasiticus</i> ; <i>Mucor</i>
Образец 2			<i>Aspergillus flavus</i> (yellow); <i>Aspergillus parasiticus</i> ; <i>Mucor</i>
Образец 3			<i>Mucor</i> , <i>Alternaria</i>

Table 1
 Results of microscopic identification of micromycetes

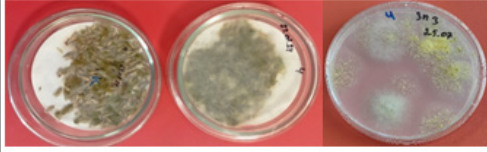
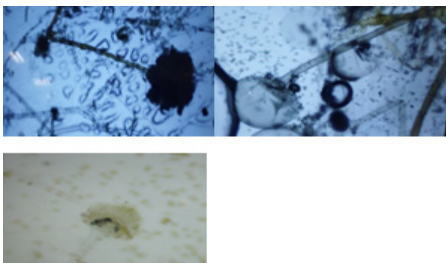

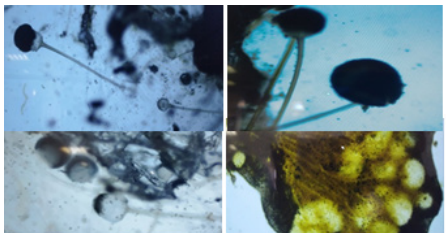

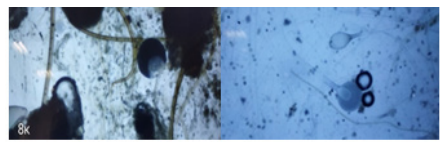
No.	Macroscopic visualization	Microscopic visualization	Result of identification [11; 15; 16]
Sample 1			<i>Aspergillus flavus</i> (yellow); <i>Aspergillus parasiticus</i> ; <i>Mucor</i>
Sample 2			<i>Aspergillus flavus</i> (yellow); <i>Aspergillus parasiticus</i> ; <i>Mucor</i>
Sample 3			<i>Mucor</i> , <i>Alternaria</i>

Таблица 2

Функциональные группы и интенсивность их полос исследуемых токсигенных микромицетов

Область полосы (см ⁻¹)	Функциональная группа	Микромицеты	
		<i>A. flavus</i>	<i>A. parasiticus</i>
570–580	Углеводы (растяжение C-O)	+	+
1020 (900–1200)	Углеводы (растяжение C-O)	++	+
1450–1300	α-гликозидная связь, β-гликозидная связь	+	-
1540	Амид II (растяжение C-N, изгиб NH)	+	+/-
1645	Амид I (растяжение C=O)	++	++
2924	Структура полисахаридных соединений и длинных жирных кислот (растяжение CH ₂)	+	+
3200–3550	Гидроксильные группы (вводная часть)	+++	+++

Table 2

Functional groups and intensity of their bands of the studied toxigenic micromycetes

Band region (cm ⁻¹)	Functional group	Fungus	
		<i>A. flavus</i>	<i>A. parasiticus</i>
570–580	Carbohydrate (C-O stretching)	+	+
1020 (900–1200)	Carbohydrate (C-O stretching)	++	+
1450–1300	α-glycosidic bond, β-glycosidic bond	+	-
1540	Amide II (C-N stretching, NH bending)	+	+/-
1645	Amide I (C=O stretching)	++	++
2924	Structure of polysaccharide compounds and long fatty acids (CH ₂ stretching)	+	+
3200–3550	Hydroxyl groups (or water moiety)	+++	+++

Среди идентифицированных микромицетов следует выделить *Aspergillus flavus* (yellow) и *Aspergillus parasiticus*, продуцирующие наиболее опасные МТ (афлатоксины В1, В2, G1 G2), которые классифицируются как канцерогены первой группы. Важно понимать, что *A. flavus* продуцирует В-афлатоксины, в то время как *A. parasiticus* продуцирует как В-, так и G-формы. Афлатоксины В1, В2, G1 G2 являются естественными метаболитами и достаточно часто идентифицируются в зерновых культурах, особенно в кукурузе, в то время как гидроксильрованные метаболиты АFB1 и АFB2 представляют собой афлатоксины М1 (AFM1) и М2 (AFM2) и мигрируют по трофическим цепям [9; 12; 13; 18].

Проведенное исследование является отправной точкой для последующих работ. В дополнение к макро- и микроскопическим исследованиям были получены результаты ИК-Фурье (таблица 2) спектрального анализа токсигенных плесеней *Aspergillus flavus* (yellow) и *Aspergillus parasiticus*, а также образцов зерна пшеницы исследуемой выборки.

Интенсивность функциональных групп и полос их растяжения, установленная в ИК-спектрах для указанной выборки токсигенных плесеней указывает на характерные функциональные группы [12, 13]. Полосы поглощения на 3430 см⁻¹, 2914 см⁻¹, 1645 см⁻¹, 1541 см⁻¹, 1413 см⁻¹, 1320 см⁻¹, 1041 см⁻¹ и 573 см⁻¹ соответствуют алкогольной О-Н, С-Н, С=О (амидная I-полоса), С-Н (NH-изгиб, амидная II полоса), С-О, антисимметричной α C1-O-C4' и β C1-O-C4' растягивающей вибрации соответственно.

Различные исследователи ранее сообщали про аналогичные наблюдения характерных функциональных групп у вышеупомянутых видов грибов. В нашем случае анализ результатов должен позволить выявить присутствие *Aspergillus ssp.* во всех образцах зерна и спрогнозировать его влияние на микроструктуру зерна (что может быть связано с изменением питательных качеств зерна). Отмечено, что на полосе 2914 см⁻¹, которая соответствует растяжению С-Н, аналогичный пик наблюдается у обоих видов *Aspergillus*, особенно у *A. parasiticus*. Наблюдаемое в спектрах *Aspergillus ssp.* смещение участков О-Н (полоса 3300 см⁻¹) связано с образованием комплекса между грибами и компонентами зерна, то есть может прогнозироваться процесс маскирования [8; 10; 14; 16].

Прорастание зерна в колосе физиологически разрушает целостность плодовых оболочек, появляются фактически «открытые окна» для проникновения микромицетов в эндосперм, богатой питательной среды для активации и, как следствие, накопления вторичных продуктов жизнедеятельности. На этом этапе для возможного подтверждения выдвинутой гипотезы для оценки рисков образования маскированных форм проведено прогнозирование возможности формирования устойчивых связей МТ идентифицированных видов *Aspergillus* с компонентами белково-углеводного комплекса эндосперма зерна. Первым шагом в процедуре прогнозирования с использованием докинг-анализа *in silico* является идентификация и выбор подходящей

мишени или рецептора. В нашем случае получены 3D-модели (рис. 3, 4), позволяющие осуществить прогнозирование возможности образования маскированных форм микотоксинов в белковые и крахмальные конструкции эндосперма зерна.

Было установлено, что основная конструкция формируется на уровне Glutenin +AFLB с наиболее сильными связями (-8.1 Kcal/mol), в то время как молекула амилозы погружена в массив протеина, не соприкасаясь с молекулой AFLB ($-6,5$ Kcal/mol). Следовательно, для осуществления процесса детоксикации необходимо использовать мягкие методы воздействия, чтобы избежать трансформации чувствительных к температурам белковых соединений [5; 12].

Таким образом, экспертная идентификация присутствия афлатоксина В при активном развитии *Aspergillus*, особенно *A. parasiticus*, может обуславливать риски снижения биобезопасности зернового сырья, ограничивать его применение для продовольственных целей, в то время как перевод зерновых масс в фуражное на кормовые цели прежде всего не обеспечит безопасность скота, а продукция животноводческого комплекса скрытые угрозы здоровью потенциальных потребителей.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, проведенные комплексные исследования подтвердили возможности применения прогностических исследований для оценки рисков снижения биобезопасности зернового сырья, произведенного в экстремальных условиях глобального потепления климата. Своевременное выявление рисков на основе применения методов макро- и микроскопии зерна в сочетании с использованием метода *in silico* докинг-анализа для молекулярного моделирования типов связей лигандов МТ с усовершенствованными рецепторами протеина и амилозы позволили выявить маскированные формы МТ (афлатоксин В), связанные с компонентами эндосперма зерна пшеницы. Вторичные метаболиты токсигенных микромицетов *A. flavus* или *A. parasiticus*, который классифицируется как канцерогены первой группы токсичности, при нарушении целостности могут эффективно маскироваться в зернах проросшей в колосе в экстремальных условиях пшеницы. Установлено, что основная конструкция формируется на уровне Glutenin +AFLB с наиболее сильными связями (-8.1 Kcal/mol), в то время как молекула α -амилозы погружена в массив протеина, не соприкасаясь с молекулой AFLB ($-6,5$ Kcal/mol).

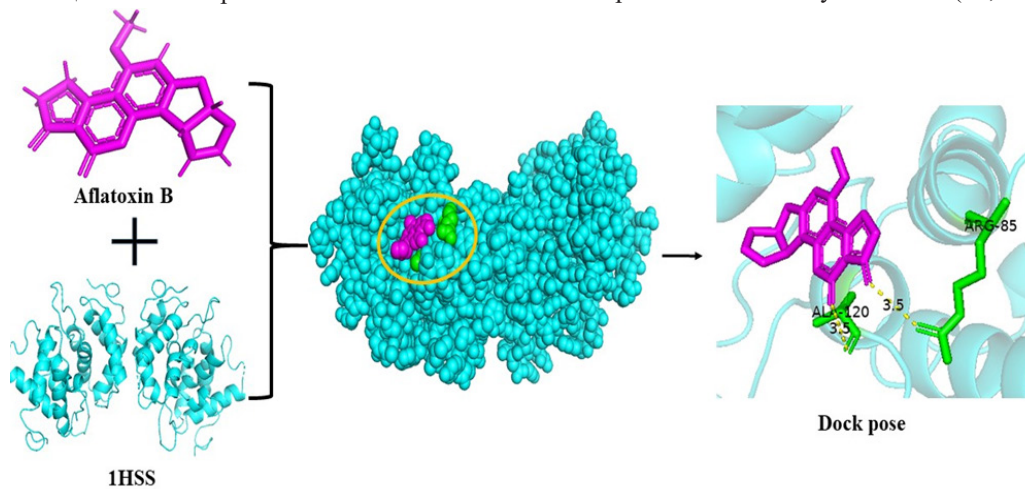


Рис. 3. Поза стыковки α -амилозы (1HSS) с афлатоксином В (AFLB)
Fig. 3. The docking position of α -amylase (1HSS) with Aflatoxin B (AFLB)

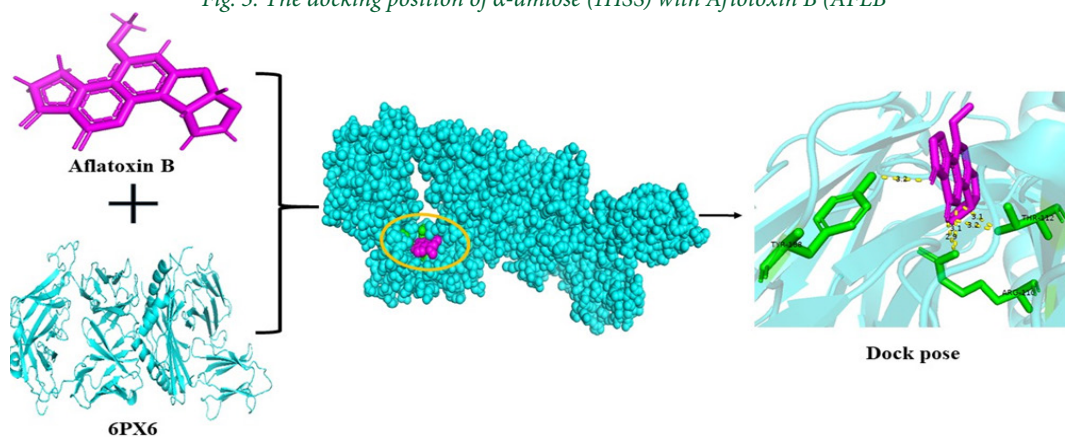


Рис. 4. Поза стыковки глютеина (6PX6) с афлатоксином В (AFLB)
Fig. 4. The docking position of Glutenin (6PX6) with Aflatoxin B (AFLB)

Следовательно, для осуществления процесса детоксикации для разрушения прочной связи Glutenin +AFLB необходимо использовать мягкие методы воздействия, чтобы избежать трансформации чувствительных к температурам белковых соединений и возможной потери важных свойств хлебопекарного качества мягких сортов пшеницы. Полученные результаты ИК-Фурье спектрального анализа токсигенных плесеней *Aspergillus flavus* (yellow) и *Aspergillus parasiticus*, а также образцов зерна пшеницы указывают на наблюдаемые в спектрах *Aspergillus ssp.* характерные функциональные груп-

пы смещения участков О-Н (полоса 3300 см⁻¹), что связано с образованием комплексов с компонентами зерна. Вместе с тем для подтверждения установленных корреляций для других видов регулярных МТ необходимо дополнительное исследование, направленное на раскрытие факторов, провоцирующих процессы создания комплексов, проявляющих негативное влияние на биобезопасность зернового сырья, что позволит обеспечить потенциальных потребителей нутритивно полезной и безопасной продукцией высокого качества.

Библиографический список

1. Власов В. А., Матвеева П. М., Зуева В. А. Отдельные системные проблемы развития сельского хозяйства в контексте обеспечения продовольственной безопасности России // Аграрное и земельное право. 2021. № 2. С. 38–42. DOI: 10.47643/1815-1329_2021_2_38.
2. Макаров И. А., Чернокульский А. В. Влияние изменения климата на экономику России: рейтинг регионов по необходимости адаптации // Журнал Новой экономической ассоциации. 2023. № 4. С. 145–202. DOI: 10.31737/22212264_2023_4_145-202.
3. Кононенко Г. П., Зотова Е. В., Буркин А. А. Опыт микотоксикологического обследования зернофуражных культур // Сельскохозяйственная биология. 2021. Том 56, № 5. С. 958–967. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.5.958.
4. Седова И. Б., Захарова Л. П., Чалый З. А., Тутельян В. А. Анализ загрязнения продовольственного зерна урожая 2020 года различными микротоксинами в Российской Федерации // Иммунопатология, аллергология, инфектология. 2023. № 2. С. 77–85. DOI: 10.14427/jipai.2023.2.77.
5. Потороко И. Ю., Кади А. М. Я., Анейум В., Руськина А. А. Молекулярный докинг растительных стабилизующих частиц для функциональных эмульсионных пищевых систем // Индустрия питания. 2023. Т. 8, № 2. С. 84–92. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-2-9.
6. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The state of food security and nutrition in the world in 2024. Financing to eliminate hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome: FAO; 2024. DOI: 10.4060/cd1254en.
7. Ismaiel A. A., Papenbrock J. Mycotoxins: Producing Fungi and Mechanisms of Phytotoxicity // Agriculture. 2015. No. 5. Pp. 492–537. DOI: 10.3390/agriculture5030492.
8. Salman A., Tsrer L., Pomerantz A., Moreh R., Mordechai S., Huleihel M.. FTIR spectroscopy for detection and identification of fungal phytopathogenes // Spectroscopy. 2010. Vol. 24. Pp. 261–267. DOI: 10.3233/SPE-2010-0448.
9. Balla E., Petrovay F. (). Chlamydia trachomatis infections in neonates // In: M. Mares (Ed.) Chlamydia trachomatis infections. IntechOpen, 2012. Pp. 133–146. DOI: 10.5772/31007.
10. Saif F. A., Yaseen S. A., Alameen A. S., Mane S. B., Undre P. B. Identification and characterization of *Aspergillus* species of fruit rot fungi using microscopy, FT-IR, Raman, and UV-Vis spectroscopy // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 2021. Vol. 246. Article number 119010. DOI: 10.1016/j.saa.2020.119010.
11. Fungi producing significant mycotoxins // IARC scientific publications. 2012. Vol. 158. Pp. 1–30.
12. Bennett J. W., Klich M. Mycotoxins // Clinical Microbiology Reviews. 2003. Vol. 16 (3). Pp. 497–516. DOI: 10.1128/CMR.16.3.497–516.2003.
13. Klich M. A. *Aspergillus flavus*: the major producer of aflatoxin // Molecular Plant Pathology. 2007. Vol. 8, No. 6. Pp. 713–722. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2007.00436.x.
14. Nikonenko N. A., Buslov D. K., Sushko N. I., Zhibankov R. Investigation of stretching vibrations of glycosidic linkages in disaccharides and polysaccharides with use of IR spectra deconvolution // Peptide Science. 2000. Vol. 57, No. 4. Pp. 257–262. DOI: 10.1002/1097-0282(2000)57:4<257::AID-BIP7>3.0.CO;2-3.
15. Kolawole O., Siri-Anusornsak W., Petchkongkaew A., Elliott C. A systematic review of global occurrence of emerging mycotoxins in crops and animal feeds, and their toxicity in livestock // Emerging Contaminants. 2024. Vol. 10, No. 3. Article number 100305. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100305.
16. Ogórek R., Kurczaba K., Łobas Z., Zołubak E., Jakubska-Busse A. Species diversity of micromycetes associated with *Epipactis helleborine* and *Epipactis purpurata* (Orchidaceae, Neottieae) in Southwestern Poland // Diversity. 2020. Vol. 12, No. 5. Article number 182. DOI: 10.3390/d12050182.

17. Wozny M., Kasiński S., Obremski K., Dąbrowski M., Dębowski M. Risk of mycotoxin contamination in thermophilic composting of kitchen and garden waste at large scale // *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. Article number 5288. DOI: 10.3390/app14125288.

18. Yu J., Pedroso I. R. Mycotoxins in cereal-based products and their impacts on the health of humans, live-stock animals and pets // *Toxins*. 2023. Vol. 15, No. 8. Article number 480. DOI: 10.3390/toxins15080480.

Об авторах:

Ирина Юрьевна Потороко, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; ORCID 0000-0002-3059-8061, AuthorID 646677. *E-mail: irina_potoroko@mail.ru*

Артем Владимирович Малинин, ассистент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ORCID 0000-0001-9270-5945, AuthorID 1031401. *E-mail: malininav@susu.ru*

Аммар Мохаммад Яхья Кад, ассистент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ORCID 0000-0003-2755-1497, AuthorID 1130169. *E-mail: kadia@susu.ru*

Вариша Анийум, доктор философии (PhD) фармакогнозии и фитохимии, старший научный сотрудник кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ORCID 0000-0001-6916-5653, AuthorID 1257193. *E-mail: aniumv@susu.ru*

Ольга Петровна Неверова, кандидат биологических наук, доцент, Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632; *E-mail: opneverova@mail.ru*

References

1. Vlasov V. A., Matveeva P. M., Zueva V. A. Some systemic problems of agricultural development in the context of ensuring food security in Russia. *Agrarian and Land Law*. 2021; 2: 38–42. DOI: 10.47643/1815-1329_2021_2_38. (In Russ.)

2. Makarov I. A., Chernokulskiy A. V. The impact of climate change on the Russian economy: a rating of regions on the need for adaptation. *Journal of the New Economic Association*. 2023; 4 (61): 145–202. DOI: 10.31737/22212264_2023_4_145-202. (In Russ.)

3. Kononenko G. P., Zotova E. V., Burykin A. A. The experience of mycotoxicological study of grain crops. *Agricultural Biology*. 2021; 56 (5): 958–967. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.5.958. (In Russ.)

4. Sedova I. B., Zakharova L. P., Chaly Z. A., Tutelyan V. A. Analysis of contamination of food grain of the 2020 harvest with various microtoxins in the Russian Federation. *Immunopathology, Allergology, Infectology*. 2023; 2: 77–85. DOI: 10.14427/jipai.2023.2.77. (In Russ.)

5. Potoroko I. Yu., Kadi A. M. Y., Anjum V., Ruskina A. A. Molecular docking of plant stabilizing particles for functional emulsion food systems. *Food Industry*. 2023; 8 (2): 84–92. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-2-9.

6. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The state of food security and nutrition in the world in 2024. Financing to eliminate hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome: FAO; 2024. DOI: 10.4060/cd1254en.

7. Ismaiel A. A., Papenbrock J. Mycotoxins: Producing fungi and mechanisms of phytotoxicity. *Agriculture*. 2015; 5: 492–537. DOI: 10.3390/agriculture5030492.

8. Salman A., Tsror L., Pomerantz A., Moreh R., Mordechai S., Huleihel M. FTIR spectroscopy for detection and identification of fungal phytopathogens. *Spectroscopy*. 2010; 24: 261–267. DOI: 10.3233/SPE-2010-0448.

9. Balla E., Petrovay F. (2012). Chlamydia trachomatis infections in neonates. In: M. Mares (Ed.) *Chlamydia trachomatis infections*. IntechOpen, 2012: 133–146. DOI: 10.5772/31007.

10. Saif F. A., Yaseen S. A., Alameen A. S., Mane S. B., Undre P. B. Identification and characterization of *Aspergillus* species of fruit rot fungi using microscopy, FT-IR, Raman, and UV-Vis spectroscopy. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2021; 246: 119010. DOI: 10.1016/j.saa.2020.119010.

11. Fungi producing significant mycotoxins. *IARC scientific publications*. 2012; 158: 1–30.

12. Bennett J. W., Klich M. Mycotoxins. *Clinical Microbiology Reviews*. 2003; 16 (3): 497–516. DOI: 10.1128/CMR.16.3.497-516.2003.

13. Klich M. A. *Aspergillus flavus*: the major producer of aflatoxin. *Molecular Plant Pathology*. 2007; 8 (6): 713–722. DOI: 10.1111/j.1364-3703.2007.00436.x.

14. Nikonenko N. A., Buslov D. K., Sushko N. I., Zhibankov R. Investigation of stretching vibrations of glycosidic linkages in disaccharides and polysaccharides with use of IR spectra deconvolution. *Peptide Science*. 2000; 57 (4): 257–262. DOI: 10.1002/1097-0282(2000)57:4<257::AID-BIP7>3.0.CO;2-3.

15. Kolawole O., Siri-Anusornsak W., Petchkongkaew A., Elliott C. A systematic review of global occurrence of emerging mycotoxins in crops and animal feeds, and their toxicity in livestock. *Emerging Contaminants*. 2024; 10 (3): 100305. DOI: 10.1016/j.emcon.2024.100305.

16. Ogórek R., Kurczaba K., Łobas Z., Zołubak E., Jakubska-Busse A. Species diversity of micromycetes associated with *Epipactis helleborine* and *Epipactis purpurata* (Orchidaceae, Neottieae) in Southwestern Poland. *Diversity*. 2020; 12 (5): 182. DOI: 10.3390/d12050182.

17. Wozny M., Kasiński S., Obremski K., Dąbrowski M., Dębowski M. Risk of mycotoxin contamination in thermophilic composting of kitchen and garden waste at large scale. *Applied Sciences*. 2024; 14: 5288. DOI: 10.3390/app14125288.

18. Yu J., Pedroso I. R. Mycotoxins in cereal-based products and their impacts on the health of humans, livestock animals and pets. *Toxins*. 2023; 15 (8): 480. DOI: 10.3390/toxins15080480.

Authors' information:

Irina Yu. Potoroko, doctor of technical sciences, professor of the department of food and biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, ORCID 0000-0002-3059-8061, AuthorID 646677.

E-mail: irina_potoroko@mail.ru

Artem V. Malinin, assistant at the department of food and biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, ORCID 0000-0001-9270-5945, AuthorID 1031401. *E-mail: malininv@susu.ru*

Ammar M. Y. Kadi, assistant at the department of food and biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ORCID 0000-0003-2755-1497, AuthorID 1130169, *E-mail: kadia@susu.ru*

Varisha Anjum, doctor of philosophy (PhD) pharmacognosy and phytochemistry, senior researcher of the department of food technology and biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ORCID 0000-0001-6916-5653, AuthorID 1257193, *E-mail: aniumv@susu.ru*

Olga P. Neverova, candidate of biological sciences, associate professor, ORCID 0000-0002-2474-2290, AuthorID 393632; *E-mail: opneverova@mail.ru*