

Перевод на английский язык <https://vavilov.elpub.ru/jour>

## Характеристика устойчивости селекционных линий овса к заражению *Fusarium langsethiae* и накоплению Т-2/HT-2 токсинов

О.П. Гаврилова<sup>1</sup>, Т.Ю. Гагкаева<sup>1</sup>, А.С. Орина<sup>1</sup>, А.С. Маркова<sup>2</sup>, А.Д. Кабашов<sup>2</sup>, И.Г. Лоскутов<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Пушкин, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр «Немчиновка», пос. Новоивановское, Московская область, Россия

<sup>3</sup> Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), Санкт-Петербург, Россия

✉ i.loskutov@vir.nw.ru

**Аннотация.** Фузариоз относится к важным заболеваниям овса, поскольку многие виды грибов *Fusarium* способны продуцировать микотоксины, негативно влияющие на качество зерна. Иммунных к заражению грибами *Fusarium* зерновых культур нет, однако наблюдаются различия генотипов по степени устойчивости. Целью исследования стала характеристика перспективных линий голозерного овса по устойчивости к зараженности зерна грибами и содержанию фузариотоксинов. Анализировали 13 селекционных линий и два сорта голозерного овса, Немчиновский 61 и Вятский, а также сорт пленчатого овса Яков, которые выращивали на естественном фоне в Федеральном исследовательском центре «Немчиновка» в 2019–2020 гг. Зараженность зерна грибами определяли микологическим методом, а также с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР) в реальном времени, анализ микотоксинов выполняли иммуноферментным методом. Проведенные анализы показали, что зерно всех образцов овса было заражено грибами, однако их численность и видовое разнообразие варьировали в зависимости от анализируемого генотипа и года исследований. Микобиоту генотипов овса преимущественно составляли виды родов *Alternaria* (15–90 % от всех выделенных грибов), *Cochliobolus* (1–33 %), *Cladosporium* (1–19 %), *Epicoccum* (0–11 %) и *Fusarium* (3–17 %). Основными представителями фузариевых грибов были *F. poae*, продуцирующий ниваленол, и *F. langsethiae*, производящий Т-2/HT-2 токсины. Наибольшее количество ДНК *F. langsethiae*, а также Т-2/HT-2 токсинов содержалось в зерне пленчатого сорта Яков и составило  $(27.9–71.9) \times 10^{-4}$  пг/пг и 790–1230 мкг/кг соответственно. В зерне анализируемых линий овса содержание ДНК *F. langsethiae* варьировало в диапазоне  $(1.2–42.7) \times 10^{-4}$  пг/пг, Т-2/HT-2 токсинов – от 5 до 229 мкг/кг. Две линии голозерного овса, 54h2476 и 66h2618, а также новый сорт Азиль (линия 57h2396) можно охарактеризовать в условиях эксперимента как высокоустойчивые к заражению грибами *Fusarium* и контаминации микотоксинами в сравнении с контролем – сортом Вятский.

Ключевые слова: *Avena sativa*; голозерный; селекция; устойчивость; фузариоз; ДНК; микотоксины.

**Для цитирования:** Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю., Орина А.С., Маркова А.С., Кабашов А.Д., Лоскутов И.Г. Характеристика устойчивости селекционных линий овса к заражению *Fusarium langsethiae* и накоплению Т-2/HT-2 токсинов. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2021;25(7):732-739. DOI 10.18699/VJ21.083

## Resistance of oat breeding lines to grain contamination with *Fusarium langsethiae* and Т-2/HT-2 toxins

O.P. Gavrilova<sup>1</sup>, T.Yu. Gagkaeva<sup>1</sup>, A.S. Orina<sup>1</sup>, A.S. Markova<sup>2</sup>, A.D. Kabashov<sup>2</sup>, I.G. Loskutov<sup>3</sup>✉

<sup>1</sup> All-Russian Institute of Plant Protection, Pushkin, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Federal Research Center “Nemchinovka”, Novoivanovskoe, Moscow region, Russia

<sup>3</sup> Federal Research Center the N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR), St. Petersburg, Russia

✉ i.loskutov@vir.nw.ru

**Abstract.** Fusarium disease of oats reduces yield quality due to decreasing germination that is caused by the contamination of grain with mycotoxins produced by *Fusarium* fungi. The aim of this study was to characterize the resistance of naked breeding lines of oats to fungal grain infection and to contamination with Т-2 and HT-2 toxins. Thirteen naked oat breeding lines and two naked varieties, Nemchinovskiy 61 and Vyatskiy, as well as a husked variety Yakov, were grown under natural conditions in the Nemchinovka Federal Research Center in 2019–2020. The contamination of grain with fungi was determined by the mycological method and real-time PCR. The analysis of mycotoxins was carried out by ELISA. In oats, *Alternaria* (the grain infection was 15–90 %), *Cochliobolus* (1–33 %), *Cladosporium* (1–19 %), *Epicoccum* (0–11 %), and *Fusarium* (3–17 %) fungi prevailed in the grain mycobiota. The predominant *Fusarium* species were *F. poae* (its proportion among *Fusarium* fungi was 49–68 %) and *F. langsethiae* (29–28 %). The highest amounts of *F. langsethiae* DNA  $((27.9–71.9) \times 10^{-4}$  pg/ng) and Т-2/HT-2 toxins (790–1230 µg/kg) were found in the grain of husked oat Yakov. Among the analysed naked oat lines, the amount of *F. langsethiae* DNA varied in the range of  $(1.2–42.7) \times 10^{-4}$  pg/ng,

and the content of T-2/HT-2 toxins was in the range of 5–229 µg/kg. Two oat breeding lines, 54h2476 and 66h2618, as well as a new variety, Azil (57h2396), can be characterized as highly resistant to infection with *Fusarium* fungi and contamination with mycotoxins compared to the control variety Vyatskiy.

Key words: *Avena sativa*; naked; breeding; resistance; *Fusarium*; DNA; mycotoxins.

**For citation:** Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Orina A.S., Markova A.S., Kabashov A.D., Loskutov I.G. Resistance of oat breeding lines to grain contamination with *Fusarium langsethiae* and T-2/HT-2 toxins. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii* = *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(7):732-739. DOI 10.18699/VJ21.083

## Введение

На протяжении последнего десятилетия объем информации о фузариозе овса (*Avena sativa* L.), вызываемом разными видами грибов рода *Fusarium* Link, многократно увеличился, поскольку фузариоз признан одной из основных болезней, влияющих на качество зерна этой культуры. Помимо непосредственного негативного влияния на хозяйственно ценные признаки, например уменьшения массы зерна (Martinelli et al., 2014), вредоносность грибов *Fusarium* определяется их способностью продуцировать микотоксины, которые накапливаются в зараженных зернах, сохраняются в обработанных продуктах и могут вызывать иммуносупрессию и другие проблемы здоровья у людей и животных (Fogoud et al., 2019). Современные исследования проблемы фузариоза овса включают не только определение видового состава возбудителей заболевания и выявление продуцируемых ими токсичных вторичных метаболитов (Fredlund et al., 2013; Gavrilova et al., 2016; Hofgaard et al., 2016; Schöneberg et al., 2018), но также изучение хозяино-патогенных взаимоотношений (Divon et al., 2012; Tekle et al., 2012; Martin et al., 2018; Willforss et al., 2020) и поиск потенциальных источников устойчивости к заболеванию (Лоскутов и др., 2016; Gagkaeva et al., 2013, 2017; Tekle et al., 2018; Chropová et al., 2020; Hautsalo et al., 2020), в том числе с использованием молекулярных методов анализа (He et al., 2013; Bjørnstad et al., 2017; Isidro-Sánchez et al., 2020).

Состав и соотношение видов грибов *Fusarium*, вызывающих фузариоз овса, значительно варьируют в зависимости от места возделывания культуры и климатических условий, складывающихся в вегетационный период (Schöneberg et al., 2018). Как правило, доминирующие виды *Fusarium* на зерне овса – это *F. poae* (Peck) Wollenw., *F. sporotrichioides* Sherb. и *F. langsethiae* Torp & Nirenberg (Kurowski, Wysocka, 2009; Fredlund et al., 2013; Gavrilova et al., 2016; Hofgaard et al., 2016), реже *F. graminearum* Schwabe (Schöneberg et al., 2018) и *F. avenaceum* (Fr.) Sacc. (Варгач и др., 2019). Все эти виды фузариевых грибов способны продуцировать различные микотоксины. Результаты многочисленных исследований демонстрируют, что основную опасность представляет контаминация зерна овса Т-2 и HT-2 токсинами, продуцируемыми *F. sporotrichioides* и *F. langsethiae* (Ороку et al., 2013; Буркин и др., 2015; Hofgaard et al., 2016; Kononenko et al., 2020; De Colli et al., 2021).

При создании новых сортов овса признак «устойчивость к фузариозу» долгое время не учитывался, несмотря на высокую повсеместную зараженность этой культуры грибами *Fusarium*. Слабое проявление или отсутствие видимых симптомов фузариоза на метелках овса, в отличие от более выраженных симптомов на колосьях других

зерновых культур, – основная проблема при полевой оценке устойчивости генотипов растений (Tekauz et al., 2008; Imathiou et al., 2013; Martin et al., 2018; Жуйкова, Баталова, 2019). Однако, несмотря на отсутствие симптомов на метелках, могут формироваться как щуплые, так и выполненные, но несущие внутреннюю инфекцию и микотоксины зерновки, доля которых зависит от агрессивности вида *Fusarium* и от условий, сопутствующих заражению растений.

Иммунных к заражению грибами *Fusarium* зерновых культур нет, однако наблюдаются различия генотипов по степени устойчивости. Показано, что генотип, устойчивый к одному виду *Fusarium*, проявляет устойчивость и к другим видам этого рода (Mesterhazy et al., 2005). В настоящее время описано несколько типов устойчивости зерновых культур к фузариозу (Boutigny et al., 2008; Tekle et al., 2018): устойчивость к проникновению (I) и распространению (II) патогена; устойчивость зерен к заражению патогеном (III); толерантность (IV); способность к накоплению и/или деградации микотоксинов в зерне (V). Надо отметить, что овес посевной (*A. sativa* L.) имеет два подвида – овес пленчатый (*A. sativa* subsp. *sativa* L.) и голозерный (*A. sativa* subsp. *nudisativa* (Husn.) Rod. et Sold.), которые отличаются друг от друга по морфологическим признакам, биохимическим свойствам и по устойчивости к абиотическим и биотическим факторам (Культурная флора, 1994; Loskutov et al., 2020). Относительно высокая устойчивость голозерного овса к фузариозу зерна, по сравнению с пленчатым, неоднократно отмечена разными исследователями (Tekauz et al., 2008; Yan et al., 2010; Gagkaeva et al., 2013; Martin et al., 2018; Chropová et al., 2020).

Информация об устойчивости к фузариозу зерна генотипов овса из коллекции Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР), проанализированных на искусственном инфекционном фоне *F. sporotrichioides*, была систематизирована в виде каталога (Гагкаева и др., 2012). Успешным примером объединения усилий разных групп исследователей стал сорт пленчатого овса Всадник, который является первым официально зарегистрированным сортом, относительно устойчивым к фузариозу, характеризующийся низким уровнем накопления микотоксинов в зерне, по сравнению с имеющим широкий ареал возделывания стандартным сортом пленчатого овса Конкур (Мишенькина, Захаров, 2017).

В настоящее время внимание многих российских селекционеров сосредоточено на создании сортов овса голозерного подвида, отличающихся улучшенными показателями качества зерна и устойчивости к грибным заболеваниям (Кабашов и др., 2018; Исачкова и др., 2019;

Batalova et al., 2019; Жуйкова и др., 2020). О достигнутых успехах селекции свидетельствует рост числа сортов голозерного овса, включенных в «Государственный реестр селекционных достижений...», который в 2020 г. насчитывал 121 сорт пленчатого и 15 сортов голозерного овса<sup>1</sup>. С 2010 г. в Госреестр включено 11 новых сортов голозерного подвида, что составляет 73.3 % от их общего числа.

Цель исследования – характеристика перспективных линий голозерного овса, выращенных на естественном фоне в Федеральном исследовательском центре (ФИЦ) «Немчиновка», по устойчивости к зараженности зерна грибами и содержанию фузариотоксинов.

## Материалы и методы

Материалом исследования в 2019 г. были 10 селекционных линий голозерного овса (*A. sativa* subsp. *nudisativa* (Husn.) Rod. et Sold.), а в 2020 г. – 13 линий, созданных в ФИЦ «Немчиновка». Кроме того, оценивали недавно выведенный в ФИЦ «Немчиновка» сорт голозерного овса Немчиновский 61 и в качестве контроля – сорт голозерного овса Вятский (Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого). В исследование также был включен сорт пленчатого овса Яков (ФИЦ «Немчиновка»), который является стандартом для Центрально-Черноземного региона, утвержденным Государственным реестром в 2012 г. (табл. 1).

**Условия выращивания селекционного материала.** В 2019–2020 гг. все образцы выращивали в питомнике «Конкурсное сортоиспытание» на полях ФИЦ «Немчиновка» в Московской области на делянках площадью 10 м<sup>2</sup> по предшественнику яровой ячмень, согласно «Методике государственного сортоиспытания...»<sup>2</sup>. Уборка урожая овса в годы исследований произведена в сроки достижения полной спелости зерна – 8 августа 2019 г. и 16 августа 2020 г. Погодные условия вегетационного периода различались в 2019 и 2020 гг. (табл. 2). Второй год исследований характеризовался повышенным температурным режимом в июне-августе по сравнению со среднепогодными значениями, а также превышением в 1.7–2.6 раза общего количества осадков в мае-июле по сравнению с этими месяцами в 2019 г.

**Анализ зараженности грибами зерна на питательной среде.** Для оценки зараженности грибами и выявления видового состава микобиоты поверхность зерен каждого образца стерилизовали 5 % гипохлоритом натрия, затем отмывали стерильной водой. В чашки Петри на поверхность картофельно-сахарозной агаризованной среды (КСА) раскладывали не менее 100 зерен каждого образца (Orina et al., 2018), инкубировали в темноте при 24 °С в термостате MIR-254 (Sanyo, Великобритания), через 7 сут проводили учет всхожести зерна, а также численности и видового разнообразия микобиоты.

Таксономическую принадлежность грибов определяли по сумме макро- и микроморфологических признаков с использованием определителей и специализированной

**Таблица 1.** Сорта и линии ярового овса, включенные в исследования

Линия/сорт	Родословная	Год анализа
57h2396/Азиль	Крестьянский местный × Залп	2019, 2020
2h2348	Крестьянский местный × Рысак	
16h2476	32h1962 × AC Lotta (к-14619)	
54h2476	32h1962 × AC Lotta (к-14619)	
2h2532	AC Baton (к-14803) × 53h2035	
52h2467	28h1827 × Abel (к-14638)	
50h2613	Залп × Bullion (к-14683)	
70h2613	15h1946 × Bullion (к-14683)	
55h2618	55h2106 × Pennline 2005 (к-14344)	
66h2618	55h2106 × Pennline 2005 (к-14344)	
4h2708	Вятский × Рысак	2020
16h2771	Крестьянский местный × 14h2255	
15h2657	119h2093 × 37h2273	
Немчиновский 61	Крестьянский местный × 15h1880	2019, 2020
Вятский (контроль)	Индивидуальный отбор из образца коллекции ВИР Adam (к-14253, Чехия) с последующим многократным отбором по признаку «пленчатость»	
Яков (стандарт)	Soroca (к-13243) × 36h1127	

литературы (Ellis, 1971; Gerlach, Nirenberg, 1982; Samson et al., 2002; Torp, Nirenberg, 2004).

Зараженность зерна грибами рассчитывали как процентное отношение числа зерен, из которых были выделены грибы определенной таксономической группы, к общему числу анализируемых зерен.

**Анализ ДНК *F. langsethiae* в зерне.** Зерно каждого образца (10 г) гомогенизировали в стерильных размольных стаканах на мельнице Tube Mill Control (КА, Германия) при 25000 об./мин в течение 30 с – для голозерных образцов и 45 с – для пленчатого. Выделение ДНК проводили из 200 мг полученной зерновой муки с помощью СТАВ-метода (Gagkaeva et al., 2013). Типовой штамм *F. langsethiae* из коллекции микроорганизмов лаборатории микологии и фитопатологии Всероссийского НИИ защиты растений культивировали на КСА, а затем из мицелия гриба выделяли ДНК, используя набор реагентов Genomic DNA Purification Kit (Thermo Fisher Scientific, Литва).

Концентрации полученной ДНК из муки и мицелия штаммов оценивали с помощью флуориметра Qubit 2.0 с набором реагентов Quant-iT dsDNA HS Assay Kit (Thermo Fisher Scientific, США) и выравняли до рабочих значений 20–60 нг/мкл.

Содержание в зерне ДНК *F. langsethiae* оценивали методом ПЦР в реальном времени с использованием видо-

<sup>1</sup> Государственный реестр селекционных достижений, допущенных к использованию. Т. 1. Сорта растений (по состоянию на 26 февраля 2020 г.) <https://gossortrf.ru/gosreestr/>.

<sup>2</sup> Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. Вып. 2. Зерновые, крупяные, зернобобовые, кукуруза и кормовые культуры. М., 1989.

**Таблица 2.** Погодные условия вегетационных сезонов 2019 и 2020 гг. в Одинцовском районе Московской области (метеостанция № 27515)

Месяц	Температура, °С			Средняя влажность, %	Общее кол-во осадков, мм	Кол-во дней с осадками
	средняя	min	max			
2019 г.						
Май	+16.1	+1.3	+28.5	59	50	16
Июнь	+19.6	+8.6	+31.3	57	60	11
Июль	+16.6	+8.3	+29.3	70	42	20
Август	+16.2	+6.8	+27.9	71	36	14
2020 г.						
Май	+11.5	+0.7	+24.1	68	124	24
Июнь	+19.1	+8.0	+30.5	68	100	14
Июль	+18.3	+9.1	+30.5	78	110	20
Август	+17.3	+8.6	+30.3	75	46	13

специфичных праймеров и пробы, меченной красителем Су5 и гасителем флуоресценции ВНQ-2 (Yli-Mattila et al., 2008).

Амплификацию проводили на приборе CFX 96 (Bio-Rad, США) согласно следующему протоколу: 1 × [95 °С, 3 мин]; 40 × [95 °С, 10 с; 60 °С, 10 с; 72 °С, 20 с]. Для каждого образца определяли количество пг ДНК грибов в зерне в отношении к количеству нг общей выделенной ДНК (пг/нг).

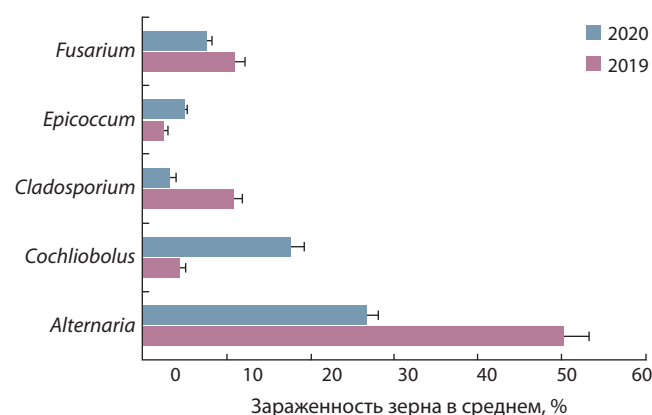
**Анализ микотоксинов.** Микотоксины из 1 г муки экстрагировали 5 мл водного раствора ацетонитрила (84:16 по объему) в течение 14–16 ч в условиях постоянного перемешивания. Суммарное количество Т-2 и НТ-2 токсинов в полученных экстрактах определяли с помощью непрямого конкурентного иммуоферментного анализа. Использовали сертифицированную тест-систему «Т-2 токсин – ИФА» (ВНИИ ветеринарной санитарии, гигиены и экологии, Россия) с нижним пределом определения микотоксинов 4 мкг/кг.

**Статистический анализ.** Анализы ДНК и микотоксинов грибов в зерне выполняли не менее двух раз. Для расчета средних значений, доверительного интервала, дисперсионного (ANOVA) и корреляционного (связь между количественными признаками оценивали с помощью коэффициента корреляции Пирсона, *r*) анализов использовали программы Microsoft Excel 2010, Minitab 17 и Statistica 10.0. Достоверность различий принимали при уровне значимости  $p < 0.05$ .

## Результаты

### Видовой состав грибов, выявленных в зерне овса

Микологический анализ показал, что основную долю в зерне образцов овса составляли виды родов *Alternaria* Nees, *Cochliobolus* Drechsler, *Cladosporium* Link, *Epicoccum* Link и *Fusarium*. Единично из зерна были выделены грибы родов *Acremonium* Link, *Arthrinium* Kunze, *Gliocladium* Corda, *Microdochium* Syd. & P. Syd., *Mucor* Fresen., *Nigrospora* Zimm., *Penicillium* Link, *Phoma* Sacc. и *Trichothecium* Link.

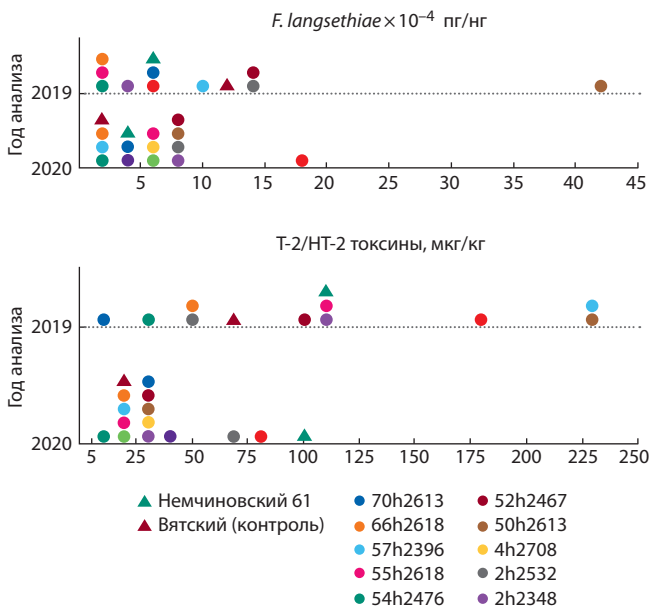


**Рис. 1.** Зараженность зерна овса грибами (ФИЦ «Немчиновка», Московская область, 2019–2020 гг.).

В оба года исследований грибы рода *Alternaria* были наиболее обильными представителями микобиоты зерна (рис. 1). Анализ морфологических признаков грибов *Alternaria* показал, что среди них основную долю составили виды, относящиеся к секции *Alternaria* (86 % в 2019 г. и 84 % в 2020 г.), остальные изоляты относились к видам секции *Infectoriae*.

Зараженность зерна грибами рода *Cochliobolus*, среди которых встречались виды *Bipolaris sorokiniana* Shoemaker, *Drechslera avenae* (Eidam) Sharif (*Pyrenophora avenae* Ito & Kurib) и др., в анализируемые годы различалась существенно. В 2019 г. зараженность зерна грибами *Cochliobolus* варьировала в диапазоне 1–13 %, а в 2020 г. – 6–33 %.

Средняя инфицированность зерна фузариевыми грибами по годам статистически не различалась. Зараженность зерна голозерных линий и сорта Немчиновский 61 варьировала от 5 до 17 % в 2019 г. и от 3 до 13 % в 2020 г. У пленчатого сорта Яков в 2019 и 2020 гг. этот показатель составил 26 и 17 % соответственно, а у сорта Вятский – 5 и 3 %. В оба года исследований только у двух линий, 54h2476 и 66h2618, зараженность зерна фузариевыми



**Рис. 2.** Содержание ДНК гриба *F. langsethiae* и Т-2/НТ-2 токсинов в зерне голозерных линий и сортов овса, выращенных в ФИЦ «Немчиновка».

грибами была ниже или соответствовала показателям контроля – голозерного сорта Вятский. В микобиоте овса идентифицировали девять видов рода *Fusarium*. Основными представителями фузариевых грибов были токсипродуцирующие *F. poae* и *F. langsethiae*. Их доли от общего числа выявленных грибов *Fusarium* составляли в 2019–2020 гг. для *F. poae* – 49–68 %, для *F. langsethiae* – 29–28 %.

### Содержание ДНК *F. langsethiae* и Т-2/НТ-2 токсинов в зерне

Максимальное количество ДНК *F. langsethiae* было в зерне пленчатого сорта Яков:  $71.9 \times 10^{-4}$  пг/нг в 2019 г. и  $27.9 \times 10^{-4}$  пг/нг в 2020 г. В зерне сорта Вятский содержание ДНК этого гриба было существенно ниже –  $11.0 \times 10^{-4}$  пг/нг в 2019 г. и  $1.2 \times 10^{-4}$  пг/нг в 2020 г. В 2019 г. только три селекционные линии, 2h2532, 52h2467 и 50h2613, содержали ДНК *F. langsethiae* в количествах выше, чем голозерный сорт Вятский, а в 2020 г. этот показатель был выше у всех селекционных линий (рис. 2).

Количество Т-2/НТ-2 токсинов было максимальным в зерне пленчатого сорта Яков – 1230 мкг/кг в 2019 г. и 790 мкг/кг в 2020 г. В зерне сорта Вятский эти микотоксины обнаружены в более низких количествах: 71 и 23 мкг/кг в 2019 г. и 2020 г. соответственно. Содержание Т-2/НТ-2 токсинов в зерне анализируемых генотипов варьировало в диапазонах 5–230 мкг/кг в 2019 г. и 10–100 мкг/кг в 2020 г. (см. рис. 2).

### Обсуждение

Микологический анализ показал, что зерно всех образцов овса было заражено грибами, однако численность и видовое разнообразие выявленных микроорганизмов варьировали в зависимости от анализируемого генотипа и года исследований.

Средние температуры воздуха в период вегетации овса в оба года исследований были сходными, однако количество осадков за четыре месяца вегетации в 2020 г. в 2 раза превышало количество осадков за аналогичный период в 2019 г. В результате существенно (в 4 раза) выросла средняя зараженность зерна грибами *Cochliobolus*, а зараженность грибами *Alternaria*, *Cladosporium* и *Fusarium*, наоборот, заметно уменьшилась: в 1.4–3.5 раза.

На фоне высокой инфицированности образцов урожая 2020 г. грибами *Cochliobolus* установлена отрицательная связь между зараженностью зерна этими грибами и грибами *Alternaria* ( $r = -0.56$  при  $p = 0.024$ ). Антагонистические взаимоотношения между представителями этих двух родов, обитающих на зерновых культурах, были показаны ранее (Казакова и др., 2016; Gannibal, 2018; Орина и др., 2020). Вероятно, в условиях избыточного увлажнения преимущество получают грибы *Cochliobolus*, которые оказываются конкурентоспособнее по сравнению с грибами *Alternaria* и *Fusarium*.

Выявлена достоверная положительная связь между зараженностью зерна грибами *Alternaria* и *Fusarium* ( $r = 0.64$  при  $p = 0.019$ ), а также *Epicoccum* и *Fusarium* ( $r = 0.57$  при  $p = 0.043$ ) образцов урожая 2019 г. Симбиотический характер взаимоотношений между грибами *Alternaria* и *Fusarium*, в том числе в зерне овса, установлен неоднократно (Kosiak et al., 2004; Orina et al., 2017; Каракотов и др., 2019).

Основные доли среди грибов рода *Fusarium*, выделенных из анализируемых образцов, занимали виды *F. poae* и *F. langsethiae*. Гриб *F. poae* образует ниваленол и диацетоксисцирпенол, *F. langsethiae* – Т-2/НТ-2 токсины и также диацетоксисцирпенол. Содержание Т-2 токсина регламентируется в зерне овса, кормах и продуктах на его основе и не должно превышать 100 мкг/кг<sup>3, 4</sup>.

Относительно невысокая зараженность зерна *F. langsethiae* (максимально 14 % в 2019 г. и 5 % в 2020 г.) приводит к существенному накоплению микотоксинов в зерне восприимчивых генотипов. Поэтому селекционный материал мы оценивали с точки зрения накопления в зерне ДНК *F. langsethiae* и суммарного количества Т-2/НТ-2 токсинов.

Максимальная зараженность *F. langsethiae*, количество ДНК гриба и Т-2/НТ-2 токсинов обнаружено в зерне пленчатого сорта Яков, по сравнению с которым все голозерные линии и сорта содержали значительно меньше ДНК гриба и микотоксинов. Корреляционный анализ показал достоверную положительную связь между содержанием ДНК *F. langsethiae* и количествами Т-2/НТ-2 токсинов в зерне голозерных образцов ( $r = 0.54$  при  $p = 0.069$  в 2019 г. и  $r = 0.51$  при  $p = 0.054$  в 2020 г.).

В результате нашего исследования установлены существенные различия по содержанию ДНК *F. langsethiae* в зерне анализируемых линий и сортов овса, но при этом ни один из генотипов не избежал загрязнения зерна Т-2/НТ-2 токсинами. Эти данные еще раз подчеркивают, что оценку устойчивости к фузариозу зерна необходимо

<sup>3</sup> Технический регламент Таможенного союза 015/2011 «О безопасности зерна» с изменениями на 15 сентября 2017 г. Приложение № 2.

<sup>4</sup> Технический регламент Таможенного союза 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» с изменениями от 8 августа 2019 г. Приложение № 3.

проводить по нескольким параметрам, отражающим различные типы устойчивости.

Высказано предположение, что тип V устойчивости овса к фузариозу зависит от вида микотоксина, а локусы количественных признаков, связанные с низким уровнем накопления дезоксиниваленола (ДОН) (He et al., 2013; Martín et al., 2018), вероятно, не будут обеспечивать устойчивость генотипов к другим микотоксинам. Однако наши собственные данные (Gagkaeva et al., 2013) и результаты коллег, изучавших те же генотипы, VIR-7766 (Hautsalo et al., 2021), сорта Аргамак (Willforss et al., 2020) и Вятский (Chrpová et al., 2020), показали их относительную высокую устойчивость к накоплению разных микотоксинов (Т-2/НТ-2 токсины и ДОН), независимо от условий экспериментов.

При равных условиях ключевую роль в устойчивости селекционного материала к фузариозу играет генетическая основа созданных линий. Установлено, что две голозерные линии, имеющие в родословной сорт Залп, в первый год исследования отличались более высоким содержанием микотоксинов и ДНК грибов, чем другие анализируемые генотипы овса. По всей видимости, скрещивание с этим сортом увеличивает восприимчивость к фузариозу зерна.

## Заключение

Созданные в ведущем селекционном центре России ФИЦ «Немчиновка» перспективные голозерные линии овса охарактеризовали по сумме признаков, отражающих различные типы устойчивости к фузариозу зерна: количеству ДНК *F. langsethiae* и образующих этим грибом Т-2/НТ-2 токсинов. На основании результатов, полученных в 2019–2020 гг., две линии голозерного овса, 54h2476 и 66h2618, можно охарактеризовать как высокоустойчивые к заражению *F. langsethiae* и контаминации Т-2/НТ-2 токсинами, поскольку их показатели ниже или соответствуют таковым устойчивого к фузариозу зерна сорта Вятский – контроля в условиях эксперимента. Эти линии – наиболее перспективные генотипы для создания новых, безопасных с микотоксикологической точки зрения, сортов. Следует также отметить новый сорт Азиль (линия 57h2396 в 2019 г.), который проявил относительно высокую устойчивость к фузариозу зерна в оба года исследований.

## Список литературы / References

Буркин А.А., Кононенко Г.П., Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю. Микотоксикологическое обследование зерна овса и продуктов его переработки. В: Современная микология в России. Т. 5. Матер. III Междунар. микол. форума. 14–15 апреля 2015 г. М., 2015; 221–223.  
[Burkin A.A., Kononenko G.P., Gavrilo O.P., Gagkaeva T.Yu. Mycotoxicological examination of oat grain and products of its processing. In: Current Mycology in Russia. Vol. 5. Proc. III Int. Mycol. Forum, 14–15 Apr. 2015. Moscow, 2015; 221–223. (in Russian)]  
Варгач Ю.И., Головин С.Е., Лоскутов И.Г. Изучение микромитозов на овсе посевном (*Avena sativa* L.) в условиях Ступинского района Московской области. Труды по прикл. ботанике, генетике и селекции. 2019;180(3):96–105. DOI 10.30901/2227-8834-2019-3-96-105.  
[Vargach Yu.I., Golovin S.E., Loskutov I.G. Research on micromycetes in oats (*Avena sativa* L.) under the conditions of Stupino district, Moscow province. Trudy po Prikladnoy Botanike, Genetike i

Seleksii = Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding. 2019;180(3):96–105. DOI 10.30901/2227-8834-2019-3-96-105. (in Russian)]

Гагкаева Т.Ю., Гаврилова О.П., Лоскутов И.Г., Блинова Е.В., Аникина Л.В. Характеристика образцов овса по устойчивости к фузариозу. В: Каталог мировой коллекции ВИР. Вып. 808. СПб.: ВИР, 2012.

[Gagkaeva T.Yu., Gavrilo O.P., Loskutov I.G., Blinova E.V., Anikina L.V. Evaluation of oat accessions from the VIR collection for Fusarium head blight resistance. In: Catalogue of World VIR Collection. Vol. 808. St. Petersburg, 2012. (in Russian)]

Жуйкова О.А., Баталова Г.А. Анализ проявления основных болезней сортов овса пленчатого питомника конкурсного испытания ФАНЦ Северо-Востока. В: Матер. V Междунар. науч.-практ. конф. «Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве». 1–5 апреля 2019 г. Киров, 2019; 21–24.

[Zhuikova O.A., Batalova G.A. Analysis of the main diseases of hulled oat varieties in the nursery for competitive trials of the Federal Agrarian Center of the Northeast. In: Int. Conf. “Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Industry”. Apr. 1–5, 2019. Kirov, Russia. Kirov, 2019; 21–24. (in Russian)]

Жуйкова О.А., Градобоева Т.П., Баталова Г.А. Эффективность инфекционных фонов при оценке овса на устойчивость к грибным болезням. Рос. с.-х. наука. 2020;(3):10–13. DOI 10.31857/S2500262720030035.

[Zhuikova O.A., Gradoboeva T.P., Batalova G.A. Effectiveness of infectious backgrounds in evaluating oat for resistance to fungal diseases. Rossiiskaya Sel'skokhozyaistvennaya Nauka = Russian Agricultural Sciences. 2020;(3):10–13. DOI 10.31857/S25002627 20030035. (in Russian)]

Исачкова О.А., Ганичев Б.Л., Логинова А.О. Устойчивость голозерного овса к головневым грибам в Западной Сибири. Сиб. вестн. с.-х. науки. 2019;49(3):55–61. DOI 10.26898/0370-8799-2019-3-7.  
[Isachkova O.A., Ganichev B.L., Loginova A.O. Resistance of hull-less oats to smut fungi in Western Siberia. Sibirskiy Vestnik Sel'skokhozyaistvennoy Nauki = Siberian Herald of Agricultural Science. 2019;49(3):55–61. DOI 10.26898/0370-8799-2019-3-7. (in Russian)]

Кабашов А.Д., Колупаева А.С., Лейбович Я.Г., Разумовская Л.Г., Филоненко З.В. Предварительные итоги селекции голозерного овса. Селекция, семеноводство и генетика. 2018;4(4):20–24. DOI 10.24411/2413-4112-2018-10003.

[Kabashov A.D., Kolupaeva A.S., Leibovich Ya.G., Razumovskaya L.G., Filonenko Z.V. Preliminary results of hull-less oats breeding. Seleksiya, Semenovodstvo i Genetika = Breeding, Seed Production and Genetics. 2018;4(4):20–24. DOI 10.24411/2413-4112-2018-10003. (in Russian)]

Казакова О.А., Торопова Е.Ю., Воробьева И.Г. Взаимоотношения фитопатогенов семян ячменя в Западной Сибири. АПК России. 2016;23(5):931–934.

[Kazakova O.A., Toropova E.Yu., Vorobyeva I.G. The interrelations between phytopathogens of barley seeds in Western Siberia. APK Rossii = Agro-Industrial Complex of Russia. 2016;23(5):931–934. (in Russian)]

Каракотов С.Д., Аршава Н.В., Башкатова М.Б. Мониторинг и контроль заболеваний пшеницы в Южном Зауралье. Защита и карантин растений. 2019;(7):18–25.

[Karakotov S.D., Arshava N.V., Bashkatova M.B. Monitoring and control of wheat diseases in the Southern Trans-Urals. Zashchita i Karantin Rasteniy = Plant Protection and Quarantine. 2019;(7): 18–25. (in Russian)]

Культурная флора. Т. 2. Ч. 3. Овес. Под ред. В.Д. Кобылянского, В.Н. Солдатова. М.: Колос, 1994.

[Kobylyansky V.D., Soldatov V.N. (Eds.). Flora of Cultivated Plants. Vol. 2. Part 3. Oats. Moscow: Kolos Publ., 1994. (in Russian)]

Лоскутов И.Г., Блинова Е.В., Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю. Разнообразие культурного овса по хозяйственно ценным признакам и их связь с устойчивостью к фузариозу. Вавиловский журнал генетики и селекции. 2016;20(3):286–294. DOI 10.18699/VJ16.151.

- [Loskutov I.G., Blinova E.V., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu. The valuable characteristics of oats genotypes and resistance to *Fusarium* disease. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2016;20(3):286-294. DOI 10.18699/VJ16.151. (in Russian)]
- Мишенькина О.Г., Захаров В.Г. Новые высокопродуктивные ценные по качеству сорта овса для производства безопасных продуктов питания. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2017;(4):91-95.
- [Mishen'kina O.G., Zakharov V.G. New high-productive, valuable for the quality of the oats varieties for safe food products manufacturing. *Zernobobovye i Krupyanye Kul'tury = Legumes and Groat Crops*. 2017;(4):91-95. (in Russian)]
- Орина А.С., Гаврилова О.П., Гагкаева Т.Ю., Ганнибал Ф.Б. Микромитозы *Alternaria* spp. и *Bipolaris sorokiniana* и микотоксины в зерне, выращенном в Уральском федеральном округе. *Микология и фитопатология*. 2020;54(5):365-377. DOI 10.31857/S0026364820050086.
- [Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Gannibal Ph.B. Micro-mycetes *Alternaria* spp. and *Bipolaris sorokiniana* and mycotoxins in the grain from the Ural region. *Mikologiya i Fitopatologiya = Mycology and Phytopathology*. 2020;54(5):365-377. DOI 10.31857/S0026364820050086. (in Russian)]
- Batalova G.A., Loskutov I.G., Shevchenko S.N., Zhuikova O.A., Krotova N.V., Tulyakova M.V. On breeding of naked oat cultivar Virovets. *Russ. Agric. Sci.* 2019;45(5):412-415. DOI 10.3103/S1068367419050033.
- Bjornstad Å., He X., Tekle S., Klos K., Huang H.F., Tinker N.A., Helge D. Genetic variation and associations involving *Fusarium* head blight and deoxynivalenol accumulation in cultivated oat (*Avena sativa* L.). *Plant Breed.* 2017;136:1-17. DOI 10.1111/pbr.12502.
- Boutigny A.-L., Richard-Forget F., Barreau C. Natural mechanisms for cereal resistance to the accumulation of *Fusarium* trichothecenes. *Eur. J. Plant Pathol.* 2008;121:411-423. DOI 10.1007/s10658-007-9266-x.
- Chrpová J., Palicová J., Štěrbová L., Trávníčková M., Dumalášová V., Chourová M. Resistance against *Fusarium* head blight in oats. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2020;107(1):49-54. DOI 10.13080/z-a.2020.107.007.
- De Colli L., De Ruyck K., Abdallah M.F., Finnan J., Mullins E., Kildea S., Spink J., Elliott C., Danaher M. Natural co-occurrence of multiple mycotoxins in unprocessed oats grown in Ireland with various production systems. *Toxins*. 2021;13(3):188. DOI 10.3390/toxins13030188.
- Divon H.H., Razzaghian J., Udnes-Aamot H., Klemsdal S.S. *Fusarium langsethiae* (Torp and Nirenberg), investigation of alternative infection routes in oat. *Eur. J. Plant Pathol.* 2012;132:147-161. DOI 10.1007/s10658-011-9858-3.
- Ellis M.B. Dematiaceous Hyphomycetes. Kew, 1971.
- Foroud N.A., Baines D., Gagkaeva T.Yu., Thakor N., Badea A., Steiner B., Bürstmayr M., Bürstmayr H. Trichothecenes in cereal grains – an update. *Toxins*. 2019;11(11):634. DOI 10.3390/toxins11110634.
- 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;167(2):276-283. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2013.06.026.
- Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P., Orina A.S., Blinova E.V., Loskutov I.G. Response of wild *Avena* species to fungal infection of grain. *Crop J.* 2017;5(6):499-508. DOI 10.1016/j.cj.2017.04.005.
- Gagkaeva T.Yu., Gavrilova O.P., Yli-Mattila T., Loskutov I.G. The sources of resistance to *Fusarium* head blight in VIR oat collection. *Euphytica*. 2013;191(3):355-364. DOI 10.1007/s10681-013-0865-7.
- Gannibal Ph.B. Factors affecting *Alternaria* appearance in grains in European Russia. *Agricultural Biology (Sel'skokhozyaistvennaya Biologia)*. 2018;53(3):605-615. DOI 10.15389/agrobiol.2018.3.605eng.
- Gavrilova O.P., Gannibal Ph.B., Gagkaeva T.Yu. *Fusarium* and *Alternaria* fungi in grain of oats grown in the North-Western Russia regarding cultivar specificity. *Agricultural Biology (Sel'skokhozyaistvennaya Biologia)*. 2016;51(1):111-118. DOI 10.15389/agrobiol.2016.1.111eng.
- Gerlach W., Nirenberg H.I. The Genus *Fusarium* – a Pictorial Atlas. Berlin, 1982.
- Hautsalo J., Jauhainen L., Hannukkala A., Manninen O., Veteläinen M., Pietilä L., Peltoniemi K., Jalli M. Resistance to *Fusarium* head blight in oats based on analyses of multiple field and greenhouse studies. *Eur. J. Plant Pathol.* 2020;158:15-33. DOI 10.1007/s10658-020-02039-0.
- Hautsalo J., Latvala S., Manninen O., Haapalainen M., Hannukkala A., Jalli M. Two oat genotypes with different field resistance to *Fusarium* head blight respond similarly to the infection at spikelet level. *J. Plant Pathol.* 2021;103:299-304. DOI 10.1007/s42161-020-00670-8.
- He X., Skinnes H., Oliver R.E., Jackson E.W., Bjornstad Å. Linkage mapping and identification of QTL affecting deoxynivalenol (DON) content (*Fusarium* resistance) in oats (*Avena sativa* L.). *Theor. Appl. Genet.* 2013;126:2655-2670. DOI 10.1007/s00122-013-2163-0.
- Hofgaard I.S., Aamot H.U., Torp T., Jestoi M., Lattanzio V.M.T., Klemsdal S.S., Waalwijk C., Van der Lee T., Brodal G. Associations between *Fusarium* species and mycotoxins in oat and spring wheat from farmers' fields in Norway over a six-year period. *World Mycotoxin J.* 2016;9:365-378. DOI 10.3389/fmicb.2016.00556.
- Imathiu S.M., Ray R.V., Back M.I., Hare M.C., Edwards S.G. A survey investigating the infection of *Fusarium langsethiae* and production of HT-2 and T-2 mycotoxins in UK oat fields. *J. Phytopathol.* 2013;161(7-8):553-561. DOI 10.1111/jph.12105.
- Isidro-Sánchez J., D'Arcy Cusack K., Verheecke-Vaessen C., Kahla A., Bekele W., Doohan F., Magan N., Medina A. Genome-wide association mapping of *Fusarium langsethiae* infection and mycotoxin accumulation in oat (*Avena sativa* L.). *Plant Genome*. 2020;13(2):e20023. DOI 10.1002/tpg2.20023.
- Kononenko G.P., Burkin A.A., Zotova Ye.V. Mycotoxilogical monitoring. Part 2. Wheat, barley, oat and maize grain. *Vet. Microbiol.* 2020;2(33):139-145. DOI 10.29326/2304-196X-2020-2-33-139-145.
- Kosiak B., Torp M., Skjerve E., Andersen B. *Alternaria* and *Fusarium* in Norwegian grains of reduced quality – a matched pair sample study. *Int. J. Food Microbiol.* 2004;93(1):51-62. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2003.10.006.
- Kurowski T.P., Wysocka U. Fungal communities colonizing grain of hulled and naked oat grown under organic farming system. *Phytopathologia*. 2009;54:53-59.
- Loskutov I.G., Shelenga T.V., Konarev A.V., Vargach Yu.I., Porokhvinova E.A., Blinova E.V., Gnuitikov A.A., Rodionov A.V. Modern approach of structuring the variety diversity of the naked and covered forms of cultural oats (*Avena sativa* L.). *Ecol. Genet.* 2020;18(1):27-41. DOI 10.17816/ecogen12977.
- Martin C., Schöneberg T., Vogelgsang S., Mendes Ferreira C.S., Morisoli R., Bertossa M., Bucheli T., Mauch-Mani B., Mascher F. Responses of oat grains to *Fusarium poae* and *F. langsethiae* infections and mycotoxin contaminations. *Toxins*. 2018;10:47. DOI 10.3390/toxins10010047.
- Martinelli J.A., Chaves M.S., Graichen F.A.S., Federizzi L.C., Dresch L.F. Impact of *Fusarium* head blight in reducing the weight of oat grains. *J. Agric. Sci.* 2014;6(5):188-198. DOI 10.5539/jas.v6n5p188.
- Mesterhazy A., Bartok T., Kaszonyi G., Varga M., Toth M., Varga J. Common resistance to different *Fusarium* spp. causing *Fusarium* head blight in wheat. *Eur. J. Plant Pathol.* 2005;112:267-281. DOI 10.1007/s10658-005-2853-9.
- Opoku N., Back M., Edwards S.G. Development of *Fusarium langsethiae* in commercial cereal production. *Eur. J. Plant Pathol.* 2013;136:159-170. DOI 10.1007/s10658-012-0151-x.
- Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu. Adaptation of the quantitative PCR method for the detection of the main representatives of ce-

- real grain mycobiota. *MIR J.* 2018;5(1):78-83. DOI 10.18527/2500-2236-2018-5-1-78-83.
- Orina A.S., Gavrilova O.P., Gagkaeva T.Yu., Loskutov I.G. Symbiotic relationships between aggressive *Fusarium* and *Alternaria* fungi colonizing oat grain. *Agricultural Biology (Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya)*. 2017;52(5):986-994. DOI 10.15389/agrobiology.2017.5.986eng.
- Samson R.A., Hoekstra E.S., Frisvad J.C., Filtenborg O. Introduction to Food- and Airborne Fungi. Utrecht, 2002.
- Schöneberg T., Jenny E., Wettstein F.E., Bucheli T.D., Mascher F., Bertossa M., Musa T., Seifert K., Gräfenhan T., Keller B., Vogelgsang S. Occurrence of *Fusarium* species and mycotoxins in Swiss oats – impact of cropping factors. *Eur. J. Agron.* 2018;92:123-132. DOI 10.1016/j.eja.2017.09.004.
- Tekauz A.B., Mitchell Fetch J.W., Rossnagel B.G., Savard M.E. Progress in assessing the impact of *Fusarium* head blight on oat in western Canada and screening of avena germplasm for resistance. *Cereal Res. Commun.* 2008;36(8):49-56. DOI 10.1556/CRC.36.2008.Suppl.B.8.
- Tekle S., Dill-Macky R., Skinnes H., Tronsmo A.M., Bjørnstad Å. Infection process of *Fusarium graminearum* in oats (*Avena sativa* L.). *Eur. J. Plant Pathol.* 2012;132:431-442. DOI 10.1007/s10658-011-9888-x.
- Tekle S., Lillemo M., Skinnes H., Reitan L., Buraas T., Bjørnstad Å. Screening of oat accessions for *Fusarium* head blight resistance using spawn-inoculated field experiments. *Crop Sci.* 2018;58:143-151. DOI 10.2135/cropsci2017.04.0264.
- Torp M., Nirenberg H.I. *Fusarium langsethiae* sp. nov. on cereals in Europe. *Int. J. Food Microbiol.* 2004;95:247-256. DOI 10.1016/j.ijfoodmicro.2003.12.014.
- Willforss J., Leonova S., Tillander J., Andreasson E., Marttila S., Olsson O., Chawade A., Levander F. Interactive proteogenomic exploration of response to *Fusarium* head blight in oat varieties with different resistance. *J. Proteomics.* 2020;218:103688. DOI 10.1016/j.jprot.2020.103688.
- Yan W., Fregeau-Reid J., Rioux S., Pageau D., Xue A., Martin R., Fedak G., de Haan B., Lajeunesse J., Savard M. Response of oat genotypes to *Fusarium* head blight in Eastern Canada. *Crop Sci.* 2010; 50:134-142. DOI 10.2135/cropsci2009.03.0129.
- Yli-Mattila T., Paavanen-Huhtala S., Jestoi M., Parikka P., Hietaniemi V., Gagkaeva T., Sarlin T., Haikara A., Laaksonen S., Rizzo A. Real-time PCR detection and quantification of *Fusarium poae*, *F. graminearum*, *F. sporotrichioides* and *F. langsethiae* in cereal grains in Finland and Russia. *Arch. Phytopathol. Plant Protect.* 2008;41(4):243-260. DOI 10.1080/03235400600680659.

#### ORCID ID

O.P. Gavrilova orcid.org/0000-0002-5350-3221  
T.Yu. Gagkaeva orcid.org/0000-0002-3276-561X  
A.S. Orina orcid.org/0000-0002-7657-6618  
A.S. Markova orcid.org/0000-0002-2528-1422  
A.D. Kabashov orcid.org/0000-0002-7450-3845  
I.G. Loskutov orcid.org/0000-0002-9250-7225

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 19-76-30005).

Авторы благодарят к.м.н. А.А. Буркина (Всероссийский НИИ ветеринарной санитарии, гигиены и экологии – филиал «ФНЦ Всероссийский НИИ экспериментальной ветеринарии им. К.И. Скрябина и Я.П. Коваленко РАН», Москва, Россия) за помощь в анализе микотоксинов.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.06.2021. После доработки 20.09.2021. Принята к публикации 21.09.2021.