

УДК 614.31: 633.1
DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.08

Читать
онлайн



Научная статья

ДЕЗОКСИНИВАЛЕНОЛ КАК ФАКТОР РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННОГО ЗЕРНА: МОНИТОРИНГ УРОЖАЕВ 1989–2018 ГГ. В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**И.Б. Седова¹, Л.П. Захарова¹, М.Г. Киселева¹, З.А. Чалый¹, А.Н. Тимонин¹,
Т.В. Аристархова¹, Л.В. Кравченко¹, В.А. Тутьельян^{1,2}**

¹Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи, Россия, 109240, г. Москва, Устьинский проезд, 2/14

²Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова, Россия, 119991, г. Москва, ул. Трубецкая, 8, стр. 2

Представлены результаты многолетнего мониторинга загрязнения микотоксином дезоксиниваленолом (ДОН) продовольственного зерна пшеницы, ячменя, кукурузы, овса и ржи. С 1989 по 2018 г. проанализировано 6800 образцов зерна из Центрального, Южного, Приволжского, Уральского, Сибирского, Северо-Кавказского, Дальневосточного, Северо-Западного федеральных округов РФ. В зависимости от года урожая частота обнаружения ДОН в пробах продовольственного зерна пшеницы варьировалась от нуля до 42 %, максимальное содержание токсина достигало 6,65 мг/кг. За весь изученный период была выявлена контаминация 10 % проб, четверть из них – на уровне выше максимально допустимого. В годы массовых эпифитотий (1989, 1992 и 1993 гг.) и в урожаях 2014 и 2017 гг. частота обнаружения ДОН составляла 24–42 %; при этом превышение максимальных допустимых уровней ДОН было зафиксировано в 9–27 % исследованных проб. 78 % загрязненных проб были получены из Южного и Северо-Кавказского и 10 % – из Дальневосточного федеральных округов. На примере проб пшеницы, поступивших из Краснодарского края, установлена достоверная взаимосвязь между частотой обнаружения токсина и количеством дождливых и солнечных дней в мае. Анализ динамики контаминации показал, что в последние несколько лет наблюдается тенденция к росту частоты обнаружения ДОН в зерне пшеницы не только из регионов распространения фузариоза, но и в Северо-Западном, Сибирском и Приволжском федеральных округах. Оценка риска здоровью, связанного с поступлением ДОН с продуктами переработки зерна пшеницы, показала, что для населения Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в 1992, 1993, 2014 и 2017 гг. была превышена величина условного переносимого суточного поступления.

Средняя частота обнаружения ДОН в пробах ячменя, кукурузы, ржи и овса составила 4,2; 11,9; 3,0 и 0,6 %, а его максимальное содержание – 8,95; 0,95; 0,96 и 0,44 мг/кг соответственно. Так же, как и для пшеницы, основная часть контаминированных проб поступила из Южного, Северо-Кавказского и Дальневосточного федеральных округов. Для всех исследованных зерновых отмечена тенденция к нарастанию загрязненности, что обуславливает необходимость принятия мер по контролю безопасности продовольственного зерна.

Ключевые слова: мониторинг, микотоксины, продовольственное зерно, пшеница, ячмень, овес, кукуруза, рожь, фузариоз колоса, распространенность, дезоксиниваленол, оценка риска здоровью, погода, корреляционный анализ.

© Седова И.Б., Захарова Л.П., Киселева М.Г., Чалый З.А., Тимонин А.Н., Аристархова Т.В., Кравченко Л.В., Тутьельян В.А., 2021

Седова Ирина Борисовна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории энзимологии питания (e-mail: isedova@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6011-4515>).

Захарова Людмила Павловна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории энзимологии питания (e-mail: zaharova@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7355-5259>).

Киселева Мария Геннадьевна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории энзимологии питания (e-mail: kiseleva_mg@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1057-0886>).

Чалый Захар Андреевич – младший научный сотрудник лаборатории энзимологии питания (e-mail: brew@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9371-8163>).

Тимонин Андрей Николаевич – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории иммунологии (e-mail: andrey8407@mail.ru; тел.: 8 (495) 698-53-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6087-6918>).

Аристархова Татьяна Владимировна – научный сотрудник лаборатории метаболомного и протеомного анализа (e-mail: aristarhova_tv@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-92; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-8626>).

Кравченко Лидия Васильевна – кандидат медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории энзимологии питания (e-mail: kravchenko@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9316-4527>).

Тутьельян Виктор Александрович – академик РАН, профессор, доктор медицинских наук, заведующий лабораторией энзимологии питания, научный руководитель (e-mail: tutelyan@ion.ru; тел.: 8 (495) 698-53-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4164-8992>).

Зерновые и продукты их переработки традиционно являются основой рациона большинства россиян, поэтому качество и безопасность зерна – важнейший элемент продовольственной безопасности РФ. Фитопатогены, в том числе и токсигенные микромицеты, повсеместно являются неотъемлемой частью агробиоценозов. Несоблюдение севооборотов, нарушение технологии возделывания зерновых культур, некачественный посевной материал в совокупности с неблагоприятными погодными условиями способствуют развитию «полевых» грибов, среди которых одни из наиболее распространенных – микромицеты родов *Fusarium*. Токсичные вторичные метаболиты микроскопических грибов – микотоксины – представляют опасность для здоровья человека. Наибольший риск для здоровья человека связан с хроническим поступлением с пищевыми продуктами малых количеств микотоксинов [1–3].

Дезоксиниваленол (ДОН) является наиболее широко распространенным в мире фузариотоксином. Выделенный в 1972 г. в Японии и США, в последующие годы он был подтвержден как постоянный контаминант зерновых злаковых культур в большинстве регионов мира. Чаще всего ДОН обнаруживают в пшенице, реже – в кукурузе, ячмене, ржи и овсе, а также продуктах переработки зерна [4–12]. Его основными продуцентами являются микроскопические грибы видов *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. nivale*, вызывающие фузариоз зерна и колоса [3, 6, 10, 11, 13]. Накопление токсина зависит от токсигенных свойств штамма гриба-продуцента, климатических и погодных условий, техники выращивания и защиты растений, условий хранения [14–16]. Высокая влажность воздуха во время и после периода цветения способствует фузариозу колоса. Содержание ДОН в пораженном зерне нарастает с момента цветения до молочно-восковой спелости и затем резко снижается в период восковой и полной спелости [15, 17]. Умеренный климат, характерный для Северной Америки, Китая и Европы, является оптимальным для распространения фузариоза колоса в пшенице [2, 6, 11, 16, 18]. В РФ наиболее подвержено этому заболеванию зерно, выращиваемое в Северо-Кавказском, Южном и Дальневосточном федеральных округах (ФО) [2, 13, 15, 19].

В экспериментальных моделях на животных острое отравление ДОН вызывает рвоту (отсюда другое название ДОН – vomitоксин). Установлено, что ДОН является причиной алиментарных токсикозов не только сельскохозяйственных животных [11, 16, 20], но и человека [2, 20]. Исследования

показали, что на молекулярном уровне он связывается с рибосомой и ингибирует синтез белка и, таким образом, нарушает нормальную функцию клеток [2]. В низких дозах ДОН подавляет иммунитет. Однако воздействие летальной дозы токсина может привести к лейкоцитозу, кровотечению, диарее и эндотоксикозу [21]. На основании токсикологических исследований Комитет экспертов ФАО/ВОЗ по пищевым добавкам (JECFA) установил для ДОН и его ацетильных производных (3-ацетилДОН и 15-ацетилДОН) величины условного переносимого суточного поступления и острую референтную дозу для человека на уровне 1 и 8 мкг/кг массы тела в сутки (м.т./сут) соответственно [20]. Широкая распространенность токсина и беспорядочные доказательства реальной опасности для здоровья человека явились причиной введения гигиенических регламентов его содержания в продовольственном сырье в ряде стран. Комиссией Codex Alimentarius установлены международные регламенты содержания ДОН в необработанных пшенице, ячмене и кукурузе на уровне 2000 мкг/кг [22]. В странах Европейского союза максимальные допустимые уровни (МДУ) ДОН регламентируются согласно [23]: в необработанном зерне твердой пшеницы, овса и кукурузы на уровне 1750 мкг/кг, других необработанных видах зерна – 1250 мкг/кг, для зерновых и пищевых продуктов, предназначенных для потребителей, – 750 мкг/кг. В РФ действуют регламенты Таможенного союза (ТР ТС) № 021/2011 «О безопасности пищевой продукции»¹, 015/2011 «О безопасности зерна»², в соответствии с которыми МДУ ДОН в продовольственном зерне пшеницы и ячменя, а также продуктах их переработки составляют 0,7 и 1,0 мг/кг соответственно.

Для изучения загрязненности продовольственного зерна микотоксинами осуществляется многолетний микотоксикологический мониторинг безопасности зерна из ареалов распространения фузариоза, а также из других зернопроизводящих регионов. Настоящая работа посвящена анализу результатов долгосрочного 30-летнего мониторинга загрязнения ДОН продовольственного зерна пшеницы, ячменя, кукурузы, ржи и овса урожаев 1989–2018 гг. с целью выявления основных видов риска и обоснования мероприятий по его снижению.

Материалы и методы. Пробы продовольственного зерна (всего 6800 проб) были предоставлены для исследования Управлениями Роспотребнадзора из следующих ФО РФ: Центрального, Южного, Приволжского, Уральского, Сибирского, Северо-

¹ ТР ТС 021/2011. О безопасности пищевой продукции: технический регламент Таможенного союза [Электронный ресурс] // Евразийская экономическая комиссия. – URL: <http://www.eurasiancommission.org/ru/act/tehnreg/deptexreg/tr/Pages/PischevayaProd.aspx> (дата обращения: 12.03.2021).

² ТР ТС 015/2011. О безопасности зерна: технический регламент Таможенного союза [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320395> (дата обращения: 12.03.2021).

Кавказского, Дальневосточного, Северо-Западного³. Всего за период с 1989 по 2018 г. было исследовано 4009 проб зерна пшеницы, 1293 – ячменя, 1020 – ржи, 278 – кукурузы и 200 – овса.

Пробы зерна были отобраны от однородных партий, хранящихся на хлебоприемных и перерабатывающих предприятиях по ГОСТ Р ИСО 24333-2011⁴, содержание ДОН в пробах определяли методами иммуноферментного анализа (ИФА) (2009–2012 гг.), высокоэффективной жидкостной хроматографии со спектрофотометрическим (ВЭЖХ-УФ)⁵ (1989–2018 гг.) и хромато-масс-спектрометрическим детектированием (ВЭЖХ-МС/МС)⁶ (2018 г.).

С использованием программы IBM SPSS Statistics 23 (Statistical package for social sciences, США) и Microsoft Office Excel 2007 (Microsoft Corp., США) была выполнена статистическая обработка данных. Данные по содержанию ДОН в контаминированных пробах представляли в виде среднего арифметического (M) и медианы (Me) и 90-го перцентиля (90 %) (уровни загрязнения ниже минимальной определяемой концентрации методов (0,05 мг/кг) были приняты за «0»). Проведен двухфакторный дисперсионный и корреляционный анализы взаимосвязи частоты загрязнения ДОН пшеницы урожая 2006–2018 гг., выращенной в Краснодарском крае, принимая во внимание влажность и температуру окружающей среды, продолжительность солнечного стояния и количество выпавших осадков в период с мая по август. Был применен анализ данных в рамках латинского квадрата 3×3, где в качестве строк были использованы номера проб, в качестве столбцов – год урожая, в ячейках в качестве букв латинского алфавита – величина зависимой переменной известного класса пшеницы, а в качестве зависимой переменной была использована частота обнаружения ДОН (уровень значимости 0,1). Дополнительно для установления влияния уровня интенсивности показателя на зависимую переменную при анализе загрязненности был использован непараметрический анализ Манна – Уитни после класс-интервального группирования признака на два класс-интервала: низкий уровень и высокий уровень – 1 и 2 соответственно. После использования методов дисперсионного анализа, в случае отклонения нуль-гипотезы и уровней на фиксируемом фак-

торе более двух, применяли методы множественного сравнения средних с использованием метода Тьюки. Уровень значимости 0,05.

Оценку риска здоровью, обусловленного загрязненностью ДОН продовольственного зерна пшеницы, проводили на основании сравнения величины суммарного суточного поступления ДОН с продуктами на основе пшеницы с величиной его условного переносимого суточного поступления. Расчетное суточное поступление ДОН с продуктами на основе пшеницы рассчитывали по формуле (1):

$$N_{\text{расч}} = \frac{M \cdot P \cdot 1000}{w}, \quad (1)$$

где $N_{\text{расч}}$ – расчетное суточное поступление ДОН (мкг/кг м.т.); M – среднее содержание ДОН в зерне пшеницы (мг/кг); P – потребление продуктов переработки пшеницы (кг/сут); w – масса тела (кг); средняя масса тела человека принята за 60 кг; 1000 – переводной коэффициент в мкг.

Результаты и их обсуждение. Загрязненность продовольственного зерна пшеницы урожаев 1989–2018 гг. в целом по РФ. Частота обнаружения и средние уровни контаминации ДОН продовольственного зерна пшеницы варьировались от нуля до 42 % и от 0 до 0,43 мг/кг соответственно в зависимости от года урожая (табл. 1). В целом 10,0 % из 4009 партий зерна урожая с 1989 по 2018 гг. были контаминированы; их диапазон загрязнения варьировался от 0,05 до 6,65 мг/кг (см. табл. 1). В 101 (2,5 %) пробе пшеницы содержание ДОН превышало МДУ.

26 % проб урожая 1989 г. содержали ДОН, в том числе 9 % в количествах, превышающих МДУ. В 1992 г. частота обнаружения токсина была максимальной за весь период исследований и составила 42 %, в том числе 27 % содержали ДОН выше МДУ. Частота обнаружения ДОН в продовольственном зерне пшеницы урожая 1993 г. была также высокой и составила 24 % от общего числа исследованных проб; количество проб, превышающих МДУ, достигло 15 %. Содержание ДОН в контаминированных образцах варьировалось в 1989 г. от 0,05 до 6,65 мг/кг, в 1992 г. – от 0,05 до 5,63 мг/кг и в 1993 г. – от 0,1 до 3,95 мг/кг.

³ Авторы выражают признательность работникам Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, ее региональных Центров гигиены и эпидемиологии за многолетнее сотрудничество, отбор и предоставление проб зерна для исследований ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии».

⁴ ГОСТ Р ИСО 24333-2011. Зерно и продукты его переработки. Отбор проб [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092274> (дата обращения: 11.03.2021).

⁵ МУ 5177-90. Методические указания по обнаружению, идентификации и определению содержания дезоксиниваленола (вомитоксина) и зearаленона в зерне и зернопродуктах [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gostrf.com/potmadata/1/4293828/4293828870.pdf> (дата обращения: 13.03.2021).

⁶ МВИ 410/4-2020. Метод мультidetекции микотоксинов в зерне и первичных продуктах его переработки. – М., 2020.

Таблица 1

Частота и уровни загрязнения ДОН продовольственного зерна пшеницы урожаев 1989–2018 гг.

Год	Количество проб			Содержание ДОН в контаминированных пробах, мг/кг	Содержание ДОН в пробах всего ряда, мг/кг		
	всего, шт.	содержащих ДОН	содержащих ДОН выше МДУ		M	Me	90 %
		штук (% от общего количества)					
1989	57	15 (26)	5 (9)	0,05 – 6,65	0,23	0	0,44
1990/91	67	4 (6)	1 (1)	0,05 – 0,74	0,02	0	0
1992	139	59 (42)	37 (27)	0,05 – 5,63	0,43	0	1,06
1993	156	38 (24)	24 (15)	0,10 – 3,95	0,20	0	0,63
1994	254	16 (6)	6 (2)	0,17 – 0,96	0,03	0	0
1995	169	11 (6)	0 (0)	0,07 – 0,70	0,03	0	0
1996	120	15 (13)	0 (0)	0,06 – 0,70	0,02	0	0,07
1997	137	15 (11)	1 (0,7)	0,05 – 1,14	0,02	0	0,05
1998	126	12 (10)	1 (0,8)	0,05 – 1,09	0,03	0	0,03
1999	132	0 (0)	0 (0)	<0,05	0	0	0
2000	222	6 (3)	1 (0,5)	0,09 – 0,77	0,01	0	0
2001	252	12 (5)	0 (0)	0,05 – 0,62	0,01	0	0
2002	158	6 (4)	1 (0,6)	0,05 – 0,78	0,01	0	0
2003	375	5 (1)	0 (0)	0,05 – 0,07	0	0	0
2004	213	2 (1)	0 (0)	0,07; 0,08	0	0	0
2005	147	12 (8)	0 (0)	0,07 – 0,69	0,02	0	0
2006	85	11 (13)	0 (0)	0,05 – 0,34	0,02	0	0,06
2007	98	9 (9)	1 (1)	0,06 – 0,91	0,05	0	0
2008	73	4 (5)	1 (1,4)	0,06 – 1,03	0,02	0	0
2009	109	8 (7)	0 (0)	0,06 – 0,12	0,01	0	0
2010	122	10 (8)	2 (2)	0,06 – 1,26	0,03	0	0
2011	158	13 (8)	0	0,05 – 0,44	0,01	0	0
2012	34	0 (0)	0	<0,05	0	0	0
2013	111	9 (8)	0	0,05 – 0,52	0,01	0	0
2014	57	21 (37)	6 (10)	0,07 – 5,85	0,29	0	0,66
2015	64	6 (9)	0	0,05 – 0,33	0,01	0	0
2016	154	29 (19)	2 (1,3)	0,05 – 1,43	0,05	0	0,54
2017	105	32 (31)	9 (9)	0,05 – 2,46	0,18	0	0,51
2018	115	18 (16)	3 (2,6)	0,10 – 1,27	0,06	0	0,20
ВСЕГО	4009	399 (10,0)	101 (2,5)	0,05 – 6,65	0,05	0	0,05

Примечание: МДУ ДОН, мг/кг, не более: 0,7 – пшеница (ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна»).

На протяжении последующих 20 лет, с 1994 по 2013 г., частота обнаружения ДОН в образцах пшеницы урожаев была относительно низкой и варьировалась от 0 до 9 %. Превышение МДУ было зафиксировано в единичных случаях, максимальное содержание ДОН в контаминированных пробах составило 1,26 мг/кг. На диаграмме распределения урожаев по средним уровням содержания ДОН максимум приходится на величины 0,01–0,03 мг/кг.

Начиная с 2014 г. частота загрязнения продовольственного зерна пшеницы возрастает до 9–37 %. Увеличивается число проб с содержанием ДОН выше МДУ. Исключением является урожай 2015 г., в пробах которого не обнаружено ДОН в количествах выше МДУ.

Таким образом, наименее загрязненными ДОН оказались урожаи пшеницы 1999, 2003, 2004, 2012 гг.: контаминировано не более 1 % образцов, уровни загрязнения низкие. В урожаях зерна 1990–1991, 1994–1998, 2000–2002, 2005–2011, 2013 и 2015 гг. частота загрязнения ДОН варьировалась от 3 до 13 %, среднее содержание ДОН – от 0 до 0,05 мг/кг,

90-й перцентиль – от 0 до 0,07 мг/кг. В единичных пробах урожаев 1990–1991, 1997, 1998, 2000, 2002, 2007, 2008 и 2010 гг. были выявлены уровни загрязнения токсином, превышающие МДУ. Всплеск загрязненности ДОН был отмечен не только в годы массовых эпифитотий (1989, 1992 и 1993 гг.), но и в урожаях последних лет – 2014, 2016, 2017 и 2018 гг. В эти годы частота загрязнения ДОН варьировалась от 16 до 37 %, среднее содержание – от 0,06 до 0,29 мг/кг, 90-й перцентиль – от 0,20 до 0,66 мг/кг. Пробы зерна, содержащие ДОН выше МДУ, встречались чаще всего в пшенице урожаев 1989, 1992, 1993, 2014 и 2017 гг. (9–27 % всех исследованных проб).

Загрязненность продовольственного зерна пшеницы урожаев 1999–2018 гг. по регионам. Содержание ДОН в продовольственном зерне пшеницы варьировалось в зависимости от района его производства (рис. 1). Анализ распределения контаминированного зерна пшеницы урожаев 1999–2018 гг. показал, что 78 % образцов (159 из 205 положительных проб) приходилось на пшеницу из Южного ФО (республики Адыгея, Калмыкия, Крым, Астраханская,



Рис. 1. Распределение загрязненного ДОН продовольственного зерна пшеницы урожаев 1999–2018 гг. по регионам производства (в % от общего количества контаминированных проб)

Волгоградская и Ростовская области) и Северо-Кавказского ФО (республики Ингушетия, Северная Осетия-Алания, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская, Чеченская и Ставропольский край), которые являются основными ареалами фузариоза зерновых культур в России. Уровень содержания ДОН в этих пробах варьировался от 0,05 до 5,85 мг/кг. 10 % контаминированных проб происходили из Дальневосточного ФО, 5 % – из Центрального ФО. Частота загрязнения ДОН пшеницы из Сибирского, Приволжского, Северо-Западного и Уральского ФО была значительно ниже и составила 1–2 %.

По данным Росстата за 2018 г. самый большой вклад в валовый сбор зерна пшеницы приходился на Ростовскую область – 12,9 %, Краснодарский край – 12,4 % и Ставропольский край – 9,9 %; на Алтайский край и Волгоградскую область – 4,2 %, на Воронежскую, Курскую и Омскую области – от 3,1 до 3,8 %, на Республику Татарстан, Липецкую, Новосибирскую, Тамбовскую и Орловскую области – от 2 до 2,7 %, на Оренбургскую, Пензенскую, Курганскую, Тульскую, Челябинскую, Самарскую области и Красноярский край – от 1,5 до 1,8 %⁷. Как было показано выше, зерно, произведенное лидерами по производству пшеницы, – в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях – по сравнению с другими производящими пшеницу регионами, характеризуется более высокой загрязненностью ДОН. Произведенная пшеница идет на переработку и потребляется не только населением Южного и Северо-Кавказского ФО, но и в других ФО, следовательно, поступление токсина при потреблении загрязненных ДОН продуктов переработки пшеницы может вносить значительный вклад в долю поступления ДОН с продуктами переработки пшеницы для населения в целом.

Анализ динамики загрязненности зерна ДОН проведен на примере ряда зернопроизводящих регионов РФ (табл. 2).

В период с 1999 по 2018 г. образцы зерна пшеницы, выращенной в **Южном ФО**, поступали, главным образом, из Краснодарского края, Ростовской и Волгоградской областей, республик Адыгея и Кал-

мыкия. Загрязненность ДОН проб зерна в этих областях значительно отличалась в зависимости от района выращивания зерна. Например, в зерне, поступившем из Республики Калмыкия и Волгоградской области, ДОН практически не выявляли или уровни его загрязнения были очень низкими. Напротив, в зерне из Краснодарского края и Республики Адыгея частота выявления токсина была наибольшей. Ростовская область занимала промежуточное положение в пределах Южного ФО (см. табл. 2).

Было проанализировано 262 пробы из Краснодарского края, в зерне 10 из 17 урожаев пшеницы разных лет были обнаружены контаминированные ДОН пробы, при этом частота обнаружения варьировалась от 0 до 79 % в зависимости от года урожая. В отдельные годы количество проб, загрязненных токсином на уровне выше МДУ, изменялось от 5,9 % (2016 г.) до 42,9 % (2017 г.), а максимальные уровни загрязнения достигали 3,21 и 5,85 мг/кг.

При анализе 65 проб пшеницы в 8 из 13 урожаев разных лет из Республики Адыгея был выявлен ДОН в количестве от 0,08 до 0,78 мг/кг.

Пробы пшеницы (271) из Ростовской области предоставлялись на исследования практически ежегодно. ДОН был обнаружен в зерне 9 из 17 урожаев разных лет в количестве от 0,05 до 0,77 мг/кг, причем частота обнаружения токсина была ниже, чем в Краснодарском крае и Республике Адыгея. Только в одной из 271 исследованных проб в пшенице урожая 2000 г. содержание ДОН превысило МДУ.

Пробы зерна урожаев 1999–2018 гг., выращенного в **Северо-Кавказском ФО**, поступали на исследование, главным образом, из Ставропольского края, реже из республик Кабардино-Балкария, Дагестан и Северная Осетия-Алания (урожаев девяти лет). Всего за исследованный период из этого региона поступило 333 пробы пшеницы, включая 215 – из Ставропольского края, 56 – из республик Кабардино-Балкарии и Северной Осетии-Алании (см. табл. 2). В зерне урожаев 1999–2018 гг. частота обнаружения ДОН в контаминированных пробах из Ставропольского края варьировалась от 6 % (2009 г.) до 60 % (2017 г.), а максимальные уровни загрязнения в отдельных пробах урожаев 2014, 2017 и 2018 гг. достигали соответственно 1,56; 0,97 и 0,73 мг/кг.

Продолжающийся в течение девяти лет мониторинг загрязнения зерна пшеницы из республик Кабардино-Балкария и Северная Осетия-Алания выявил загрязненность токсином в 7 из 9 исследованных урожаев зерна (см. табл. 2). Превышение МДУ ДОН обнаружено в зерне урожаев 2007, 2010 и 2014 гг., и уровни загрязнения достигали 0,91, 0,71 и 0,83 мг/кг соответственно.

Содержание ДОН было изучено в 56 пробах пшеницы урожаев 14 разных лет из **Дальневосточного ФО**. Токсин был обнаружен в пшенице 9 из 14 урожаев зерна из Приморского края; с превышением МДУ в отдельных пробах зерна урожаев 2008, 2010, 2016 и 2017 гг. (см. табл. 2). В 4 из 7 урожаев разных лет зерна

⁷ Сельское хозяйство в России. 2019: статистический сборник // Росстат. – М., 2019. – 91 с.

Таблица 2

Динамика загрязненности ДОН проб продовольственного зерна пшеницы урожаев 1999–2018 гг. из различных ФО РФ

Регион	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Южный Федеральный округ, 694 пробы																				
Краснодарский край, <i>n</i> ** = 262	3/0/0* (0)	4/0/0 (0)	10/2/0 (20)	1/0/0 (0)	5/0/0 (0)	3/0/0 (0)	1/0/0 (0)	15/7/0 (47)	15/2/0 (13)	–	–	77/7/0 (9)	8/0/0 (0)	–	51/2/0 (4)	14/8/2 (57)	9/2/0 (22)	17/11/1 (65)	14/11/6 (79)	15/8/2 (53)
Республика Адыгея, <i>n</i> = 65	–	12/2/0 (17)	8/1/0 (13)	5/2/1 (40)	14/1/0 (7)	–	–	–	–	1/0/0 (0)	–	–	5/2/0 (40)	–	1/0/0 (0)	1/1/0 (100)	1/1/0 (100)	1/0/0 (0)	1/0/0 (0)	1/1/0 (100)
Ростовская область, <i>n</i> = 271	25/0/0 (0)	8/2/1 (25)	21/8/0 (38)	8/2/0 (25)	11/0/0 (0)	14/1/0 (7)	25/5/0 (20)	12/1/0 (8)	7/0/0 (0)	5/0/0 (0)	34/1/0 (3)	4/0/0 (0)	–	–	25/0/0 (0)	8/0/0 (0)	28/2/0 (7)	21/6/0 (29)	7/0/0 (0)	8/0/0 (0)
Северо-Кавказский Федеральный округ, 333 пробы																				
Ставропольский край, <i>n</i> = 215	3/0/0 (0)	4/1/0 (0)	5/0/0 (0)	2/1/0 (0)	6/0/0 (0)	6/0/0 (0)	4/2/0 (50)	2/1/0 (50)	8/0/0 (0)	1/0/0 (0)	16/1/0 (6)	9/1/0 (11)	17/2/0 (12)	24/0/0 (0)	19/0/0 (0)	17/7/3 (41)	20/0/0 (0)	19/3/0 (0)	15/9/1 (60)	18/2/1 (11)
Кабардино-Балкария, Северная Осетия, <i>n</i> = 56	–	–	–	–	–	–	–	–	1/1/1 (100)	–	10/4/0 (40)	–	16/6/0 (38)	–	5/2/0 (40)	5/4/1 (80)	4/1/0 (25)	1/0/0 (0)	2/1/0 (50)	3/0/0 (0)
Дагестан, Чечня, <i>n</i> = 44	–	2/0/0 (0)	–	–	–	–	11/2/0 (18)	–	24/2/0 (8)	2/0/0 (0)	–	–	2/0/0 (0)	–	–	5/0/0 (0)	–	–	–	–
Дальневосточный Федеральный округ, 56 проб																				
Амурская область, <i>n</i> = 12	–	1/0/0 (0)	–	–	–	–	–	–	–	1/0/0 (0)	–	–	–	–	–	1/1/0 (100)	1/0/0 (0)	2/2/1 (100)	3/3/1 (100)	3/2/0 (67)
Приморский край, <i>n</i> = 27	–	1/0/0 (0)	–	1/0/0 (0)	–	–	4/3/0 (75)	1/1/0 (100)	1/1/0 (100)	3/3/1 (100)	6/2/0 (33)	1/1/1 (100)	–	–	–	–	–	–	2/1/1 (50)	–
Центральный Федеральный округ, 693 пробы																				
Орловская область, <i>n</i> = 150	1/0/0 (0)	10/0/0 (0)	–	53/0/0 (0)	22/0/0 (0)	–	3/0/0 (0)	–	–	–	–	1/0/0 (0)	20/1/0 (5)	–	–	–	–	6/1/0 (17)	5/2/0 (40)	3/0/0 (0)
Воронежская область, <i>n</i> = 109	7/0/0 (0)	10/0/0 (0)	–	7/0/0 (0)	11/0/0 (0)	14/0/0 (0)	15/0/0 (0)	5/0/0 (0)	19/3/0 (16)	–	–	1/0/0 (0)	–	–	–	–	–	–	3/0/0 (0)	3/0/0 (0)
Остальные области, <i>n</i> = 434	42/0/0 (0)	55/0/0 (0)	1/0/0 (0)	15/0/0 (0)	76/0/0 (0)	47/0/0 (0)	27/0/0 (0)	18/0/0 (0)	31/0/0 (0)	28/1/0 (4)	13/0/0 (0)	1/0/0 (0)	17/1/0 (6)	–	1/0/0 (0)	–	–	17/1/0 (5)	19/0/0 (0)	17/0/0 (0)
Приволжский ФО, 331 проба	1/0/0 (0)	29/0/0 (0)	4/0/0 (0)	69/0/0 (0)	23/0/0 (0)	65/0/0 (0)	5/0/0 (0)	5/0/0 (0)	10/0/0 (0)	13/0/0 (0)	5/0/0 (0)	3/0/0 (0)	42/0/0 (0)	10/0/0 (0)	–	–	–	18/0/0 (0)	10/2/0 (20)	19/2/0 (11)
Сибирский ФО, 266 проб	2/0/0 (0)	48/0/0 (0)	55/0/0 (0)	19/0/0 (0)	33/0/0 (0)	25/0/0 (0)	9/0/0 (0)	–	4/0/0 (0)	3/0/0 (0)	8/0/0 (0)	10/0/0 (0)	19/1/0 (5)	–	–	3/0/0 (0)	–	5/0/0 (0)	12/1/0 (8)	11/2/0 (18)
Уральский ФО, 69 проб	–	5/0/0 (0)	–	12/0/0 (0)	5/0/0 (0)	10/0/0 (0)	–	–	–	–	–	–	5/0/0 (0)	–	–	–	–	21/2/0 (10)	3/0/0 (0)	8/0/0 (0)
Северо-Западный ФО, 35 проб	–	16/0/0 (0)	–	1/0/0 (0)	1/0/0 (0)	7/0/0 (0)	–	–	–	–	1/0/0 (0)	–	1/0/0 (0)	–	–	–	–	5/3/0 (60)	3/2/0 (67)	–

Примечание: * – количество изученных проб, шт./проб, загрязненных ДОН, шт./проб, загрязненных ДОН с превышением МДУ, шт. (частота обнаружения, %). ** *n* – количество проб, поступивших из данного региона за период мониторинга с 1999 по 2018 г.

из Амурской области был выявлен ДОН с превышением МДУ токсина в зерне урожаев 2016 и 2017 гг.

В продовольственном зерне пшеницы из **Центрального ФО** ДОН обнаруживали редко. В 1,4 % из 693 изученных проб зерна урожаев 20 разных лет был выявлен токсин в небольших количествах – от 0,05 до 0,16 мг/кг.

Низкая (1,2 %) частота обнаружения ДОН была зафиксирована в пробах пшеницы из **Приволжского ФО**. В отдельных пробах зерна из 331 исследованной был обнаружен токсин в количестве от 0,09 до 0,37 мг/кг. Обращает на себя внимание, что загрязненными ДОН оказались пробы зерна урожаев 2017 и 2018 гг.

Низкие (от 0,18 до 0,25 мг/кг) уровни загрязнения ДОН были обнаружены в единичных пробах зерна пшеницы урожаев 2011, 2017 и 2018 гг. из **Сибирского ФО**.

Загрязненность ДОН проб пшеницы из **Уральского** и **Северо-Западного ФО** была изучена на небольшом количестве проб – 69 и 35 из зерна урожаев восьми разных лет. Частота обнаружения токсина составила 3 и 14 % соответственно. Загрязненными оказались только партии урожаев 2016–2017 гг.

Следует отметить, что порядка 2/3 проб из Северо-Западного ФО, а именно из Калининградской области, были контаминированы ДОН на уровне от 0,14 до 0,46 мг/кг. Высокая частота обнаружения ДОН в пшенице из Калининградской области согласуется с данными из соседних регионов. Так, в пшенице польского происхождения урожая 2016 г. в 83 % из 92 исследованных проб обнаружили ДОН в количестве от 0,01 до 1,27 мг/кг [24].

Таким образом, анализ динамики контаминации продовольственного зерна пшеницы урожаев 1999–2018 гг. из различных регионов РФ показал, что в последние несколько лет наблюдается тенденция к росту частоты обнаружения ДОН в зерне пшеницы не только в Северо-Кавказском, Южном и Дальневосточном ФО, в которых на протяжении всего периода мониторинговых исследований наблюдалась наибольшая загрязненность, но и в Северо-Западном, Сибирском и Приволжском ФО.

Анализ факторов окружающей среды, влияющих на загрязнение зерна ДОН. Известно, что на накопление ДОН токсигенными грибами рода *Fusarium* влияют климатические и погодные условия [14, 15]. На примере проб пшеницы урожаев

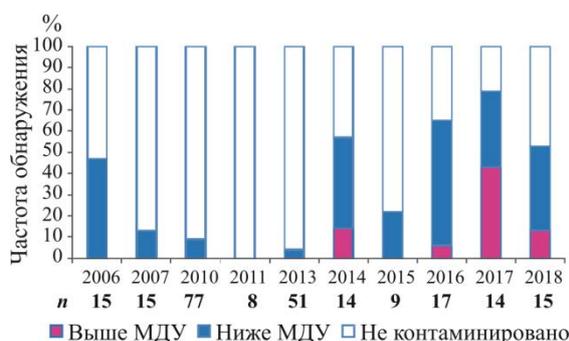


Рис. 2. Динамика загрязненности ДОН пшеницы урожаев 2006–2018 гг., выращенной в Краснодарском крае (n – число проб)

2006–2018 гг., полученных из Краснодарского края, была оценена связь загрязненности пшеницы ДОН (рис. 2) и следующих факторов: среднемесячной влажности и температуры воздуха, количества солнечных часов (продолжительность солнечного сияния – время в течение месяца, когда солнце в данной местности находится над горизонтом и не скрыто облаками) и количества дней с уровнем осадков более 1 мм в период с мая по август. Метеорологические данные предоставлены онлайн-архивом климатических исследований «Аисори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам»⁸.

Методом корреляционного анализа была подтверждена достоверно значимая взаимосвязь между частотой обнаружения токсина и средним содержанием его в загрязненных пробах пшеницы урожая 2006–2018 гг.: коэффициент корреляции $r = 0,68$, достоверность $p = 0,02$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Принимая во внимание, что коэффициент вариации для частоты обнаружения ДОН был значительно ниже, именно этот показатель использовали в дальнейшем статистическом анализе в качестве ведущего. Никакой взаимосвязи между частотой обнаружения ДОН и исследованными погодными факторами в период с июня по август установлено не было. В то же время погодные условия в мае, а именно продолжительность солнечного времени и количество дней с уровнем осадков свыше 1 мм при уровне значимости 0,05, достоверно оказывали наи-

более значимое влияние на загрязненность ДОН (табл. 3). Полученные данные хорошо согласуются с тем фактом, что зерно пшеницы наиболее восприимчиво к грибной инфекции в период молочной спелости, который приходится в Краснодарском крае на середину мая – середину июня. Солнечная ясная погода и снижение количества дождливых дней в мае способствуют снижению загрязненности пшеницы ДОН и наоборот.

Полученная взаимосвязь была подтверждена использованием непараметрического анализа Манна – Уитни. Для его применения показатель в рамках месяца разбивался на два класс-интервала: нижний и верхний, а величины частоты обнаружения ДОН записывались в соответствующий класс-интервал. Анализ показал, что для среднемесячных показателей влажности и температуры в мае достоверность выше уровня значимости ($p > 0,05$), и, следовательно, их влияние на уровень загрязненности незначительно. Для показателей продолжительности солнечного времени и количества дождливых дней с уровнем осадков более 1 мм в мае величина значимости $p < 0,05$, что свидетельствует о достоверной связи между этими показателями и загрязненностью зерна.

В период с 2006 по 2018 г. наблюдался рост загрязненности пшеницы. В ходе корреляционного анализа установлена прямо пропорциональная связь между годом урожая и показателем частоты загрязнения: коэффициент корреляции $r = 0,60$, достоверность $p = 0,049$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Несмотря на то что эту связь невозможно использовать в прогностических целях вследствие того, что $\alpha \approx p$, игнорировать ее существование нельзя.

Был проведен двухфакторный дисперсионный анализ класса зерна, года урожая и содержания ДОН в пробе (табл. 4). В качестве фиксированного фактора А был использован год урожая, фиксированного фактора В – класс.

Анализ загрязненности продовольственного зерна ячменя, овса, ржи и кукурузы урожая 1989–2018 гг. Совокупные данные о загрязненности ДОН продовольственного зерна ячменя, овса, ржи и кукурузы урожаев 1989–2018 гг. суммированы в табл. 5.

Таблица 3

Характеристики корреляционных зависимостей между частотой обнаружения ДОН в зерне пшеницы и исследованными погодными условиями для урожаев 2006–2018 гг.

Параметр	Коэффициент корреляции r (достоверность p)			
	Май	Июнь	Июль	Август
Среднемесячная влажность воздуха	0,49 (0,120)	-0,05 (0,868)	-0,22 (0,504)	-0,08 (0,811)
Среднемесячная температура воздуха	-0,46 (0,150)	-0,03 (0,916)	0,02 (0,946)	0,12 (0,718)
Продолжительность солнечного времени в месяце	-0,65 (0,029)	-0,08 (0,805)	-0,07 (0,837)	-0,09 (0,782)
Количество дней с осадками свыше 1 мм	0,74 (0,008)	-0,21 (0,525)	-0,11 (0,747)	-0,11 (0,756)

⁸ Веселов В.М., Прибыльская И.Р., Мирзеабасов О.А. Специализированные массивы для климатических исследований. «Аисори – Удаленный доступ к ЯОД-архивам». ВНИИГМИ-МЦАисори Д [Электронный ресурс]. – URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index0.xhtml> (дата обращения: 03.03.2021).

Таблица 4

Двухфакторный дисперсионный анализ класса зерна, года урожая и уровня загрязненности

Зависимая переменная (содержание ДОН в пробе)					
Источник	Сумма квадратов типа III	Степень свободы	Средний квадрат	F-критерий	Значимость
Скорректированная модель	3,422 ^a	3	1,141	1,300	0,284
Год	0,503	1	0,503	0,573	0,452
Показатель качества зерна (класс пшеницы)	0,811	1	0,811	0,924	0,341
Год × Класс	2,034	1	2,034	2,319	0,134
Ошибка	47,380	54	0,877	–	–
Всего	68,325	58	–	–	–
Скорректированный итог	50,802	57	–	–	–

Примечание: ^a – R-квадрат = 0,067 (скорректированный R-квадрат = 0,016)

Таблица 5

Частота и уровни загрязнения ДОН продовольственного зерна ячменя, овса и кукурузы урожаев 1989–2018 гг.

Вид зерна	Количество проб			Содержание ДОН в контаминированных пробах, мг/кг	Содержание ДОН в пробах всего ряда, мг/кг		
	Всего, шт.	содержащих ДОН	содержащих ДОН выше МДУ		М	Ме	90 %
Ячмень	1293	54 (4,2)	5 (0,4)	0,05 – 8,95	0,02	0	0
Кукуруза	278	33 (11,9)	МДУ не установлен	0,05 – 0,95	0,04	0	0,07
Овес	200	6 (3,0)	МДУ не установлен	0,06 – 0,96	0,01	0	0
Рожь	1020	6 (0,6)	МДУ не установлен	0,06 – 0,44	0,00	0	0

Примечание: МДУ ДОН, мг/кг, не более: 1,0 – ячмень (ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна»).

Загрязненность ДОН *ячменя* продовольственного назначения была изучена на примере 1293 проб урожаев 1989–2018 гг. Частота обнаружения ДОН в ячмене была ниже, чем в пшенице (10 %) и кукурузе. ДОН был выявлен в 4 % проб (54) в количестве от 0,05 до 8,95 мг/кг, причем в 5 пробах содержание ДОН превысило МДУ. Самая высокая частота обнаружения ДОН была отмечена в зерне урожаев 2017 и 2014 гг. – 44 и 30 % соответственно, немного ниже – в зерне урожаев 2015 г. (22 %), 2016 г. (19 %), 1989 г. (16 %), 1992 и 2009 г. (по 14 %). В остальные годы частота загрязнения варьировалась от 0 до 7 %. Примечательно, что в последние несколько лет, с 2014 г., наблюдался рост частоты загрязнения ДОН ячменя.

Около 86 % от общего производства ячменя сосредоточены в Центральном, Приволжском, Южном и Сибирском ФО [25]. Наибольшее количество проб на исследование поступило из Центрального и Южного ФО. В 11 % проб ячменя из Южного ФО был обнаружен токсин в количестве от 0,05 до 1,7 мг/кг, содержание ДОН в одной пробе урожая 2017 г. превысило МДУ. Наиболее загрязненным оказался ячмень из Краснодарского края: в 23 % случаев из 39 проб обнаружили от 0,05 до 1,7 мг/кг ДОН, наименее загрязненными (7,5 % случаев из 40 проб) – из Ростовской области, содержание ДОН в них варьировалось от 0,05 до 0,11 мг/кг.

Согласно нашим данным, наиболее часто токсин выявляли в ячмене из Северо-Кавказского ФО: ДОН был найден в 17 % случаев из 64 изученных проб, в частности в пробах из Ставропольского края

на низких уровнях загрязнения (0,10 и 0,11 мг/кг); из Кабардино-Балкарии – в более широком диапазоне загрязнения – от 0,07 до 8,95 мг/кг, с превышением МДУ в зерне урожая 2017 г. В единичных случаях на низких уровнях ДОН обнаруживали в зерне, поступившем из республик Ингушетия и Северная Осетия.

Несмотря на то что пробы из Дальневосточного региона поступали на исследования нерегулярно и в небольших количествах, около половины изученных проб (10 из 21) были загрязнены ДОН в количестве от 0,05 до 2,83 мг/кг с превышением МДУ в пробе урожая 2018 г. из Амурской области. Партии ячменя урожаев 2005–2009 гг., поступившие на исследование из Приморского края, были загрязнены токсином на невысоких уровнях – от 0,06 до 0,21 мг/кг.

Полученные результаты исследований показали, что, подобно пшенице, в ячмене наиболее загрязненными ДОН были пробы из Дальневосточного, Северо-Кавказского и Южного ФО.

По частоте загрязнения ДОН зерно *кукурузы* (11,9 %) не отличалось от соответствующих данных зерна пшеницы (10,0 %). Содержание ДОН в контаминированных пробах кукурузы варьировалось от 0,05 до 0,95 мг/кг (среднее содержание – 0,04 мг/кг). Для сравнения: содержание ДОН в загрязненных пробах пшеницы составляло 0,05 – 6,65 мг/кг. Анализ динамики загрязненности ДОН отечественного зерна кукурузы показал, что токсин обнаруживали только в зерне урожаев 2000, 2002, 2012–2018 гг., а наибольшая частота загрязнения отмечалась в урожаях последних лет (2014, 2016–2018 гг.).

Основными производителями кукурузы являются Южный, Северо-Кавказский и Центральный ФО⁷. Наибольшее количество проб на исследование поступило из Южного (217 проб) и Северо-Кавказского ФО (47 проб). Наиболее часто токсин обнаруживали в кукурузе из Северо-Кавказского ФО – в 32 % случаев из 47 изученных партий в количестве от 0,05 до 0,68 мг/кг, в среднем – 0,09 мг/кг. Реже, в 6 % случаев, токсин обнаруживали в пробах из Южного ФО в количестве от 0,05 до 0,95 мг/кг, в среднем – 0,02 мг/кг. В единичных партиях кукурузы из Центрального ФО был обнаружен ДОН в количестве 0,29 и 0,32 мг/кг. Стоит отметить, что 4 из 6 изученных проб кукурузы из Дальневосточного ФО были загрязнены ДОН в диапазоне от 0,13 до 0,55 мг/кг.

Загрязненность ДОН *овса* продовольственного назначения изучили для 200 проб урожая 1999–2018 гг. Токсин был обнаружен в 3 % случаев в количестве от 0,05 до 0,96 мг/кг, в среднем – 0,008 мг/кг (см. табл. 5). ДОН был обнаружен в овсе урожая 2009, 2016 и 2017 гг.

Следует отметить, что около 39 % от общероссийского производства овса сосредоточено в Алтайском и Красноярском краях, Новосибирской, Тюменской, Кемеровской и Омской областях и в Республике Башкортостан⁷. В пробах, поступивших из этих регионов, токсин выявлен не был. Загрязненными оказались только пробы из Дальневосточного (4 случая) и Северо-Кавказского ФО (2). Наиболее загрязненными ДОН оказались пробы овса из Амурской области и Приморского края, содержание ДОН в этих пробах варьировалось от 0,09 до 0,96 мг/кг. Реже и на низких уровнях загрязнения токсин обнаруживали в овсе из республики Ингушетия и Ставропольского края (0,06; 0,09 мг/кг соответственно).

Токсин в зерне *ржи* выявляли, главным образом, в годы эпифитотий (урожаи 1989, 1992 гг.) в пробах из Северо-Кавказского ФО. В единичных случаях на низких уровнях загрязнения токсин обнаруживали в зерне урожая 1996 и 2007 гг. – 0,22 и 0,06 мг/кг в зерне из Северо-Кавказского ФО и Центрального ФО соответственно. Около 74,4 % от общего валового сбора по стране сосредоточено в регионах Приволжского ФО, в республиках Башкортостан, Татарстан, Оренбургской и Саратовской областях [26]. Пробы ржи, поступившие из этих областей, не были загрязнены токсином.

Согласно проведенным мониторинговым исследованиям можно заключить, что в РФ среди зерновых культур наиболее часто ДОН загрязнены пшеница и кукуруза, в меньшей степени – ячмень. Рост частоты обнаружения и уровней загрязнения токсином продовольственного зерна урожая последних лет (2014, 2017 и 2018 гг.) может быть обусловлен не только благоприятными для токсинооб-

разования грибов рода *Fusarium* погодными условиями, но и изменением ареалов грибов *F. graminearum*. Согласно данным Т.Ю. Гагкаевой с соавт. [13], в последние годы происходит его распространение на новые, более северные, по сравнению с ранее существующими границами обитания, территории, характерные для этого гриба. Начиная с 2003 г. устойчивые популяции вида *F. graminearum*, существующие в Приморском крае и на Северном Кавказе, в период локальных погодных изменений, характеризующихся благоприятными для микромицетов климатическими условиями, расселяются на новые участки, например, на северо-запад России [25]. Авторы предполагают, что отмечаемое потепление климата, особенно в зимние месяцы, способствует выживанию *F. graminearum* на новых территориях, или же происходит адаптация гриба к более холодным условиям обитания [13]. Возможной причиной также может служить и интенсификация сельского хозяйства.

Результаты мониторинга подтвердили, что основными ареалами фузариоза продолжают оставаться Южный, Северо-Кавказский и Дальневосточный ФО. В то же время в 2016–2018 гг. наблюдается увеличение частоты обнаружения ДОН в зерне из более северных областей.

Оценка риска здоровью, обусловленного загрязненностью ДОН продовольственного зерна пшеницы. Пшеница является основным источником поступления ДОН с пищей. При расчете возможной нагрузки ДОН на человека использовали среднее содержание микотоксина для проб одного года урожая (см. *M* в табл. 1). Расчет нагрузки токсином на человека был выполнен в рамках сценария, согласно которому содержание ДОН в продуктах переработки пшеницы соответствует таковому в зерне, то есть переработка зерна пшеницы не оказывает значительного влияния на содержание ДОН в готовом продукте. Такой подход соответствует результатам исследований стабильности токсина в условиях переработки сырья и приготовления пищи: при очистке зерна содержание токсина может оставаться неизменным или снижаться до 22–23 % [15, 27]; а термическая обработка не приводит к снижению содержания ДОН [15, 27, 28].

Сведения о потреблении продуктов переработки пшеницы (хлеб пшеничный, хлебобулочные изделия, мучные кондитерские изделия, мука пшеничная, манная крупа, макаронные изделия) были взяты из данных бюджетной статистики, опубликованных Федеральной службой Государственной статистики, по материалам выборочного обследования бюджетов домашних хозяйств⁹. Среднее потребление продуктов переработки пшеницы в сутки в последние 25 лет постепенно снижается от 267 г в 1993 г. до 209 г в 2018 г., что было учтено при расчете поступления ДОН. Средняя масса человека была принята равной 60 кг.

⁹ Потребление продуктов питания в домашних хозяйствах (бюллетень) [Электронный ресурс] // Росстат. – URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13292> (дата обращения: 03.03.2021).

Таблица 6

Расчетное суточное поступление ДОН с пищевыми продуктами, изготовленными из продовольственного зерна пшеницы урожая 1989–2018 гг.

Год урожая	Расчетное суточное поступление ($N_{расч}$), мкг/кг м.т./сут (% от УПСП)	
	в среднем по России	Южный и Северо-Кавказский ФО
1989	0,96 (96,0)	–
1990–1991	0,07 (7,0)	–
1992	1,40 (140,0)	4,10 (410,0)
1993	0,89 (89,0)	2,18 (218,0)
1994	0,12 (12,0)	0,29 (29,0)
1995	0,12 (12,0)	0,68 (68,0)
1996	0,07 (7,0)	0,18 (18,0)
1997	0,08 (8,0)	0,20 (20,0)
1998	0,12 (12,0)	0,48 (48,0)
1999	0,002 (0,2)	–
2000	0,04 (0,4)	0,30 (30,0)
2001	0,036 (3,6)	0,22 (22,0)
2002	0,028 (2,8)	0,28 (28,0)
2003	0 (0)	0 (0)
2004	0,004 (0,4)	0,03 (3,0)
2005	0,084 (8,4)	0,36 (36,0)
2006	0,096 (9,6)	0,18 (18,0)
2007	0,066 (6,6)	0,24 (24,0)
2008	0,07 (7,0)	0,17 (17,0)
2009	0,025 (2,5)	0,03 (3,0)
2010	0,18 (18,0)	0,14 (14,0)
2011	0,04 (4,0)	0,12 (12,0)
2012	0 (0)	0 (0)
2013	0,04 (4,0)	0,04 (4,0)
2014	1,02 (102,0)	1,12 (112,0)
2015	0,05 (5,0)	0,05 (5,0)
2016	0,16 (16,0)	0,26 (26,0)
2017	0,63 (63,0)	1,09 (109)
2018	0,21 (21,0)	0,56 (56,0)

Расчетное суммарное поступление ДОН на человека в среднем по России в значительной степени различалось по годам. Величины нагрузки ДОН варьировались от 0,2 % (в 1999 г.) до 140 % (в 1992 г.) от УПСП ДОН, но во всех случаях, за исключением 1992 (140 %) и 2014 гг. (102 %), оставались ниже принятого УПСП – 1 мкг/кг м.т. (табл. 6) [20].

Следует отметить, что высокое расчетное поступление ДОН с продуктами из пшеницы урожая 2014 г. для населения России в среднем незначительно отличалось от поступления токсина в зоне риска и было связано, отчасти, с тем, что 88 % поступившего на исследование зерна происходило из Южного и Северо-Кавказского ФО. Более подробный анализ расчетных величин суточного поступления ДОН на человека показал, что в течение всего периода наблюдения нагрузка токсином в Южном и Северо-Кавказском ФО была выше, чем в среднем по России, и варьировалась от 3 % (в 2004 и 2009 гг.) до 410 % от УПСП (в 1992 г.). Расчетное поступление ДОН для населения Южного и Северо-Кавказского ФО превысило величину УПСП также в 1993, 2014, 2017 гг. и составило 218, 112 и 109 % от УПСП соответственно. Отмеченная выше тенденция к нарастанию загрязненности пшеницы обусловли-

вает необходимость принятия мер по контролю безопасности продовольственного зерна.

Выводы. Анализ результатов многолетнего мониторинга загрязненности микотоксинами продовольственного зерна РФ, проводимого Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека при участии ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», подтвердил, что наиболее подвержено контаминации ДОН зерно, выращенное в Южном, Северо-Кавказском и Дальневосточном ФО. В то же время наблюдается увеличение частоты обнаружения ДОН в зерне из более северных областей, что свидетельствует о расширении ареала фузариоза зерна и увеличении вероятности заражения зерна продуцентами микотоксинов. При этом зона распространения загрязнения может возрастать при передаче зерна из одного региона в другой, что свидетельствует о необходимости его контроля, в первую очередь, для зерна, используемого в качестве посевного материала.

Среди исследованных зерновых культур наибольшая частота и уровни контаминации ДОН характерны для пшеницы и кукурузы. Показано, что за исследованный период расчетное суточное поступ-

ление токсина с продуктами переработки продовольственного зерна пшеницы в отдельные годы превышало установленную ЖЕСФА величину УПСП ДОН. Вероятность превышения УПСП выше для населения Южного и Северо-Кавказского ФО.

С целью снижения рисков для здоровья населения, обусловленных контаминацией продовольственного зерна ДОН, актуальными являются мероприятия по усилению контроля распространения фузариоза на территории РФ. Особое внимание следует уделить мониторингу безопасности продоволь-

ственного зерна пшеницы и кукурузы, в частности произведенной на территории Южного и Северо-Кавказского ФО.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИР 0529-2019-0057 «Разработка системы качества и безопасности пищевой продукции, в том числе пищевых добавок и спиртосодержащих напитков, полученных биотехнологическими методами».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

1. Bryden W.L. Mycotoxins in the food chain: human health implications // *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* – 2007. – Vol. 16. – P. 95–101.
2. Тутельян В.А., Кравченко Л.В., Сергеев А.Ю. Микотоксины // *Микология сегодня* / под ред. Ю.Т. Дьякова, Ю.В. Сергеева. – М.: Национальная академия микологии, 2007. – Т. 1. – С. 283–304.
3. Composition and Predominance of *Fusarium* Species Causing Fusarium Head Blight in Winter Wheat Grain Depending on Cultivar Susceptibility and Meteorological Factors / T. Birr, M. Hasler, J.-A. Verreet, H. Klink // *Microorganisms.* – 2020. – Vol. 8, № 4. – P. 617. DOI: 10.3390/microorganisms8040617
4. Occurrence of 26 Mycotoxins in the Grain of Cereals Cultivated in Poland / M. Bryla, A. Waskiewicz, G. Podolska, K. Szymczyk, R. Jedrzejczak, K. Damaziak, A. Sulek // *Toxins.* – 2016. – Vol. 8, № 6. – P. 160. DOI: 10.3390/toxins8060160
5. Deoxynivalenol and other selected *Fusarium* toxins in Swedish oats – Occurrence and correlation to specific *Fusarium* species / E. Fredlund, A. Gidlund, M. Sulyok, T. Börjesson, R. Krska, M. Olsen, M. Lindblad // *Int. J. Food. Microbiol.* – 2013. – Vol. 167. – P. 276–283.
6. Xu W., Han X., Li F. Co-occurrence of multi-mycotoxins in wheat grains harvested in Anhui province, China // *Food Control.* – 2018. – Vol. 96. – P. 180–185. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.09.006
7. Mycotoxins in Wheat and Mitigation Measures / F. Cheli, L. Pinotti, M. Novacco, M. Ottoboni, M. Tretola, V. Dell'Orto [Электронный ресурс] // *IntechOpen.* – 2017. – URL: <https://www.intechopen.com/chapters/53908> (дата обращения: 17.01.2021)
8. Co-occurrence of type A and B trichothecenes and zearalenone in wheat grown in northern Italy over the years 2009–2011 / T. Bertuzzi, M.C. Leggieri, P. Battilani, A. Pietri // *Food Additives & Contaminants: Part B.* – 2014. – Vol. 7, № 4 – P. 273–281. DOI: 10.1080/19393210.2014.926397
9. Occurrence of Deoxynivalenol (DON) in wheat flours in Guilan Province, Northern Iran / R.K. Darsanaki, K. Issazadeh, M.A. Aliabadi, M.M.D. Chakoosari // *Ann. Agric. Environ. Med.* – 2015. – Vol. 22. – P. 35–37.
10. Alshannaq A., Yu O.-H. Occurrence, Toxicity, and Analysis of Major Mycotoxins in Food // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* – 2017. – Vol. 14. – P. 632. DOI: 10.3390/ijerph14060632
11. Opinion of the Scientific Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel) on the risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed. European Food Safety Authority // *EFSA Journal.* – 2017. – Vol. 15, № 9. – P. 4718. DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4718
12. Deoxynivalenol and its masked forms: Characteristics, incidence, control and fate during wheat and wheat based products processing - A review / A.M. Khaneghah, L.M. Martins, A.M. von Hertwig, R. Bertoldo, A.S. Sant'Ana // *Trends in Food Science & Technology.* – 2018. – Vol. 71. – P. 13–24. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.10.012
13. Гагкаева Т.Ю., Гаврилова О.П., Левитин М.М. Биоразнообразие и ареалы основных токсинопродуцирующих грибов рода *FUSARIUM* // *Биосфера.* – 2014. – Т. 6, № 1. – С. 36–45.
14. Codex Alimentarius. CXC 51-2003 Code of Practice for the Prevention and Reduction of Mycotoxin Contamination in Cereal / WHO Food Standards Programme, Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXC%2B51-2003%252FCXC_051e.pdf (дата обращения: 29.01.2021).
15. Мачихина Л.И., Алексеева Л.В., Львова Л.С. Научные основы продовольственной безопасности зерна (хранение и переработка). – М.: ДеЛи принт, 2007. – 382 с.
16. DON Occurrence in Grains: A North American Perspective / A. Bianchini, R. Horsley, M.M. Jack, B. Kobielski, D. Ryu, Sh. Tittlemire, W.W. Wilson, H.K. Abbas [et al.] // *Cereal foods world.* – 2015. – Vol. 60, № 1. – P. 32–56. DOI: 10.1094/CFW-60-1-0032
17. Bottalico A., Perrone G. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe // *European Journal of Plant Pathology.* – 2002. – Vol. 108. – P. 611–624.
18. Tutelyan V.A. Deoxynivalenol in cereals in Russia // *Toxicol. Lett.* – 2004. – Vol. 153, № 1. – P. 173–179. DOI: 10.1016/j.toxlet.2004.04.042
19. Deoxynivalenol in wheat from the Northwestern region in China / Yu. Zhao, X. Guan, Yi. Zong, X. Hua, F. Xing, Y. Wang, F. Wang, Y. Liu // *Food Additives & Contaminants: Part B.* – 2018. – Vol. 11, № 4. – P. 281–285. DOI: 10.1080/19393210.2018.1503340
20. JECFA. Summary of toxicological evaluations. Summary Report of the 72nd Meeting of the Joint FAO [Электронный ресурс] / WHO Expert Committee on Food Additives, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2010. – URL: www.who.int/foodsafety/chem/summary72_rev.pdf (дата обращения: 04.02.2021).

21. Pestka J.J. Deoxynivalenol: Mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance // Arch. Toxicol. – 2010. – Vol. 84. – P. 663–679.

22. Codex Alimentarius. CXS 193-1995 General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (last amended in 2019) / WHO Food Standards Programme, Food and Agriculture Organization of the United Nations [Электронный ресурс]. – URL: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252Fstandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf (дата обращения: 03.03.2021).

23. COMMISSION REGULATION (EC) No 1881/2006 of 19.12.2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs [Электронный ресурс]. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF> (дата обращения: 03.03.2021).

24. Natural Occurrence of nivalenol, deoxynivalenol, and deoxynivalenol-3-glucoside in polish winter wheat / M. Bryła, E. Ksieniewicz-Woźniak, A. Waśkiewicz, K. Szymczyk, R. J. Drzejczak // Toxins. – 2018. – Vol. 10, № 2. – P. 81. DOI: 10.3390/toxins10020081

25. Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю. Фузариоз зерна на севере Нечерноземья и в Калининградской области в 2007–2008 годах // Защита и карантин растений. – 2010. – № 2. – С. 23–25.

26. Продовольственная независимость России: в 2 т. / под общ. ред. А.В. Гордеева. – М.: Технология ЦД, 2016. – Т. 1. – 560 с.

27. Kushiro M. Effects of Milling and Cooking Processes on the Deoxynivalenol Content in Wheat // Int. J. Mol. Sci. – 2008. – Vol. 9, № 11. – P. 2127–2145. DOI: 10.3390/ijms9112127

28. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination / P. Karlovsky, M. Suman, F. Berthiller, J. De Meester, G. Eisenbrand, I. Perrin, I.P. Oswald, G. Speijers [et al.] // Mycotoxin Res. – 2016. – Vol. 32. – P. 179–205.

Дезоксиниваленол как фактор риска загрязнения продовольственного зерна: мониторинг урожая в 1989–2018 гг. в Российской Федерации / И.Б. Седова, Л.П. Захарова, М.Г. Киселева, З.А. Чалый, А.Н. Тимонин, Т.В. Аристархова, Л.В. Кравченко, В.А. Тутельян // Анализ риска здоровью. – 2021. – № 3. – С. 85–98. DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.08

UDC 614.31: 633.1

DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.08.eng



Research article

DEOXINIVALENOL AS A RISK FACTOR OF FOOD GRAIN CONTAMINATION: MONITORING RESULTS OF 1989–2018 YEARS HARVESTS IN RUSSIAN FEDERATION

**I.B. Sedova¹, L.P. Zakharova¹, M.G. Kiseleva¹, Z.A. Chaluy¹, A.N. Timonin¹,
T.V. Aristarkhova¹, L.V. Kravchenko¹, V.A. Tutelyan^{1,2}**

¹Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, 2/14 Ustinskiy proezd, Moscow, 109240, Russian Federation

²I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, 2 Bldg., 8 Trubetskaya Str., Moscow, 119991, Russian Federation

The paper dwells on the results obtained via long-term monitoring over food grain (wheat, barley, corn, oats, and rye) contamination with mycotoxin deoxynivalenol (DON). From 1989 to 2018 6,800 grain samples from Central, Southern, Volga, Ural, Siberian, North-Caucasian, Far Eastern, and North-western Federal Districts (FD) of the RF were analyzed. Depending on a year harvest, DON occurrence varied from 0 to 42 % and maximum toxin content reached 6.65 mg/kg. Over the whole examined period 10 % samples turned out to be contaminated and one forth of them contained the toxin in quantities exceeding maximum permissible levels (MPL). DON occurrence amounted to 24–42 % in years of mass epiphytotic (1989, 1992 and 1993) as well as in crops gathered in 2014 and 2017; DON was detected in quantities exceeding MPL in 9–27 % of examined samples in those years. 78 % contaminated samples came from Southern and North-Caucasian FD and another 10 % were from Far Eastern FD. A significant correlation between DON occurrence and a number of rainy and sunny days in May was established on the example of wheat samples from Krasnodar region. Analysis of contamination dynamics has revealed that over the last years there has been an ascending trend in frequency of DON detection in wheat that

came not only from regions where *Fusarium head blight* was widely spread but also from regions in North-western, Siberian and Volga FD. Health risks related to DON intake with wheat grains processing products were assessed; the assessment revealed that DON intake higher than tolerable daily intake (TDI) for the residents of Southern and North-Caucasian FD in 1992, 1993, 2014 and 2017.

Average occurrence of DON was 4.2; 11.9; 3.0 and 0.6 % for barley, corn, rye, and oats samples and its maximum contents amounted to 8.95; 0.95; 0.96 and 0.44 mg/kg accordingly. Just as it was the case with wheat, the most of contaminated samples came from Southern, North-Caucasian and Far Eastern FD. Contamination tended to grow for all the examined grains and it calls for relevant measures aimed at controlling food grains safety

Key words: monitoring, mycotoxins, food grain, wheat, barley, oats, corn, rye, *Fusarium head blight*, occurrence, deoxynivalenol, health risk assessment, tolerable daily intake, weather, correlation analysis.

References

1. Bryden W.L. Mycotoxins in the food chain: human health implications. *Asia Pac J. Clin. Nutr.*, 2007, vol. 16, pp. 95–101.
2. Tutelyan V.A., Kravchenko L.V., Sergeev A.Yu. Mycotoxins. *Mycology today*. In: Yu.T. D'yakova, Yu.V. Sergeeva eds., Moscow, Natsional'naya akademiya mikologii Publ., 2007, vol. 1, pp. 283–304 (in Russian).
3. Birr T., Hasler M., Verreet J.-A., Klink H. Composition and Predominance of *Fusarium* Species Causing *Fusarium* Head Blight in Winter Wheat Grain Depending on Cultivar Susceptibility and Meteorological Factors. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 2020, vol. 8, no. 4. pp. 617. DOI: 10.3390/microorganisms8040617
4. Bryla M., Waskiewicz A., Podolska G., Szymczyk K., Jedrzejczak R., Damaziak K., Sulek A. Occurrence of 26 Mycotoxins in the Grain of Cereals Cultivated in Poland. *Toxins*, 2016, vol. 8, no. 6, pp. 160. DOI: 10.3390/toxins8060160
5. Fredlund E., Gidlund A., Sulyok M., Börjesson T., Krska R., Olsen M., Lindblad M. Deoxynivalenol and other selected *Fusarium* toxins in Swedish oats – Occurrence and correlation to specific *Fusarium* species. *Int. J. Food. Microbiol.*, 2013, vol. 167, pp. 276–283.
6. Xu W., Han X., Li F. Co-occurrence of multi-mycotoxins in wheat grains harvested in Anhui province, China. *Food Control*, 2019, vol. 96, pp. 180–185. DOI: 10.1016/j.foodcont.2018.09.006
7. Cheli F., Pinotti L., Novacco M., Ottoboni M., Tretola M., Dell'Orto V. Mycotoxins in Wheat and Mitigation Measures. *IntechOpen*, 2017. Available at: <https://www.intechopen.com/chapters/53908> (17.01.2021).
8. Bertuzzi T., Leggieri M.C., Battilani P., Pietri A. Co-occurrence of type A and B trichothecenes and zearalenone in wheat grown in northern Italy over the years 2009–2011. *Food Addit. Contam. Part B*, 2014, vol. 7, pp. 273–281.
9. Darsanaki R.K., Issazadeh K., Aliabadi M.A., Chakoosari M.M.D. Occurrence of Deoxynivalenol (DON) in wheat flours in Guilan Province, Northern Iran. *Ann. Agric. Environ. Med.*, 2015, vol. 22, pp. 35–37.
10. Alshannaq A., Yu O-H. Occurrence, Toxicity, and Analysis of Major Mycotoxins in Food. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2017, vol. 14, pp. 632. DOI: 10.3390/ijerph14060632
11. Opinion of the Scientific Panel n Contaminants in the Food Chain (CONTAM Panel) on the risks to human and animal health related to the presence of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms in food and feed. European Food Safety Authority. *EFSA Journal*, 2017, vol. 15, no. 9. DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4718
12. Khaneghah A.M., Martins L.M., von Hertwig A.M., Bertoldo R., Sant'Ana A.S. Deoxynivalenol and its masked forms: Characteristics, incidence, control and fate during wheat and wheat based products processing – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, vol. 71, pp. 13–24. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.10.012
13. Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P., Levitin M.M. Biodiversity and distribution of the main toxigenic *Fusarium* fungi. *Biosfera*, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 36–45 (in Russian).

© Sedova I.B., Zakharova L.P., Kiseleva M.G., Chalyy Z.A., Timonin A.N., Aristarkhova T.V., Kravchenko L.V., Tutelyan V.A., 2021

Irina B. Sedova – Candidate of Biological Sciences, Senior researcher at the Laboratory for Enzymology of Nutrition (e-mail: isedova@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6011-4515>).

Ludmila P. Zakharova – Candidate of Biological Sciences, Senior researcher at the Laboratory for Enzymology of Nutrition (e-mail: zaharova@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7355-5259>).

Mariya G. Kiseleva – Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher at the Laboratory for Enzymology of Nutrition (e-mail: mg_kiseleva@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1057-0886>).

Zakhar A. Chalyy – Junior researcher at the Laboratory for Enzymology of Nutrition (e-mail: brew@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9371-8163>).

Andrey N. Timonin – Candidate of Biological Sciences, Junior researcher at the Immunology Laboratory (e-mail: andrey8407@mail.ru; tel.: +7 (495) 698-53-20; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6087-6918>).

Tatyana V. Aristarkhova – Researcher at the Laboratory for Metabolomic and Proteomic Analysis (e-mail: aristarkhova_tv@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-92; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-8626>).

Lidiya V. Kravchenko – Candidate of Medical Sciences, Leading researcher at the Laboratory for Enzymology of Nutrition (e-mail: kravchenko@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-65; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9316-4527>).

Victor A. Tutelyan – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Laboratory for Enzymology of Nutrition, research supervisor (e-mail: tutelyan@ion.ru; tel.: +7 (495) 698-53-46; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4164-8992>).

14. Codex Alimentarius. CXC 51-2003 Code of Practice for the Prevention and Reduction of Mycotoxin Contamination in Cereal. WHO Food Standards Programme, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXC%2B51-2003%252FCXC_051e.pdf (29.01.2021).
15. Machikhina L.I., Alekseeva L.V., L'vova L.S. Nauchnye osnovy prodovol'stvennoi bezopasnosti zerna (khranenie i pererabotka) [Scientific foundations of food grain safety dtorage and processing]. Moscow, DeLi print Publ., 2007, 382 p. (in Russian).
16. Bianchini A., Horsley R., Jack M.M., Kobielush B., Ryu D., Tittlemier Sh., Wilson W.W., Abbas H.K. [et al.]. DON Occurrence in Grains: A North American Perspective. *Cereal foods world*, 2015, vol. 60, no. 1, pp. 32–56. DOI: 10.1094/CFW-60-1-0032
17. Bottalico A., Perrone G. Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology*, 2002, vol. 108, pp. 611–624.
18. Tutelyan V.A. Deoxynivalenol in cereals in Russia. *Toxicol. Lett.*, 2004, vol. 153, no. 1, pp. 173–179. DOI: 10.1016/j.toxlet.2004.04.042
19. Zhao Yu., Guan X., Zong Yi., Hua X., Xing F., Wang Y., Wang F., Liu Y. Deoxynivalenol in wheat from the Northwestern region in China. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 2018, vol. 11, no. 4, pp. 281–285. DOI: 10.1080/19393210.2018.1503340
20. JECFA. Summary of toxicological evaluations. Summary Report of the 72nd Meeting of the Joint FAO.WHO Expert Committee on Food Additives, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2010. Available at: www.who.int/foodsafety/chem/summary72_rev.pdf (04.02.2021).
21. Pestka J.J. Deoxynivalenol: Mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance. *Arch. Toxicol.*, 2010, vol. 84, pp. 663–679.
22. Codex Alimentarius. CXS 193-1995 General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (last amended in 2019). WHO Food Standards Programme, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available at: http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/sh-proxy/en/?lnk=1&url=https%253A%252F%252Fworkspace.fao.org%252Fsites%252Fcodex%252FStandards%252FCXS%2B193-1995%252FCXS_193e.pdf (03.03.2021).
23. COMMISSION REGULATION (EC) No 1881/2006 of 19.12.2006 setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:364:0005:0024:EN:PDF> (03.03.2021).
24. Bryła M., Ksieniewicz-Woźniak E., Waśkiewicz A., Szymczyk K., Jędrzejczak R. Natural Occurrence of nivalenol, deoxynivalenol, and deoxynivalenol-3-glucoside in polish winter wheat. *Toxins*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 81. DOI:10.3390/toxins10020081
25. Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu. Fuzarioz zerna na severe Nechernozem'ya i v Kaliningradskoi oblasti v 2007–2008 godakh. *Zashchita i karantin rastenii*, 2010, no. 2, pp. 23–25 (in Russian).
26. Prodovol'stvennaya nezavisimost' Rossii: v 2 t. [Food independence of Russia: in 2 volumes]. In: A.V. Gordeev Eds. Moscow., OOO Tekhnologiya TsD Publ., 2016, vol. 1, 560 p. (in Russian).
27. Kushiro M. Effects of Milling and Cooking Processes on the Deoxynivalenol Content in Wheat. *Int. J. Mol. Sci*, 2008, vol. 9, pp. 2127–2145. DOI: 10.3390/ijms9112127
28. Karlovsky P., Suman M., Berthiller F., De Meester J., Eisenbrand G., Perrin I., Oswald I.P., Speijers G., Chiodini A., Recker T., Dussort P. Impact of food processing and detoxification treatments on mycotoxin contamination. *Mycotoxin Res.*, 2016, vol. 32, pp. 179–205.

Sedova I.B., Zakharova L.P., Kiseleva M.G., Chalyy Z.A., Timonin A.N., Aristarkhova T.V., Kravchenko L.V., Tutelyan V.A. Deoxynivalenol as a risk factor of food grain contamination: monitoring results of 1989–2018 years harvests in Russian Federation. *Health Risk Analysis*, 2021, no. 3, pp. 85–98. DOI: 10.21668/health.risk/2021.3.08.eng

Получена: 31.03.2021

Принята: 27.07.2021

Опубликована: 30.09.2021