

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.32-46>
УДК 636.085.55+664.72



Физические методы снижения содержания микотоксинов в кормах и их применение в комбикормовой промышленности (обзор)

© 2021. С. В. Брагинец, О. Н. Бахчевников ✉

ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», г. Зерноград, Российская Федерация

В обзоре рассмотрены вопросы снижения содержания микотоксинов в кормах физическими методами и их применения при производстве комбикормов. Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что физические методы снижения содержания микотоксинов в кормах являются достаточно эффективными. Физические методы включают очистку и сортировку сырья, шелушение зерна, измельчение с удалением наружных слоев зерна, нагревание, экструдирование, воздействие неионизирующих и ионизирующих излучений, а также холодной плазмы. Наиболее эффективны для снижения содержания микотоксинов в кормах тепловые методы (нагревание, экструдирование) и ионизирующие излучения (гамма-излучение, пучок электронов). Новый метод детоксикации кормов холодной плазмой является перспективным, но требует дополнительного исследования. Для наиболее полного удаления микотоксинов рационально сочетание различных физических методов, а именно очистки и сортировки на предварительном этапе, тепловой или лучевой обработки на завершающем. Но для применения физических методов в комбикормовой промышленности необходимо определение рациональных параметров их выполнения, а также установление оптимальных комбинаций различных методов для конкретных микотоксинов. Тематика снижения содержания микотоксинов в кормах физическими методами является перспективной, но требует проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова: корма, комбикорм, микотоксины, удаление микотоксинов, физический метод, сортировка, нагревание, экструдирование, облучение

Благодарности: работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской» (тема № 0706-2019-0006).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Брагинец С. В., Бахчевников О. Н. Физические методы снижения содержания микотоксинов в кормах и их применение в комбикормовой промышленности (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2021;22(1):32-46. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.32-46>

Поступила: 13.10.2020

Принята к публикации: 25.01.2021

Опубликована онлайн: 22.02.2021

Physical methods of mycotoxin content reduction in feeds and application of them in the compound feed industry (review)

© 2021. Sergey V. Braginetz, Oleg N. Bakhchevnikov ✉

Agricultural Research Center Donskoy, Zernograd, Russian Federation

The review considers the problems of mycotoxin content reduction in feed using physical methods and application of these methods when producing compound feeds. The analysis of scientific publications on the topic under research has shown that physical methods of lowering mycotoxin content in feed are rather effective. These methods include cleaning and sorting of raw materials, grain husking, grain refining with removal of outer layers of grain, heating, extrusion, the effect of non-ionizing and ionizing radiation and cold plasma. Thermal methods (heating and extrusion) and ionizing radiation (gamma-radiation and electron beam) are most effective for a mycotoxin content reduction in feed. The new method of feed detoxication by cold plasma is perspective, but requires additional research. To make the removal of mycotoxins fully complete it is more efficient to combine different physical methods, namely cleaning and sorting at the preliminary stage and heating or irradiation at the final stage. But before applying physical methods into the compound feed industry the rational parameters of their execution should be determined and optimum combinations of different methods for certain mycotoxins should be specified. The subject area of mycotoxin content reduction in feed using physical methods is perspective, but requires carrying out additional research.

Keywords: feed, compound feed, mycotoxins, mycotoxin removal, physical method, sorting, heating, extrusion, irradiation

Acknowledgement: the research was carried out within the state assignment of the Agricultural Research Centre Donskoy (theme No. 0706-2019-0006).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Braginetz S. V., Bakhchevnikov O. N. Physical methods of mycotoxin content reduction in feed and application of them in the compound feed industry (review). *Agrarnaya nauka Euro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(1):32-46. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.1.32-46>

Received: 13.10.2020

Accepted for publication: 25.01.2021

Published online: 22.02.2021

Проблема контаминации кормов микотоксинами. В настоящее время высокое содержание микотоксинов в кормах является актуальной проблемой [1, 2]. Микотоксины – это вторичные метаболиты микроскопических грибов, опасные для человека и животных [3]. Их образуют токсигенные грибы родов *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Claviceps* и другие, которые способны поражать сельскохозяйственные растения во время роста, сбора урожая, транспортировки и хранения [4, 5]. К наиболее распространенным микотоксинам относят афлатоксины, охратоксин А, а также фузариотоксины (зеараленон, фумонизины, дезоксиниваленон и его ацетаты, ниваленон, Т-2 и НТ-2 токсины) [3, 4, 6, 7]. Недавно в серии публикаций российских исследователей обобщены данные микотоксикологического мониторинга, указывающие на высокий риск контаминации основных видов комбикормового сырья – фуражного зерна и продукции переработки семян масличных культур, а также полнорационных комбикормов [5, 8, 9, 10]. Таким образом, для комбикормовых предприятий обработка сырья растительного происхождения с целью снижения содержания в нем микотоксинов относится к числу наиболее приоритетных задач [11, 12, 13].

Методы снижения содержания микотоксинов. Методы, используемые для снижения содержания микотоксинов в кормах, основаны на их трансформации (преобразовании) в менее опасные вещества, либо в снижении биодоступности с помощью сорбентов [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Следует отметить, что в данном обзоре используется термин «снижение содержания микотоксинов», обозначающий их удаление и разрушение (деградацию). В англоязычной научной литературе ему соответствует универсальный термин «mycotoxins reduction» – редукция микотоксинов [12, 15, 17].

По виду воздействия методы снижения содержания микотоксинов подразделяют на физические (механические и термические воздействия, действие излучения), химические (обработка веществами, в том числе озоном, вступающими в химические реакции с микотоксинами), биологические (обработка живыми бактериальными культурами и ферментными препаратами) и сорбционные (с использованием разнообразных связывающих неорганических и органических агентов) [12, 18].

В последнее время в комбикормовой промышленности, особенно отечественной, основными методами снижения содержания микотоксинов стали химический и сорбционный [11, 17]. Химические технологии являются достаточно сложными и дорогостоящими, а, кроме того, еще и опасными для работников предприятий и потребителей кормов [1]. Опыт же применения сорбентов показал, что, помимо токсинов, они могут связывать и ценные компоненты корма, например витамины и микроэлементы [15]. Кроме того, сорбенты эффективно связывают не все микотоксины [15, 16, 19].

В то же время изучение научной литературы показало, что в последнее время снова возрос интерес к физическим методам снижения содержания микотоксинов в кормах и технологиям их применения в комбикормовой промышленности [11, 12]. Это обусловило необходимость проведения систематического обзора и критического анализа научных публикаций, посвященных физическим методам детоксикации кормов. К сожалению, в научных публикациях на русском языке этому вопросу уделено все еще недостаточно внимания. Основная доля публикаций отечественных ученых посвящена использованию для снижения содержания микотоксинов различных сорбентов, а статей с результатами исследований физических методов немного. Именно поэтому основная часть цитируемых в данном обзоре публикаций принадлежит иностранным авторам.

Цель исследования – обобщение и анализ научных публикаций, посвященных физическим методам снижения содержания микотоксинов в кормах, уточнение информации о рациональных параметрах их осуществления в комбикормовой промышленности и влиянии на качество кормов.

Материал и методы. Выбор и систематический обзор научных публикаций по теме исследования выполнен по методике R. J. Torgasco [20] и С. Okoli [21]. Для отбора научных статей на английском языке провели поиск по ключевым словам в библиографических базах «Google Scholar» и «Scopus», статей на русском языке – по ключевым словам в библиографической базе «Google Scholar» и «Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU». Дополнительно провели обзор научных журналов по данной тематике. Также были изуче-

ны пристатейные списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных релевантных статей. Поиск публикаций осуществляли по следующим ключевым словам: *mycotoxins* (микотоксины), *mycotoxins reduction* (снижение содержания микотоксинов), *removal of mycotoxins* (удаление микотоксинов). Также в комбинации с предыдущими терминами для поиска были использованы следующие ключевые слова: *feed* (корм), *physical method* (физический метод), *thermal processes* (тепловые процессы), *extrusion* (экструдирование), *irradiation* (облучение). В качестве временных рамок для обзора научных статей был выбран интервал 2000-2020 гг. Более ранние научные публикации обзоредали лишь при отсутствии новейших сведений по конкретному аспекту изучаемой темы.

Основная часть. 1. Очистка и сортировка сырья. Зерно, пораженное грибами, отличается от качественного по цвету, плотности и массе, поэтому возможна его сортировка различными способами [17, 21, 22]. Наиболее распространена влажная сепарация (флотация), основанная на всплывании в жидкости более легких зерен, которые, как показывают исследования, имеют малый вес из-за значительного поражения грибами и содержат больше микотоксинов [12, 18]. Кроме того, как считают W.-X. Peng и соавторы, вода частично смывает микромицеты и микотоксины с поверхности зерен [12].

Опубликовано несколько статей, посвященных изучению влияния водной флотации на уменьшение содержания микотоксинов в зерне. A. Visconti и соавторы сообщают о снижении содержания дезоксиниваленола в зерне пшеницы на 23 % в результате применения этого метода [23]. L. Matumba и соавторы установили, что эффект от сортировки водной флотацией зерен кукурузы составлял от 27 до 70 % для различных микотоксинов (снижение содержания фумонизина В₁ составило 27 %, афлатоксина В₁ – 36 %, дезоксиниваленола – 40 %, ацетилдезоксиниваленола – 70 %) [24]. Простое промывание зерен водой без их сортировки является малоэффективным для удаления микотоксинов, их содержание снижается лишь на 10-20 % [12].

Результаты опытов L. Van der Westhuizen и соавторов по ручной сортировке зерна кукурузы по цвету показали эффективность и принципиальную возможность применения

такого метода для снижения содержания фумонизина В₁ [25].

Механическая гравитационная и воздушная сепарация также может быть использована для удаления пораженного микотоксином зерна. На комбикормовых заводах механизированная очистка и сортировка зерна выполняется последовательно несколькими машинами, в частности барабанными, гравитационными и воздушными сепараторами. Механическая сортировка основана на более низкой плотности потенциально зараженного зерна [11, 12].

Несколько ученых изучали влияние механической сепарации зерна в промышленных машинах на содержание микотоксинов. С. S. Tibola и соавторы установили, что механическая сортировка (воздушный и гравитационный сепараторы) обеспечила уменьшение содержания дезоксиниваленола в зерне пшеницы на 74,7-88,9 %, причем степень снижения была неодинаковой для разных ее сортов [26]. Но при этом было отсортировано для удаления 33 % зерна (по массе). С. Schwake-Anduschus и соавторы установили, что очистка зерна овса воздушным сепаратором приводила к снижению содержания Т-2 и НТ-2 токсинов, но сопровождалась широкой вариацией этого показателя от 2,3 до 100 % (в среднем – 45-48 %), которую они объяснили различиями сортов и мест произрастания [27]. К. Lancova и соавторы сообщают почти о полном удалении ниваленола, а также Т-2 и НТ-2 токсинов в результате просеивания и шлифовки зерна пшеницы [28].

Традиционные методы очистки и сортировки зерна, однако, не подходят для применения на крупных предприятиях с целью снижения содержания микотоксинов в сырье по причине низкой эффективности и высоких затрат [11]. Тем не менее, по мнению W.-X. Peng и соавторов, весьма перспективной можно считать сепарацию по технологии оптического распознавания образов, которая может стать экономически выгодной для промышленного применения уже в ближайшем будущем [12].

Таким образом, предварительная очистка и сортировка зерна позволяет несколько снизить содержание микотоксинов, хотя и не является достаточной. Эффективность этого метода может быть значительно повышена после широкого внедрения в промышленности оптических сепараторов.

2. Шелушение зерна. При подготовке пленчатых зерновых культур (овес, ячмень, просо) к введению в состав комбикормов применяют технологическую операцию шелушения, заключающуюся в отделении поверхностных слоев зерен. Выполнение этой операции может привести к удалению вместе с поверхностным слоем и загрязнений, включая грибы и микотоксины [29]. Опубли-

ковано несколько статей, посвященных влиянию шелушения на детоксикацию зернового сырья [29, 30, 31]. Их авторы установили, что существует взаимосвязь между продолжительностью обработки и содержанием микотоксинов: увеличение длительности процедуры приводит к более значительному уменьшению содержания микотоксинов, в частности дезоксиниваленола (табл. 1) [29, 31].

Таблица 1 – Влияние продолжительности шелушения на снижение содержания дезоксиниваленола и потерю массы зерна /

Table 1 – The effect of husking time on deoxynivalenol content reduction and grain mass loss

Исследователь / Researcher	Культура / Crop	Продолжительность шелушения / Husking time	Уменьшение содержания дезоксиниваленола, % / Deoxynivalenol reduction, %	Потеря массы, % / Mass loss, %
G. Rios et al., 2009 [29]	Твердая пшеница / Durum Wheat	5 мин / 5 min	45	10
		10 мин / 10 min	60	20
		30 мин / 30 min	70	35
J. D. House et al., 2003 [31]	Ячмень / Barley	15 с / 15 s	66	15
		45 с / 45 s	82	26
		90 с / 90 s	90	40

При этом, как установили G. Rios и соавторы, начальное содержание дезоксиниваленола (382 и 4203 мкг/кг) в зерне практически не влияет на степень его последующего удаления в ходе обработки [29].

Метод детоксикации шелушением может применяться в комбикормовой промыш-

ленности при подготовке пленчатых зерновых культур. Его недостатком является то, что при увеличении продолжительности обработки шелушением вместе с уменьшением содержания микотоксинов возрастает потеря массы зерен (рис. 1), что увеличивает их расход и повышает себестоимость продукции [12, 29].

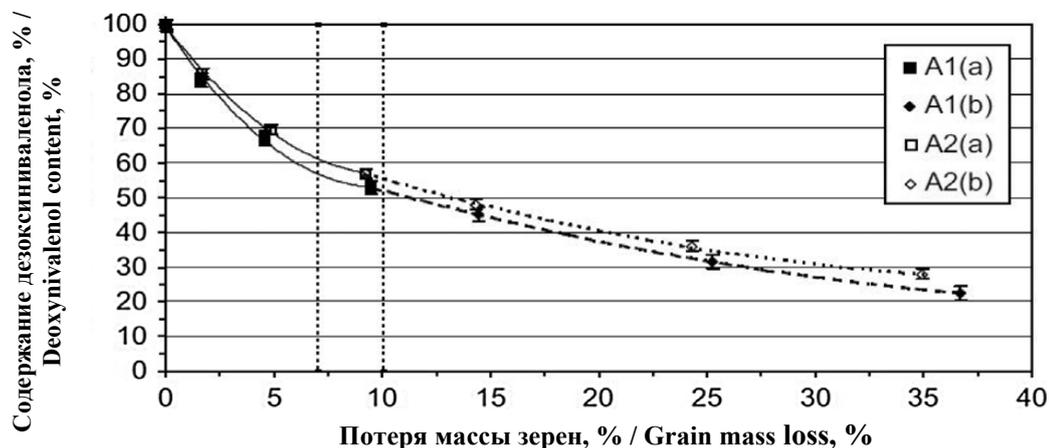


Рис. 1. Взаимосвязь между потерей массы зерен и снижением содержания дезоксиниваленола в зернах твердой пшеницы при шелушении (G. Rios et al., 2009): A1 – образец с начальной концентрацией дезоксиниваленола 382 мкг/кг; A2 – образец с начальной концентрацией дезоксиниваленола 4203 мкг/кг; а – зона быстрого уменьшения содержания дезоксиниваленола; б – зона медленного уменьшения содержания дезоксиниваленола /

Fig. 1. Relationship between the grain mass loss and reduction of deoxynivalenol content in durum wheat grain during husking (G. Rios et al., 2009): A1 – sample with initial deoxynivalenol concentration of 382 mcg/kg; A2 – sample with initial deoxynivalenol concentration of 4203 mcg/kg; a – zone of sharp decrease of the deoxynivalenol content; b – zone of slower decrease of the deoxynivalenol content

3. *Измельчение сырья.* В комбикормовой промышленности широко применяется технологическая операция измельчения сырья, в частности фуражного зерна. Обычное измельчение зерна, приводящее к его разделению на мелкие частицы и их перемешиванию, может лишь перераспределить содержащиеся в нем микотоксины, не влияя на их общее содержание. Логично предположить, что снизить содержание микотоксинов в зерне может измельчение, сопровождающееся удалением наружных наиболее пораженных слоев (отрубей), в результате чего в состав корма будут включены внутренние наименее пораженные части зерновок [32]. В то же время для зерна с высокой степенью контаминации характерно поражение микромицетами и его эндосперма. Тем не менее результаты исследований показали, что отделение отрубей уменьшает содержание микотоксинов, в частности дезоксиниваленола, в размолотом зерне [23, 28]. Так, G. Rios с соавторами сообщает о снижении содержания дезоксиниваленола в пшенице после размола и отделения отрубей на 78,4 % [33]. По данным С. S. Tibola и соавторов, содержание дезоксиниваленола и зеараленона в размолотой пшенице уменьшалось от 10 до 42 % к первоначальному уровню в зависимости от степени их начального содержания, в то время как в отрубях увеличивалось по отношению к концентрации в цельном зерне [34].

На основании изложенного можно сделать вывод, что измельчение зернового сырья с отделением отрубей позволяет снизить содержание микотоксинов, в частности дезоксиниваленола. Но этот физический метод применим лишь в пищевой промышленности, тогда как для комбикормовой отделение отрубей и их направление в отходы неприемлемо, так как увеличивает себестоимость кормов и удаляет из их состава ценные питательные вещества.

4. *Нагревание.* Известно, что микотоксины устойчивы к действию высоких температур [15]. В. Кабак установил, что температура разрушения афлатоксина В₁ составляет 268 °С, охратоксина А – 169 °С, фумонизина В₁ – 120 °С, дезоксиниваленола – 153 °С, зеараленона – 155 °С [35]. Тем не менее результаты некоторых исследований свидетельствуют о том, что содержание микотоксинов в кормовом сырье может быть снижено при высокотемпературной сушке [12]. В. Е. Yumbe-Guevara с соавторами установили, что снижение содержания микотоксинов при нагревании фуражного зерна зависит от температуры, продолжительности воздействия и степени

измельчения [36]. Они выяснили, что разрушение микотоксинов пропорционально возрастает при увеличении продолжительности обработки и температуры. Наиболее быстрое разрушение дезоксиниваленола, зеараленона, ниваленола наблюдалось при температуре 200-220 °С, тогда как при температуре 140-180 °С скорость разрушения была небольшой. При этом деструкция микотоксинов при нагревании была более значительной для измельченных зерен ячменя, чем для целых. Так, при нагреве измельченных зерен ячменя при температуре 220 °С в течение 50 мин было достигнуто полное разрушение дезоксиниваленола и зеараленона, тогда как в целых зернах содержание этих микотоксинов после обработки в течение 50 мин составило около 50 % от первоначального (рис. 2).

5. *Обработка перегретым паром.* Обработка сырья перегретым паром часто применяется в пищевой и комбикормовой промышленности. С. Pronyk с соавторами изучили влияние обработки зерна пшеницы перегретым паром (110-185 °С) на содержание в нем дезоксиниваленола [37]. Они установили, что, помимо температуры и продолжительности воздействия, значительное влияние на разрушение микотоксина оказывает скорость движения струи пара. Наибольший эффект разрушения дезоксиниваленола до 50 % был достигнут при обработке зерна струей пара со скоростью 1,3 м/с при температуре 185 °С и продолжительности 6 мин. Эти результаты были подтверждены в исследовании Y. Liu и соавторов [38]. В то же время влияние обработки перегретым паром на содержание других микотоксинов остается неизученным.

6. *Экструдирование.* Экструдирование разных видов сырья и его смесей является одним из самых распространенных технологических процессов в пищевой и комбикормовой промышленности. Было опубликовано много статей, посвященных влиянию этого процесса на снижение содержания микотоксинов [39]. Экструзия сочетает в себе эффекты описанных выше физических методов нагревания и обработки перегретым паром [12, 40]. Температура более 160 °С при экструзии вызывает значительную дегградацию афлатоксинов [41], но в то же время негативно влияет на качество и содержание протеина [42]. На основе изучения научных публикаций можно сделать вывод, что экструзионная обработка приводит к значительному разрушению микотоксинов при условии достижения критических для них температур (табл. 2) [35].

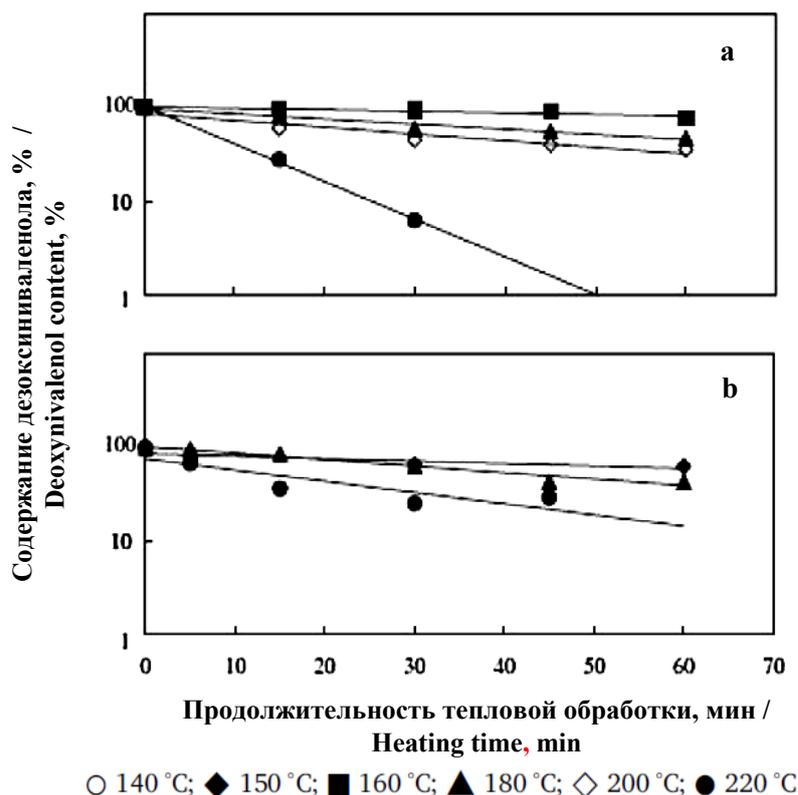


Рис. 2. Влияние температуры и продолжительности тепловой обработки на содержание дезоксиниваленола в зерне ячменя (В. Е. Yumbe-Guevara et al., 2003): а – измельченные зерна; б – целые зерна / Fig. 2. The effect of temperature and heating time on deoxynivalenol content in barley (В. Е. Yumbe-Guevara et al., 2003): а – barley powder; б – barley grains

Таблица 2 – Снижение содержания микотоксинов в сырье в результате экструдирования / Table 2 – Mycotoxin content reduction in raw materials as a result of extrusion process

Исследователь / Researcher	Сырье / Raw material	Температура, °C / Tempera- ture, °C	Микотоксин / Mycotoxin	Уменьшение содержа- ния микотоксина, % / Mycotoxin reduction, %
Elias-Orozco R. et al. [43]	Измельченная кукуруза / Maize flour	140	Афлатоксины В ₁ и М ₁ / Aflatoxins В ₁ & М ₁	45
Cazzaniga D. et al. [44]	Измельченная пшеница / Wheat flour	180	Дезоксиниваленол / Deoxynivalenol	95,0-99,5
		180	Афлатоксин В ₁ / Aflatoxin В ₁	10-25
Castells M. et al. [45]	Измельченный ячмень / Barley flour	140	Охратоксин А / Ochratoxin А	83,5
		160		80,5
		180		86,5
Pleadin J. et al. [46]	Зерна пшеницы / Wheat grains	150	Зеараленон / Zearalenone	48
		170		53
		190		67
		150	Дезоксиниваленол / Deoxynivalenol	51
Pleadin J. et al. [46]	Зерна ячменя / Barley grains	170		61
		190		71
		150	Зеараленон / Zearalenone	58
		170		69
		190		100
Pleadin J. et al. [46]	Зерна ячменя / Barley grains	150	Дезоксиниваленол / Deoxynivalenol	73
		170		80
		190		87

На основе приведенных в таблице 2 данных можно сделать вывод о том, что повышенные температуры при экструзии увеличивает степень разрушения микотоксинов. Помимо температуры, важное значение имеют такие параметры, как исходная влажность сырья и частота вращения шнека экструдера. Влияние этих параметров экструдирования на снижение содержания микотоксинов подробно рассмотрено в статье M. Castells и соавторов [45]. При изучении ими изменения содержания охратоксина А в измельченном ячмене в результате экструдирования было установлено, что при постоянной температуре более значительное снижение содержания этого микотоксина наблюдается при меньшей частоте вращения шнека, что объясняется большей продолжительностью тепловой обработки сырья. При температуре экструзии 160 °С снижение частоты вращения шнека со 100 до 50 мин⁻¹ привело к увеличению разрушения охратоксина А с 66,5 до 80,5 %. Влияние влажности сырья на изменение содержания этого микотоксина оказалось не столь значительным. Так, при температуре экструзии 160 °С изменение влажности с 30 до 24 % привело к увеличению деградации охратоксина А на 5 %. Следует особо отметить мнение, высказанное K. M. Schaich, о том, что образующиеся при экструзии растительного сырья свободные радикалы также способствуют разрушению микотоксинов, усиливая воздействие высокой температуры [47].

7. Облучение. Технологии обработки сырья ионизирующим и неионизирующим излучениями с высокой эффективностью применяются в пищевой и комбикормовой промышленности для уничтожения патогенных микроорганизмов [12, 48]. Все виды длинноволнового неионизирующего излучения – инфракрасное, сверхвысокочастотное (СВЧ) и радиоизлучение – не обладают энергией, достаточной для ионизации атомов. Коротковолновое ионизирующее излучение (гамма-излучение и рентгеновские лучи) обладает высокой энергией, достаточной для ионизации атомов. Так как источником такого излучения являются радиоактивные элементы, его применение законодательно ограничено [12]. Тем не менее в ЕС разрешено применение гамма- и рентгеновского излучения для обеззараживания сырья в пищевой и комбикормовой промышленности при соблюдении норм безопасности [49, 50]. Для создания потока

гамма-излучения в промышленности используют радиоактивный изотоп кобальта ⁶⁰Co.

Главными процессами, вызывающими сокращение содержания микотоксинов при воздействии излучений, являются нагревание и гидролиз [12]. Эффект нагревания сырья обеспечивается высокой мощностью и большой длительностью облучения, что и определяет его эффективность [12, 48]. Согласно результатам исследования S. Herzallah и соавторов, неионизирующее излучение (СВЧ и солнечный свет) при кратковременном воздействии (5-10 мин) на комбикорм для птиц показало меньшую эффективность для снижения содержания афлатоксинов, чем гамма-излучение [48]. В то же время длительное воздействие (3-30 ч) солнечных лучей на корм обеспечило деградацию до 75 % афлатоксинов, тогда как краткосрочное действие гамма-излучения привело к деградации лишь 37 % токсинов, а СВЧ-излучения – 33 %.

Однако результаты исследования I. Ghapet и соавторов показали высокую эффективность именно гамма-излучения для разрушения афлатоксина В₁ [51]. По их данным, эффективность гамма-излучения повышалась с увеличением его дозы. Так, при увеличении дозы поглощенного излучения с 4 до 10 кГр (килогрей) разрушение этого микотоксина в зерне пшеницы повысилось с 31 до 84 %, а воздействие гамма-излучения дозой 10 кГр вызвало деградацию афлатоксина В₁ в пшеничных отрубях – на 86 %, зернах ячменя – 90 %, арахисе – 58 %.

J. He и соавторы установили, что облучение сырья вызывает протекание в нем гидролиза, что приводит к образованию свободных радикалов, усиливающих редукцию микотоксинов, в частности Т-2 и НТ-2 токсинов, при этом процесс более эффективно происходит при увлажнении сырья [52]. По данным K. O'Neill и соавторов, дезоксиниваленол в сухих зернах кукурузы имеет высокую стабильность даже при значительной дозе гамма-излучения в 50 кГр, в то время как увлажнение сырья позволило добиться снижения содержания этого микотоксина при малой дозе излучения 5 кГр [53] (рис. 3).

T. Stepanik и соавторы определили, что облучение направленным пучком электронов с целью деградации дезоксиниваленола значительно эффективнее для увлажненных зерен кукурузы, чем для сухих [54].

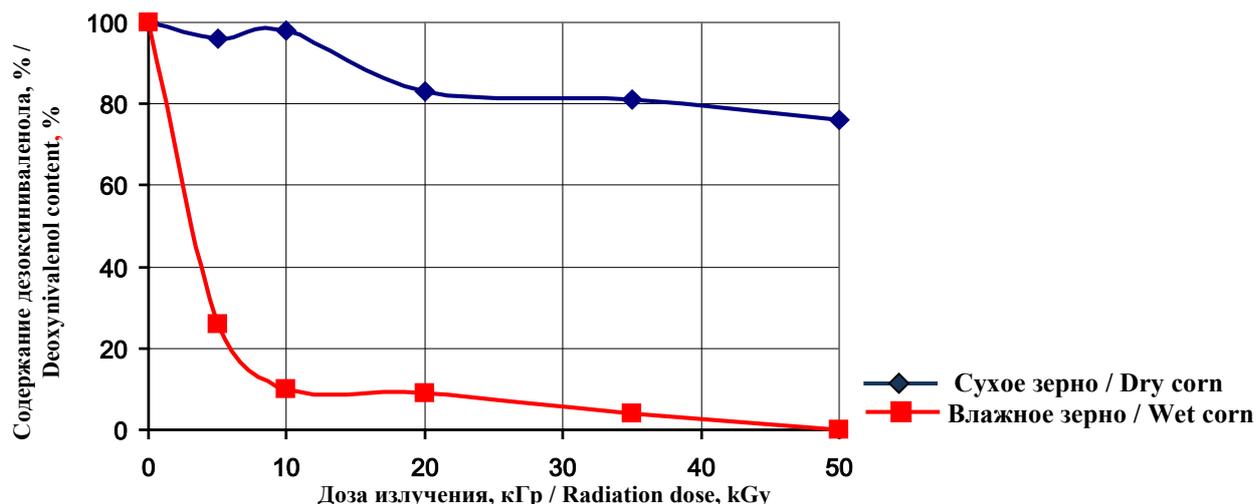


Рис. 3. Разрушение дезоксиниваленола гамма-излучением в сухих и увлажненных зернах кукурузы (O'Neill et al., 1993) /

Fig 3. Destruction of deoxynivalenol by gamma irradiation in dry and wet maize corn (O'Neill et al., 1993)

Несмотря на необходимость дополнительных расходов на обеспечение строгих норм безопасности и обеспокоенность последствиями облучения, обработка пищевого и кормового сырья ионизирующими излучениями, в частности гамма-излучением, находит все большее применение в комбикормовой и пищевой промышленности [55, 56].

А. Mehrez и соавторы изучили действие гамма-излучения на содержание охратоксина А в зерне пшеницы и пришли к тем же выводам, что и К. О'Neill и соавторы [53], а именно о высокой стабильности этого микотоксина в сухом зерне и эффективности облучения увлажненного зерна с целью разрушения токсина [57]. Т. Calado и соавторы в результате изучения деградации охратоксина А в измельченных зернах пшеницы под действием гамма-излучения установили, что во влажном сырье содержание токсина уменьшилось на 98 % при дозе 8,6 кГр [58].

Х. Ф. Мамедов установил, что гамма-излучение дозой 10 кГр обеспечивает детоксикацию комбикормов, загрязненных афлатоксином В₁ и охратоксином А [59]. Изучая действие гамма-излучения на содержащиеся в фуражном зерне микотоксины (зеараленон, афлатоксин В₁ и охратоксин А), Х. Ф. Мамедов установил, что скорость разрушения микотоксинов увеличивается по мере увеличения влажности зерен [60]. При их увлажнении до 26 % излучение дозой 25 кГр обеспечивало полное разрушение микотоксинов, в то время как для сухого зерна с влажностью 4 % та же

доза излучения вызвала снижение их содержания лишь на 65-75 %.

В последние годы получены данные по влиянию электронно-лучевой обработки (electron-beam processing), т. е. воздействия остросфокусированного пучка электронов (рис. 4), на деградацию микотоксинов [61, 62].

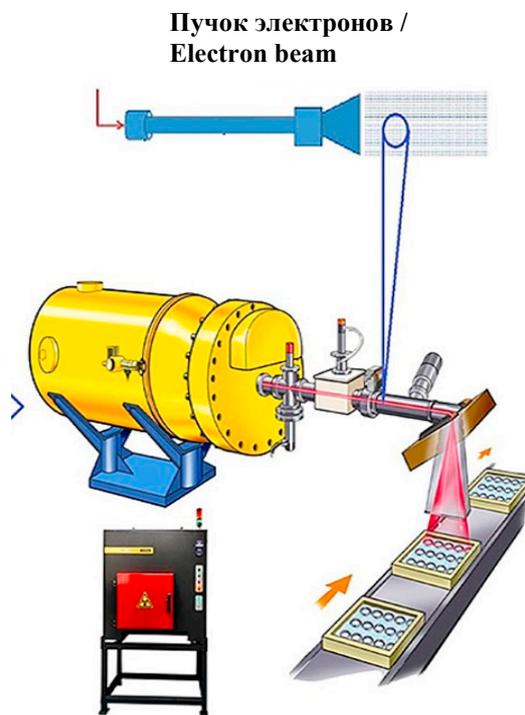


Рис. 4. Электронно-лучевая обработка сырья (А. М. Khaneghah et al., 2020) /

Fig 4. Electron-beam processing of raw materials (А. М. Khaneghah et al., 2020)

А. М. Khaneghah и соавторы установили эффективность для деградации микотоксинов электронного излучения дозой до 30 кГр [62]. Х. Луо и соавторы определили, что при воздействии пучка электронов на зерна пшеницы основное влияние на деградацию микотоксинов оказывает не доза излучения, а влажность сырья [63]. Так, увеличение дозы излучения с 10 до 50 кГр при постоянной влажности привело к повышению деградации охратоксина А и зеараленона лишь на 5-6 %, увеличение влажности сырья с 12 до 17 % при той же дозе излучения повысило деградацию в среднем на 30 % [63].

Наряду с ионизирующими излучениями, продолжается изучение эффективности широко используемых неионизирующих излучений, а именно микроволнового и ультрафиолетового [64]. Действие ультрафиолетового излучения является экономичным способом детоксикации сырья [12, 64]. М. М. Atalla и соавторы сообщают, что афлатоксин В₁ в зерне пшеницы был полностью разрушен после получасовой обработки ультрафиолетовым излучением с длиной волны 254 нм [65]. Другие исследователи также подтверждают эффективность деградации микотоксинов в различном сырье под действием ультрафиолетовых лучей [66, 67]. F. Jubee и соавторы установили, что действие УФ-излучения на лесные орехи и арахис в течение 45 мин привело к снижению содержания суммы афлатоксинов на 96,5 % [66]. По сообщению S. Herzallah и соавторов, в результате действия солнечного излучения, частью которого является ультрафиолетовое, в течение 3 ч на комбикорм для птиц степень

разрушения афлатоксинов составила 40 %, а в течение 30 ч – 75 % [48]. Однако следует отметить, что промышленное применение ультрафиолетового излучения ограничено тем, что обрабатываемое сырье должно размещаться достаточно тонким слоем, что снижает производительность.

Микроволновое СВЧ-излучение, по мнению ряда зарубежных исследователей, является малоэффективным для снижения содержания микотоксинов [64, 68]. По данным E. Numanoglu и соавторов, содержание дезоксинаваленола после СВЧ-обработки при температуре 175 °С снизилось лишь на 40 % [69]. Сходные результаты получены и российскими исследователями. Г. Г. Юсупова сообщает, что действие на зерна пшеницы СВЧ-излучения мощностью 600 Вт и продолжительностью 90 с привело лишь к частичному разрушению афлатоксинов В₁ и В₂ [70]. Опыты Т. А. Толмачевой подтвердили эти результаты [71]. О. М. Соболева и соавторы при изучении действия СВЧ-излучения на микотоксины, содержащиеся в фуражном зерне и комбикорме, установили, что при мощности 600 Вт и частоте 915 МГц с экспозицией 90 с наблюдалось снижение содержания охратоксина А в комбикорме на 23,26 %, Т-2 токсина в комбикорме – на 38,77 %, а в зерне пшеницы – на 23,53 % [72]. Таким образом, СВЧ-излучение является недостаточно эффективным способом для снижения содержания микотоксинов.

8. *Холодная плазма.* Новым физическим методом снижения содержания микотоксинов является обработка сырья холодной (низкотемпературной) плазмой [64, 73, 74] (рис. 5).

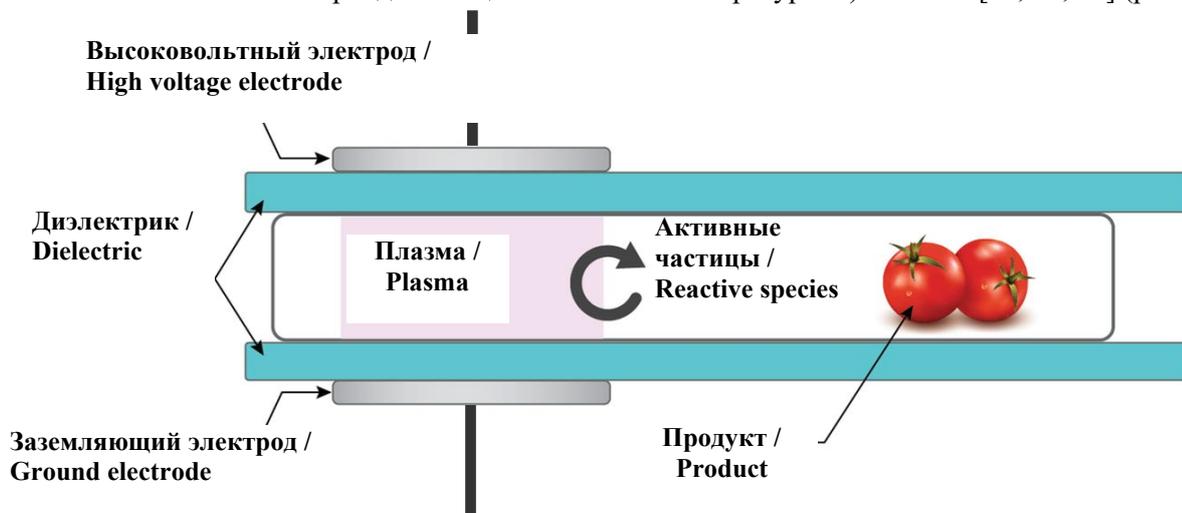


Рис. 5. Обработка сырья холодной плазмой (Annor G. A., 2019) /
 Fig 5. Cold plasma processing of raw materials (Annor G. A., 2019)

Холодная плазма представляет собой ионизированный мощным электрическим полем газ (чаще всего аргон или воздух) с температурой 20-40 °С. Результаты немногочисленных пока исследований показали, что холодная плазма эффективна для разрушения микотоксинов, в частности зеараленона и дезоксиниваленола [64]. L. Ten Bosch с соавторами изучил действие холодной плазмы на основе воздуха при атмосферном давлении и установил, что под ее воздействием происходит деградация многих микотоксинов, в том числе зеараленона, дезоксиниваленола, фумонизина В₁, Т-2 токсина [75].

S. A. Ouf и соавторы показали, что при обработке плодов пальмы холодной плазмой на основе аргона под давлением вдвое больше атмосферного в течение 9 мин были полностью уничтожены споры грибов *Aspergillus niger* и разрушены продуцируемые ими микотоксины, в частности афлатоксин В₁ [76]. Y. Devi с соавторами сообщили о снижении содержания афлатоксина В₁ на 95-96 % в арахисе под действием холодной воздушной плазмы [77]. Недавно группе исследователей (X. Wang и соавторы) удалось добиться полной деградации микотоксинов, продуцируемых грибами *Alternaria*, в результате обработки холодной плазмой на основе воздуха в течение 5 мин [78].

Таким образом, применение холодной плазмы является перспективным для снижения содержания микотоксинов, но необходимо проведение дополнительных исследований, направленных, в частности, на масштабирование этой технологии для внедрения на комбикормовых заводах.

Эффективность физических методов. Обзор научных статей показал, что существует ряд несоответствий в результатах экспериментов по снижению содержания микотоксинов в кормах. По нашему мнению, причиной этого являются различные условия проведения экспериментов, в частности разные типы используемых в них машин, а также наличие в сырье определенных примесей, например солей. Другим важным фактором, влияющим на эффективность обработки, является начальный уровень содержания микотоксинов, особенно для фуражного зерна [12, 34]. При небольшом уровне контаминации микотоксины сосредоточены на поверхности зерен или других частиц сырья, тогда как при значительном поражении грибами микотоксины прони-

кают и в глубинные слои, откуда их труднее удалить. Соответственно, при поверхностном загрязнении сырья удаление микотоксинов физическими методами наиболее эффективно.

Анализ научных работ показал, что предварительная сортировка сырья, особенно зернового, пригодна для уменьшения содержания микотоксинов, но ее необходимо сочетать с последующей обработкой одним из описанных выше физических методов. Помимо этого, для повышения эффективности сортировки целесообразно использовать компьютерное оптическое распознавание образов, хотя его применение пока сдерживает высокая стоимость оборудования.

Такие физические методы, как механическая очистка и шелушение зерна, а также измельчение с отделением поверхностных слоев зерен также весьма эффективны для снижения содержания микотоксинов в кормах. Однако происходящее в ходе их выполнения удаление значительной части сырья в отходы повышает себестоимость готовых кормов, и поэтому эти методы могут оказываться неприемлемыми для применения в комбикормовой промышленности.

Тепловые способы обработки сырья, а именно нагревание и экструдирование, как показали результаты многочисленных исследований, являются эффективными для деградации микотоксинов, но их применение оправданно лишь тогда, когда эти операции входят в технологический процесс производства кормов, в противном случае рациональна их замена на вариант с воздействием ионизирующего излучения.

Обработка сырья ионизирующими излучениями (гамма-излучение и направленный пучок электронов), согласно результатам последних исследований, является наиболее эффективной для снижения содержания микотоксинов. Но препятствием для применения этого метода является опасность радиоактивного поражения работников и необходимость принятия дорогостоящих мер безопасности. Обработка сырья неионизирующими излучениями является недостаточно эффективной для полного разрушения микотоксинов.

Новым перспективным методом детоксикации кормов является их обработка холодной плазмой, но этот метод еще недостаточно исследован, не разработаны приемы его масштабирования для использования на промышленных предприятиях.

В целом можно сделать вывод о том, что для наиболее полного удаления микотоксинов рационально сочетание различных физических методов, а именно очистки и сортировки сырья на предварительном этапе и тепловой (нагревание, экструзия) или лучевой (гамма-излучение, пучок электронов) обработки на завершающем этапе.

Заключение. Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что физические методы снижения содержания микотоксинов в кормах являются достаточно эффективными, но для обеспечения их широкого применения в комбикормовой промышленности требуются дополнительные исследования,

направленные на определение рациональных параметров их осуществления. Необходимо разработать технологические схемы, наиболее эффективные для удаления конкретных микотоксинов, и определить рациональные параметры их выполнения. Особенно важным является выявление оптимальных комбинаций различных физических методов для наиболее полной детоксикации кормов.

Авторы надеются, что данный обзор будет полезен российским ученым в качестве отправной точки для их научно-исследовательской работы по перспективной тематике снижения содержания микотоксинов в кормах физическими методами.

References

1. Haque M. A., Wang Y., Shen Z., Li X., Saleemi M. K., He C. Mycotoxin contamination and control strategy in human, domestic animal and poultry: A review. *Microbial Pathogenesis*. 2020;142:104095. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104095>
2. Abdallah M. F., Girgin G., Baydar T. Occurrence, prevention and limitation of mycotoxins in feeds. *Animal Nutrition and Feed Technology*. 2015;15(3):471-490. DOI: <http://doi.org/10.5958/0974-181x.2015.00048.7>
3. Yang C., Song G., Lim W. Effects of mycotoxin-contaminated feed on farm animals. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;389:122087. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122087>
4. Magnoli A. P., Poloni V. L., Cavaglieri L. Impact of mycotoxin contamination in the animal feed industry. *Current Opinion in Food Science*. 2019;29:99-108. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.08.009>
5. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 2. Зерно пшеницы, ячменя, овса, кукурузы. *Ветеринария сегодня*. 2020;2:139-145. DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145>
- Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova E. V. *Mikotoksikologicheskiy monitoring. Soobshchenie 2. Zerno pshenitsy, yachmenya, ovsa, kukuruzy*. [Mycotoxilogical monitoring. Part 2. Wheat, barley, oat and maize grain]. *Veterinariya segodnya = Veterinary Science Today*. 2020;2:139-145. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145>
6. Bryden W. L. Mycotoxin contamination of the feed supply chain. Implications for animal productivity and feed security. *Animal Feed Science and Technology*. 2012;173(1-2):134-158. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.12.014>
7. Richard J. L. Some major mycotoxins and their mycotoxicoses – an overview. *International Journal of Food Microbiology*. 2007;119(1-2):3-10. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.019>
8. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 1. Полнорационные комбикорма для свиней и птицы (2009-2018 гг.). *Ветеринария сегодня*. 2020;(1):60-65. DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-1-32-60-65>
- Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova E. V. *Mikotoksikologicheskiy monitoring. Soobshchenie 1. Polnoratsionnye kombikorma dlya sviney i ptitsy (2009-2018 gg.)*. [Mycotoxicological monitoring. Part 1. Complete mixed feed for pigs and poultry (2009–2018)]. *Veterinariya segodnya = Veterinary Science Today*. 2020;(1):60-65. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-1-32-60-65>
9. Кононенко Г. П., Буркин А. А., Зотова Е. В. Микотоксикологический мониторинг. Сообщение 3. Кормовая продукция от переработки зернового сырья. *Ветеринария сегодня*. 2020;(3):213-219. DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-3-34-213-219>
- Kononenko G. P., Burkin A. A., Zotova E. V. *Mikotoksikologicheskiy monitoring. Soobshchenie 3. Kormovaya produktsiya ot pererabotki zernovogo syr'ya*. [Mycotoxicological monitoring. Part 3. Feedstuffs from raw grain processing]. *Veterinariya segodnya = Veterinary Science Today*. 2020;(3):213-219. (In Russ.). DOI: <http://doi.org/10.29326/2304-196X-2020-3-34-213-219>
10. Дробин Ю. Д., Солдатенко Н. А., Сухих Е. А., Коваленко А. В. Итоги мониторинга контаминации фуражного зерна пшеницы, ячменя и кукурузы на юге России. *Российский журнал «Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии»*. 2015;4:27-30. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25020727>
- Drobin Yu. D., Soldatenko N. A., Sukhikh E. A., Kovalenko A. V. *Itogi monitoringa kontaminatsii furazhnogo zerna pshenitsy, yachmenya i kukuruzy na yuge Rossii*. [Results of monitoring of contamination of wheat, barley and corn fodder grain on the south of Russia]. *Rossiyskiy zhurnal «Problemy veterinarnoy sanitarii, gigeny i ekologii»*

- = The Russian journal «Problems of Veterinary Sanitation, Hygiene and Ecology». 2015;4:27-30. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25020727>
11. Čolović R., Puvača N., Cheli F., Avantageggiato G., Greco D., Duragić O., Kos J., Pinotti L. Decontamination of Mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed. *Toxins*. 2019;11(11):617. DOI: <http://doi.org/10.3390/toxins11110617>
 12. Peng W-X., Marchal J. L. M., van der Poel A. F. B. Strategies to prevent and reduce mycotoxins for compound feed manufacturing. *Animal Feed Science and Technology*. 2018;237:129-153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2018.01.017>
 13. Oliveira M., Vasconcelos V. Occurrence of mycotoxins in fish feed and its effects – a review. *Toxins*. 2020;12(3):160. DOI: <http://doi.org/10.3390/toxins12030160>
 14. Luo Y., Liu X., Li J. Updating techniques on controlling mycotoxins – A review. *Food Control*. 2018;89:123-132. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.01.016>
 15. Jard G., Liboz T., Mathieu F., Guyonvarc'h A., Lebrihi A. Review of mycotoxin reduction in food and feed: from prevention in the field to detoxification by adsorption or transformation. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2011;28(11):1590-1609. DOI: <http://doi.org/10.1080/19440049.2011.595377>
 16. Попова С. А., Скопцова Т. И., Лосякова Е. В. Микотоксины в кормах: причины, последствия, профилактика. *Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии*. 2017;(1):16-23. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/17966566>
 - Porova S. A., Skoptsova T. I., Losyakova E. V. *Mikotoksiny v kormakh: prichiny, posledstviya, profilaktika*. [Mycotoxins in feeds: reasons, consequences, prevention]. *Izvestiya Velikolukskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2017;(1):16-23. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/17966566>
 17. Alberts J. F., Lilly M., Rheeder J. P., Burger H-M., Shephard G. S., Gelderblom W. C. A. Technological and community-based methods to reduce mycotoxin exposure. *Food Control*. 2017;73:101-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.029>
 18. Kabak B., Dobson A. D. W., Var I. Strategies to prevent mycotoxin contamination of food and animal feed: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2006;46(8):593-619. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408390500436185>
 19. Jouany J. P. Methods for preventing, decontaminating and minimizing the toxicity of mycotoxins in feeds. *Animal Feed Science and Technology*. 2007;137(3-4):342-362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2007.06.009>
 20. Torraco R. J. Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future. *Human Resource Development Review*. 2016;15(4):404-428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1534484316671606>
 21. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. *Communications of the Association for Information Systems*. 2015;37:879-910. DOI: <http://dx.doi.org/10.17705/1cais.03743>
 22. Afolabi C. G., Bandyopadhyay R., Leslie J. F., Ekpo E. J. A. Effect of sorting on incidence and occurrence of fumonisins and *Fusarium verticillioides* on maize from Nigeria. *Journal of Food Protection*. 2006;69(8):2019-2023. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028x-69.8.2019>
 23. Visconti A., Haidukowski E. M., Pascale M., Silvestri M. Reduction of deoxynivalenol during durum wheat processing and spaghetti cooking. *Toxicology Letters*. 2004;153(1):181-189. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2004.04.032>
 24. Matumba L., Van Poucke C., Ediage E. N., Jacobs B., De Saeger S. Effectiveness of hand sorting, flotation/washing, dehulling and combinations thereof on the decontamination of mycotoxin-contaminated white maize. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2015;32(6):960-969. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1029535>
 25. Van der Westhuizen L., Shephard G. S., Rheeder J. P., Burger H. M., Gelderblom W. C. A., Wild C. P., Gong Y. Y. Optimising sorting and washing of home-grown maize to reduce fumonisin contamination under laboratory-controlled conditions. *Food Control*. 2011;22(3-4):396-400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2010.09.009>
 26. Tibola C. S., Fernandes J. M. C., Guarienti E. M. Effect of cleaning, sorting and milling processes in wheat mycotoxin content. *Food Control*. 2016;60:174-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.07.031>
 27. Schwake-Anduschus C., Langenkämper G., Unbehend G., Dietrich R., Märtlbauer E., Münzing K. Occurrence of *Fusarium* T-2 and HT-2 toxins in oats from cultivar studies in Germany and degradation of the toxins during grain cleaning treatment and food processing. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2010;27(9):1253-1260. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2010.487499>
 28. Lancova K., Hajslova J., Kostelanska M., Kohoutkova J., Nedelnik J., Moravcova H., Vanova M. Fate of trichothecene mycotoxins during the processing milling and baking. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2008;25(5):650-659. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030701660536>
 29. Rios G., Pinson-Gadais L., Abecassis J., Zakhia-Rozis N., Lullien-Pellerin V. Assessment of dehulling efficiency to reduce deoxynivalenol and *Fusarium* level in durum wheat grains. *Journal of Cereal Science*. 2009;49(3):387-392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2009.01.003>
 30. Siwela A. H., Siwela M., Matindi G., Dube S., Nziramasanga N. Decontamination of aflatoxin-contaminated maize by dehulling. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2005;85(15):2535-2538. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2288>

31. House J. D., Nyachoti C. M., Abramson D. Deoxynivalenol removal from barley intended as swine feed through the use of an abrasive pearling procedure. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003;51(17):5172-5175. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf034244p>
32. Cheli F., Battaglia D., Gallo R., Dell'Orto V. EU legislation on cereal safety: an update with a focus on mycotoxins. *Food Control*. 2014;37:315-325. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.09.059>
33. Rios G., Zakhia-Rozis N., Chaurand M., Richard-Forget F., Samson M. F., Abecassis J., Lullien-Pellerin V. Impact of durum wheat milling on deoxynivalenol distribution in the outcoming fractions. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2009;26(4):487-495. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030802382717>
34. Tibola C. S., Fernandes J. M. C., Guarienti E. M., Nicolau M. Distribution of *Fusarium* mycotoxins in wheat milling process. *Food Control*. 2015;53:91-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.01.012>
35. Kabak B. The fate of mycotoxins during thermal food processing. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2009;89(4):549-554. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.3491>
36. Yumbe-Guevara B. E., Imoto T., Yoshizawa T. Effects of heating procedures on deoxynivalenol, nivalenol and zearalenone levels in naturally contaminated barley and wheat. *Food Additives & Contaminants*. 2003;20(12):1132-1140. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030310001620432>
37. Pronyk C., Cenkowski S., Abramson D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels. *Food Control*. 2006;17(10):789-796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2005.05.004>
38. Liu Y., Li M., Bian K., Guan E., Liu Y., Lu Y. Reduction of deoxynivalenol in wheat with superheated steam and its effects on wheat quality. *Toxins*. 2019;11(7):414. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11070414>
39. Castells M., Marín S., Sanchis V., Ramos A. J. Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: a review. *Food Additives & Contaminants*. 2005;22(2):150-157. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030500037969>
40. Bullerman L. B., Bianchini A. Stability of mycotoxins during food processing. *International Journal of Food Microbiology*. 2007;119(1-2):140-146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2007.07.035>
41. Castells M., Marín S., Sanchis V., Ramos A. J. Reduction of aflatoxins by extrusion-cooking of rice meal. *Journal of Food Science*. 2006;71(7):369-377. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2006.00122.x>
42. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science & Technology*. 2007;42(8):916-929. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>
43. Elias-Orozco R., Castellanos-Nava A., Gaytan-Martinez M., Figueroa-Cardenas J. D., Loarca-Pina G. Comparison of nixtamalization and extrusion processes for a reduction in aflatoxin content. *Food Additives & Contaminants*. 2002;19(9):878-885. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030210145054>
44. Cazzaniga D., Basilio J. C., Gonzalez R. J., Torres R. L., de Greef D. M. Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour. *Letters in Applied Microbiology*. 2001;33(2):144-147. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2001.00968.x>
45. Castells M., Pardo E., Ramos A. J., Sanchis V., Marín S. Reduction of ochratoxin A in extruded barley meal. *Journal of Food Protection*. 2006;69(5):1139-1143. DOI: <https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.5.1139>
46. Pleadin J., Kudumija N., Šubarić D., Lolić M., Škrivanko M., Tkalec V. J., Kiš M., Aladić K., Vulić A., Babić J. The effect of thermal processing on the reduction of deoxynivalenol and zearalenone cereal content. *Croatian Journal of Food Science and Technology*. 2019;11(1):44-51. DOI: <https://doi.org/10.17508/cjfst.2019.11.1.06>
47. Schaich K. M. Free radical generation during extrusion: a critical contributor to texturization. *ACS Symposium Series*. 2002;807:35-48. DOI: <https://doi.org/10.1021/bk-2002-0807.ch003>
48. Herzallah S., Alshawabkeh K., Al Fataftah A. Aflatoxin decontamination of artificially contaminated feeds by sunlight, γ -radiation, and microwave heating. *Journal of Applied Poultry Research*. 2008;17(4):515-521. DOI: <https://doi.org/10.3382/japr.2007-00107>
49. Directive 1999/2/EC of The European Parliament and of the Council: on the approximation of the laws of the Member States concerning foods and food ingredients treated with ionising radiation. *Official Journal of the European Communities*. 1999;16-22. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31999L0002>
50. Directive 1999/3/EC of The European Parliament and of the Council: on the establishment of a Community list of foods and food ingredients treated with ionising radiation. *Official Journal of the European Communities*. 1999;16-22. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A31999L0003>
51. Ghanem I., Orfi M., Shamma M. Effect of gamma radiation on the inactivation of aflatoxin B₁ in food and feed crops. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2008;39(4):787-791. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1517-83822008000400035>
52. He J., Zhou T., Young J. C., Boland G. J., Scott P. M. Chemical and biological transformations for detoxification of trichothecene mycotoxins in human and animal food chains: a review. *Trends in Food Science & Technology*. 2010;21(2):67-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.08.002>
53. O'Neill K., Damoglou A. P., Patterson M. F. The stability of deoxynivalenol and 3-acetyl deoxynivalenol to gamma irradiation. *Food Additives & Contaminants*. 1993;10(2):209-215. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652039309374143>
54. Stepanik T., Kost D., Nowicki T., Gaba D. Effects of electron beam irradiation on deoxynivalenol levels in distillers dried grain and solubles and in production intermediates. *Food Additives & Contaminants* 2007;24(9):1001-1006. DOI: <https://doi.org/10.1080/02652030701329629>

55. Calado T., Venancio A., Abrunhosa L. Irradiation for mold and mycotoxin control: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2014;13(5):1049-1061. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12095>
56. Pankaj S. K., Shi H., Keener K. M. A review of novel physical and chemical decontamination technologies for aflatoxin in food. *Trends in Food Science & Technology*. 2018;71:73-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.007>
57. Mehrez A., Maatouk I., Romero-González R., Amara A. B., Kraiem M., Frenich A. G., Landoulsi A. Assessment of ochratoxin A stability following gamma irradiation: experimental approaches for feed detoxification perspectives. *World Mycotoxin Journal*. 2016;9(2):289-298. DOI: <https://doi.org/10.3920/WMJ2013.1652>
58. Calado T., Fernández-Cruz M. L., Verde S. C., Venancio A., Abrunhosa L. Gamma irradiation effects on ochratoxin A: Degradation, cytotoxicity and application in food. *Food chemistry*. 2018;240:463-471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.07.136>
59. Мамедов Х. Ф. Фотолитическая и радиолитическая детоксикация и стерилизация комбикормов, зараженные кишечными палочками и грибами *Aspergillus*. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2011;24(3):138-142. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25383259>
- Mamedov Kh. F. *Fotoliticheskaya i radioliticheskaya detoksikatsiya i sterilizatsiya kombikormov, zarazhennye kishechnymi palochkami i gribkami Aspergillus*. [Photolytic and radio lytic detoxication and sterilization of the mixed fodders, infectedwith escherichia coli and fungi aspergillus]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya* = Scientific Notes of Taurida V. VernadskyNational University. Series: Biology, chemistry. 2011;24(3):138-142. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25383259>
60. Мамедов Х. Ф. Радиолитические процессы во влажных зернах кукурузы, пшеницы и ячменя. Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия. 2013;26(2):226-238. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25005403>
- Mamedov Kh. F. *Radioliticheskie protsessy vo vlazhnykh zernakh kukuruzy, pshenitsy i yachmenya*. [Radiolytic processes in damp corn, wheat and barley grains]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya* = Scientific Notes of Taurida V. VernadskyNational University. Series: Biology, chemistry. 2013;26(2):226-238. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25005403>
61. Pillai S. D., Shayanfar S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry. In: *Applications of Radiation Chemistry in the Fields of Industry, Biotechnology and Environment*. Springer. 2017;375:249-268. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54145-7_9
62. Khaneghah A. M., Moosavi M. H., Oliveira C. A., Vanin F., Sant'Ana A. S. Electron beam irradiation to reduce the mycotoxin and microbial contaminations of cereal-based products: An overview. *Food and Chemical Toxicology*. 2020;143:111557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2020.111557>
63. Luo X., Qi L., Liu Y., Wang R., Yang D., Li K., Wang L., Li Y., Zhang Y., Chen Z. Effects of electron beam irradiation on zearalenone and ochratoxin A in naturally contaminated corn and corn quality parameters. *Toxins*. 2017;9(3):84. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins9030084>
64. Shanakhat H., Sorrentino A., Raiola A., Romano A., Masi P., Cavella S. Current methods for mycotoxins analysis and innovative strategies for their reduction in cereals: an overview. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98(11):4003-4013. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8933>
65. Atalla M. M., Hassanein N. M., El-Beih A. A., Youssef Y. A. Effect of fluorescent and UV light on mycotoxin production under different relative humidities in wheat grains. *ACTA Pharmaceutica Scientia*. 2004;46(3):205-222. URL: <http://www.actapharmsci.com/abstract.php?id=40>
66. Jubeen F., Bhatti I. A., Khan M. Z., Hassan Z. U., Shahid M. Effect of UVC irradiation on aflatoxins in ground nut (*Arachis hypogea*) and tree nuts (*Juglans regia*, *Prunus dulcis* and *Pistachio vera*). *Journal of the Chemical Society of Pakistan*. 2012;34(6):1366-1374. URL: <https://jcsp.org.pk/ArticleUpload/4443-20822-1-CE.pdf>
67. García-Cela E., Marin S., Sanchis V., Crespo-Sempere A., Ramos A. J. Effect of ultraviolet radiation A and B on growth and mycotoxin production by *Aspergillus carbonarius* and *Aspergillus parasiticus* in grape and pistachio media. *Fungal Biology*. 2015;119(1):67-78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2014.11.004>
68. Vearasilp S., Thobunluepop P., Thanapornpoonpong S., Pawelzik E., von Hörsten D. Radio frequency heating on lipid peroxidation, decreasing oxidative stress and aflatoxin B₁ reduction in *Perilla frutescens* L. highland oil seed. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2015;5:177-183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.08.027>
69. Numanoglu E., Gökmen V., Uygun U., Koksel H. Thermal degradation of deoxynivalenol during maize bread baking. *Food Additives & Contaminants: Part A*. 2012;29(3):423-430. DOI: <https://doi.org/10.1080/19440049.2011.644812>
70. Юсупова Г. Г. Влияние СВЧ-энергии на микроскопические грибы и микотоксины. Вестник КрасГАУ. 2003;3:236-238. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41543548>
- Yusupova G. G. *Vliyanie SVCh-energii na mikroskopicheskie griby i mikotoksiny*. [Influence of microwave energy on microscopic fungi and mycotoxins]. *Vestnik KrasGAU* = The Bulletin of KrasGAU. 2003;3:236-238. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41543548>

71. Толмачева Т. А. Афлатоксины, их влияние на продовольственное сырье и методы обеззараживания. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. 2013;1(2):40-44. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20936071>

Tolmacheva T. A. *Aflatoksiny, ikh vliyanie na prodovol'stvennoe syr'e i metody obezzarazhivaniya*. [Aflatoxins and their impact on food raw materials and disinfection methods]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudar-stvennogo universiteta. Seriya: Pishchevyye i biotekhnologii* = Bulletin of South Ural State University, Series «Food and Biotechnology». 2013;1(2):40-44. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20936071>

72. Соболева О. М., Колосова М. М., Филипович Л. А. Электрофизический способ снижения количества микотоксинов в концентрированных кормах. Достижения науки и техники АПК. 2019;33(4):64-66. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10416>

Soboleva O. M., Kolosova M. M., Filipovich L. A. *Elektrofizicheskiy sposob snizheniya kolichestva mikotoksinov v kontsentrirrovannykh kormakh*. [Electrophysical method of reducing the amount of mycotoxins in concentrated feed]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AICis. 2019;33(4):64-66. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10416>

73. Hojnik N., Cvelbar U., Tavčar-Kalcher G., Walsh J. L., Križaj I. Mycotoxin decontamination of food: cold atmospheric pressure plasma versus «classic» decontamination. *Toxins*. 2017;9(5):151. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins9050151>

74. Annor G. A. Cold plasma effects on the nutritional, textural and sensory characteristics of fruits and vegetables, meat, and dairy products. Effect of Emerging Processing Methods on the Food Quality. Springer, Cham. 2019;163-171. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18191-8_7

75. Ten Bosch L., Pfohl K., Avramidis G., Wieneke S., Viöl W., Karlovsky P. Plasma-based degradation of mycotoxins produced by *Fusarium Aspergillus* and *Alternaria* species. *Toxins*. 2017;9(3):97. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins9030097>

76. Ouf S. A., Basher A. H., Mohamed A. A. Inhibitory effect of double atmospheric pressure argon cold plasma on spores and mycotoxin production of *Aspergillus niger* contaminating date palm fruits. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2015;95(15):3204-3210. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.7060>

77. Devi Y., Thirumdas R., Sarangapani C., Deshmukh R. R., Annapure U. S. Influence of cold plasma on fungal growth and aflatoxins production on groundnuts. *Food Control*. 2017;77:187-191. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.019>

78. Wang X., Wang S., Yan Y., Wang W., Zhang L., Zong W. The degradation of *Alternaria* mycotoxins by dielectric barrier discharge cold plasma. *Food Control*. 2020;117:107333. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107333>

Сведения об авторах

Брагинец Сергей Валерьевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Бахчевников Олег Николаевич**, кандидат техн. наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», ул. Ленина 14, г. Зерноград, Ростовская область, Российская Федерация, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

Information about the authors

Sergey V. Braginets, PhD in Engineering, leading researcher, the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7137-5692>

✉ **Oleg N. Bakhchevnikov**, PhD in Engineering, researcher, the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre Donskoy, 14 Lenin St., Zernograd, Rostov Region, Russian Federation, 347740, e-mail: vniizk30@mail.ru, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3362-5627>, e-mail: oleg-b@list.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author