


doi 10.18699/vjgb-26-64

Создание тритикале с фиолетовой окраской зерна

Н.В. Петраш ^{1, 2} , П.И. Стёпочкин ^{1, 2}¹ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия² Сибирский научно-исследовательский институт растениеводства и селекции – филиал Федерального исследовательского центра Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, р. п. Краснообск, Новосибирская область, Россия pnv11@bionet.nsc.ru

Аннотация. Зерна злаковых культур с фиолетовой окраской отличаются высокой антиоксидантной активностью благодаря содержанию антоцианов в оболочке и представляют интерес для производства полезных продуктов питания. Однако у тритикале пока не выведены формы с богатой антоцианами фиолетовой окраской зерна. Цель настоящей работы – получение с использованием маркер-вспомогательной селекции новых форм пшенично-ржаных амфиплоидов с фиолетовой окраской зерна и сравнительная оценка их по содержанию антоцианов и показателям продуктивности. Определение генотипа гибридов тритикале Садко (\times *Triticosecale* Wittmack) с фиолетовозерной линией полбы 27-3/17 (*T. dicoccum* (Schrang) Schuebl.) проводили с применением молекулярных ДНК-маркеров. У всех гибридов F₃, имеющих фиолетовую окраску зерна, установлено наличие двух комплементарно действующих доминантных генов, *Pp3* и *Pp-B1*, отвечающих за повышенное содержание антоцианов в зерне. В последующих поколениях растения пшенично-ржаных амфиплоидов имели фиолетовую окраску зерна. Общее содержание антоцианов в цельнозерновой муке гибридов варьировало от 36 до 529.3 мкг/г. Высокое содержание определено у образца 2-1-6-6 (529.3 мкг/г). На уровне контроля (полба – 382.6 мкг/г) были образцы 2-1-1-4е, 2-1-5-10а и 2-1-6-4б. Растения гибридов F₅₋₆ обладали типичным фенотипом гексаплоидных тритикале. По длине колоса и количеству колосков превышали показатели полбы. Число зерен колоса у гибридов было меньше, чем у контроля тритикале Садко, и достигло в среднем 28.0 и 34.4 шт. в 2024 и 2025 гг. соответственно. Масса 1000 зерен фиолетовозерных семей тритикале в 2025 г. была на уровне материнской формы Садко и составила в среднем 47.6 г. Средняя урожайность с единицы площади у гибридов (470 г/м²) в 2025 г. была выше, чем у полбы (306 г/м²), но ниже, чем у Садко (584 г/м²). Таким образом, получен селекционный материал фиолетовозерных форм тритикале, по ряду признаков схожий с материнской формой тритикале Садко, но отличающийся от отцовской формы полбы – донора фиолетовой окраски зерна.

Ключевые слова: тритикале; фиолетовая окраска зерна; маркер-вспомогательная селекция; антоцианы

Для цитирования: Петраш Н.В., Стёпочкин П.И. Создание тритикале с фиолетовой окраской зерна. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2026;30(4):636-644. doi 10.18699/vjgb-26-64

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ № 25-26-20153 и Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (№ 30-2025-000980 от 21.05.2025).

Благодарности. Размножение гибридов проводилось в Центре коллективного пользования репродукции растений ИЦиГ СО РАН при поддержке бюджетного проекта FWNR-2026-0033.

Development of purple-grain triticale

N.V. Petrash ^{1, 2} , P.I. Stepochkin ^{1, 2}¹ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia² Siberian Research Institute of Plant Production and Breeding – Branch of the Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia pnv11@bionet.nsc.ru

Abstract. Purple-colored grains of cereal crops are characterized by high antioxidant activity. Anthocyanins, polyphenolic compounds found in the pericarp of their grains, have beneficial effects on human health. However, triticale has not yet developed forms with anthocyanin-rich purple grain color. The aim of this work was to obtain new forms of wheat-rye amphiploids with purple grain color using marker-assisted breeding and to compare their anthocyanin content and productivity indicators. Molecular DNA markers were used to determine the genotype of hybrids produced by triticale Sadko (\times *Triticosecale* Wittmack) and a purple-colored emmer wheat line 27-3/17 (*T. dicoccum* (Schrang) Schuebl.). Purple-colored F₃ hybrids carried two complementary dominant genes *Pp3* and *Pp-B1* in a homozygous state responsible for the high content of anthocyanins in the grain. In subsequent generations, the wheat-rye amphiploids had a purple grain color. The total anthocyanin content in the whole grain flour of the hybrids ranged from 36 to 529.3 μ g/g. The high content was recorded in sample 2-1-6-6 (529.3 μ g/g). Samples 2-1-1-4e, 2-1-5-10a and 2-1-6-4b were at the control level (emmer wheat – 382.6 μ g/g). The F₅₋₆ hybrid plants had a typical hexaploid triticale phenotype. The spike length and the number of spikelets exceeded those of emmer wheat. The number of spike grains in the hybrids was less than that in the Sadko triticale averaging at 28.0 and 34.4 in 2024 and 2025, respectively. 1,000 grain weight of purple-grained triticale families in 2025 was comparable to the Sadko maternal form and averaged 47.6 g. The yield per unit area of hybrid families (470 g/m²)

in 2025 was higher than that of emmer wheat (306 g/m²), but lower than that of Sadko (584 g/m²). Thus, the breeding material of purple-grained triticale forms was obtained, which in a number of ways is similar to the triticale Sadko maternal form, but differs from the paternal form of the purple grain donor emmer wheat.

Key words: triticale; purple grain color; marker-assisted selection; anthocyanin

For citation: Petrash N.V., Stepochkin P.I. Development of purple-grain triticale. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed.* 2026;30(4):636-644. doi 10.18699/vjgb-26-64

Введение

Искусственный аллополиплоид тритикале (\times *Triticosecale* Wittmack), созданный путем объединения геномов пшеницы (*Triticum* sp.) и ржи (*Secale* sp.), как вид существует менее 150 лет. Первые фертильные октаплоидные ($2n = 8x = 56$) растения получены в 1888 г. немецким исследователем Римпай (Muntzing, 1974). Они имели три удвоенных генома мягкой пшеницы (ВВА^uА^uDD) и один удвоенный геном ржи (RR). У первичных октаплоидных тритикале из-за их цитогенетической нестабильности часто наблюдаются нарушения в мейозе, вследствие чего в потомстве появляются анеуплоидные растения с меньшим числом хромосом (Silkova et al., 2021). Доля таких растений в популяции может достигать 70 % (Стёпочкин, Владимиров, 1978). В потомствах анеуплоидных растений часто возникают дивергентные формы гексаплоидных (6x) тритикале (Kalinka, Achrem, 2018). Они более продуктивны и цитогенетически стабильны, чем октаплоидные. Этим обстоятельством объясняется тот факт, что сорта тритикале в большинстве случаев являются гексаплоидными.

Наряду с высоким потенциалом урожайности и хорошим качеством зерна тритикале обладает устойчивостью ко многим заболеваниям и неблагоприятным условиям среды, что делает эту культуру перспективной в аграрном производстве. За последние десятилетия производство тритикале в мире постепенно увеличивалось и ежегодно составляло более 10 млн тонн (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>). Крупнейшими производителями являются Польша, Беларусь, Германия, Россия и Франция (Hamid et al., 2024).

Тритикале широко используется на пищевые и кормовые цели, кроме того, в производстве биотоплива, спирта, а также в пивоварении (Cantale et al., 2016; Миронцева и др., 2018; Zhu, 2018; Gaviley et al., 2024; Latini et al., 2024). Зерно тритикале имеет более высокую биологическую ценность, чем пшеница и рожь. Благодаря высокой концентрации лизина, улучшенной усвояемости белка и сбалансированному содержанию минералов его используют в качестве оздоровительного питания в рационе людей и животных (Kamanova et al., 2023). Тритикале подходит также для производства высококачественной муки для хлебопекарной и кондитерской промышленности, в том числе для изготовления диетического хлеба и сухих завтраков (Leonova et al., 2022).

Несмотря на многие положительные свойства, тритикале по-прежнему востребовано недостаточно и потребляется в гораздо меньшем количестве, чем другие основные злаки. Это связано, в первую очередь, с морщинистостью зерна, цветом муки и специфическими вкусовыми

характеристиками. Селекционеры постоянно работают над улучшением показателей зерна тритикале и создают гладкозерные сорта с качеством муки, не уступающим пшеничной (Camerlengo, Kiszonas, 2023). Следует заметить, что генетическое разнообразие тритикале невелико, это подтверждается результатами исследований, полученными на основе молекулярных данных (Niedziela et al., 2016; Losert et al., 2017) и определяется генофондом исходных видов пшеницы и ржи. Поэтому важно расширять разнообразие генов тритикале с привлечением доноров новых признаков.

В современном мире у потребителя возникает стремление к более здоровому питанию, в связи с чем появляется необходимость поиска альтернативных решений в отношении зерновых культур, используемых в питании человека и животных. Злаки с голубой, фиолетовой и черной окраской зерна с повышенным содержанием антоцианов имеют улучшенные функциональные и питательные свойства и привлекают все большее внимание исследователей (Sharma S. et al., 2018; Юдина и др., 2021; Loskutov, Khlestkina, 2021). Антоцианы представляют собой группу водорастворимых полифенольных соединений, оказывающих положительное влияние на здоровье человека благодаря своим противовоспалительным, противодиабетическим, противораковым и антибактериальным свойствам (Zhu, 2018; Francavilla, Joye, 2020; Gard et al., 2022).

Известно, что фиолетовая окраска зерна обусловлена синтезом и накоплением антоцианов в перикарпе зерновки. Этот процесс запускается в результате комплементарного взаимодействия двух ключевых генов, *Pp3* и *Pp-1* (Khlestkina, 2013). Ген *Pp3* передан от *T. aethiopicum* Jakubz. в хромосому 2А пшеницы, а ген *Pp-1* локализован в коротких плечах 7-й гомеологической группы хромосом и контролирует окраску колотиля и других органов растений (Khlestkina, 2013; Shoeva et al., 2014; Khlestkina et al., 2015).

В настоящее время в нашей стране активно ведутся работы по созданию исходного селекционного материала с окрашенным зерном на пшенице (Хлесткина и др., 2017; Василова и др., 2021; Рубец и др., 2022; Shamanin et al., 2022; Гордеева и др., 2024; Чуманова и др., 2025), ячмене (Kukoeva et al., 2024) и тритикале (Петраш, Стёпочкин, 2023). В государственном реестре селекционных достижений зарегистрировано несколько сортов мягкой фиолетовозерной пшеницы: Надира, Памяти Коновалова, Эф 22 (<https://gossortrf.ru>).

Создание тритикале с повышенным содержанием антоцианов в зерне определит новый потенциал развития этой культуры как продукта для здорового, сбалансированного

и функционального питания человека и животных. На сегодняшний день не зарегистрировано сортов тритикале с фиолетовой окраской зерна. Донорами этого признака могут быть фиолетовозерные формы и линии пшеницы и полбы. Однако вследствие гибридизации фиолетовозерной мягкой пшеницы (геномная формула ВВААDD) с гексаплоидным тритикале (геномная формула ВВАARR) есть риск полной или частичной потери хромосом генома R в результате процесса диплоидизации в потомстве гибрида. В итоге могут возникнуть бх формы с неполным набором хромосом ржи, что и наблюдается у гибридов тритикале с мягкой яровой пшеницей в ряде поколений (Badaev et al., 1985).

Скрещиванием фиолетовозерной мягкой пшеницы с рожью можно создать гаплоидные стерильные гибриды, которые необходимо обрабатывать колхицином для удвоения числа хромосом и получения фиолетовозерных октаплоидных пшенично-ржаных амфиплоидов. Их, в свою очередь, необходимо скрещивать с гексаплоидными формами тритикале, чтобы в дальнейшем в потомстве отбирать бх амфиплоиды с фиолетовой окраской зерна. Пример успешного получения новых форм тритикале гексаплоидного уровня в скрещиваниях 28-хромосомной полбы (*T. dicoccum* (Schrank) Schuebl.) с тритикале (Silkova et al., 2023) инициировал работы по созданию фиолетовозерной тритикале в скрещивании с полученной ранее полбой 27-3/17, отличающейся высоким содержанием антоцианов в зерне (Стёпочкин и др., 2023).

Целью нашей работы стало получение с использованием маркер-вспомогательной селекции новых форм пшенично-ржаных амфиплоидов с фиолетовой окраской зерна и сравнительная оценка их по содержанию антоцианов и показателям продуктивности.

Материалы и методы

Растительный материал. В качестве растительного материала использовались гибриды F₂: (*Triticosecale* × *T. dicoccum*). Гибриды были получены с помощью метода эмбриокультуры *in vitro* (Петраш, Стёпочкин, 2023) от скрещивания гексаплоидной тритикале сорта Садко из мировой коллекции ВИР (к-3927) и фиолетовозерной полбы 27-3/17 (Стёпочкин, и др., 2023). Схема получения растительного материала представлена на рис. 1.

Выделение ДНК и молекулярный анализ. Суммарную ДНК выделяли из молодых листьев индивидуальных растений в соответствии с методикой, описанной J. Plaschke с коллегами (1995). Реакционная смесь для ПЦР содержала 100 нг матричной ДНК, реакционный буфер (100 мМ Трис-НСl, рН 8.5 (при 25 °С), 100 мМ KCl, 0.4 мМ каждого дезоксинуклеозидтрифосфата, 4 мМ MgCl₂, 0.06 ед. акт./мкл Таq ДНК-полимеразы, 0.2 % Tween 20, стабилизаторы HS-Таq ДНК-полимеразы) («Биолабмикс», Россия), 0.3 мкМ прямого и обратного праймеров («Биоссет», Россия). Для скрининга растений использовали внутригенный маркер Pp3-diagnostic (Шоева и др., 2021), разработанный к гену *Pp3* на хромосоме 2A, и микросателлитный маркер Xgwm0046, фланкирующий ген *Pp-B1* на хромосоме 7B. Процедуру ПЦР с маркерами

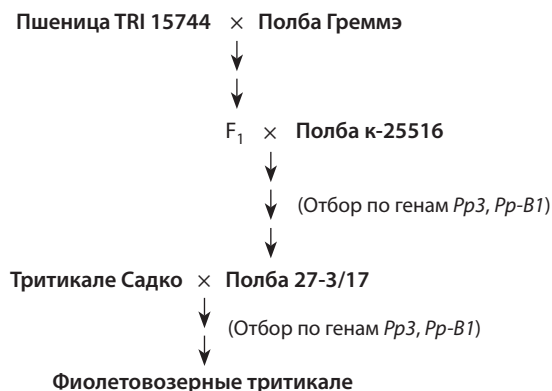


Рис. 1. Схема создания фиолетовозерных тритикале.

и разделение продуктов ПЦР в агарозном геле проводили согласно описанным протоколам (Шоева и др., 2021; Гордеева и др., 2023).

Определение общего содержания антоцианов. Содержание антоцианов определяли согласно принципам и методам, указанным в публикации (Sharma A. et al., 2023), с изменениями. Зрелое зерно исследуемых образцов измельчали на лабораторной мельнице «ЭМ-3А» (Россия). Антоцианы экстрагировали из цельнозерновой муки в 1 % HCl в метаноле в течение 12 ч при +4 °С. После центрифугирования в течение 25 мин при 12000 об./мин и +4 °С измеряли оптическую плотность экстракта на спектрофотометре SmartSpec™ Plus (Bio-Rad Laboratories, Inc., США) при длине волны 530 и 700 нм. Анализ выполняли в трехкратной повторности для каждого образца. Вычисление содержания антоцианов проводили в пересчете на эквивалент самого распространенного в зерне антоцианидина цианидин-3-глюкозида по формуле:

$$C = (A/e) \times (V/1000) \times MW \times (1/Sample\ Wt) \times 10^6,$$

где *C* – общее содержание антоцианов, мкг цианидин-3-глюкозида/г муки; *A* – расчетный показатель абсорбции ($A_{530} - A_{700}$); *e* – коэффициент молярной экстинкции цианидин-3-глюкозида ($25.965\text{ см}^{-1}\text{M}^{-1}$); *V* – общий объем экстракта, мл; *MW* – молекулярная масса цианидин-3-глюкозида (449); *Sample Wt* – масса навески, мг.

Полевая оценка продуктивности растений. Изучение признаков продуктивности полученных фиолетовозерных образцов тритикале и их родителей проводили на опытном участке СибНИИРС – филиала ИЦиГ СО РАН в 2024 и 2025 гг. Растения выращивали на делянках шириной 100 см с расстоянием между рядками 20 см.

Погодные условия в годы проведения полевого опыта характеризовались избыточным увлажнением и высоким температурным режимом. К началу сентября 2024 г. сумма эффективных температур составила 1590.8 °С, а в 2025 г. – 1601 °С при средней многолетней 1428 °С. Уровень влагообеспеченности вегетационного периода 2024 г. был избыточным (гидротермический коэффициент (ГТК) в мае-августе составил 1.91), в августе выпало 2.3 нормы осадков, что повлекло развитие грибковых инфекций и прорастание зерна на корню. Вегетационный

период 2025 г. в среднем характеризовался достаточной влагообеспеченностью (ГТК в мае-августе равен 1.13), однако в июне и июле количество осадков было меньше среднего многолетнего, а в августе – больше.

Статистический анализ выполняли с использованием пакета программ Statistica 12 и Microsoft Excel 2016. Значения показателей признаков растений сравнивали с помощью *t*-критерия Стьюдента.

Результаты и обсуждение

В ранних поколениях гибридов тритикале и фиолетовозерной полбы отмечали высокую стерильность колоса и низкую всхожесть. Появлялись карликовые стерильные растения с колосом, похожим на колос полбы, но начиная с F₄ полностью стерильных растений уже не наблюдали, колос был типичным для гексаплоидных тритикале.

Анализ растений по молекулярным маркерам проводили на гибридах F₄ (рис. 2), все зерно в этом поколении было с фиолетовой окраской и при прорастивании имело окрашенный колеоптиле. По результатам ПЦР с маркером Pp3-diagnostic установлено, что тритикале и полба дают различные фрагменты амплификации с этим маркером. У всех гибридов в результате ПЦР синтезировался фрагмент длиной около 398 п. н., который совпадает с фрагментом полбы. Следовательно, гибриды несут доминантный ген *Pp3* на хромосоме 2A.

Анализ с микросателлитным маркером Xgwm0046, тесно сцепленным с геном *Pp-B1* (ответственным за окрашенный колеоптиле), выявил, что гибриды аналогично родительской полбе амплифицируют фрагмент длиной около 186 п. н., тогда как с ДНК тритикале синтезировался фрагмент большей длины. На основании молекулярного анализа установлено, что все изученные F₄ гибриды несут доминантные гены *Pp3* и *Pp-B1* в гомозиготном состоянии.

Из поколения F₄ по фертильности нами было отобрано четыре лучших растения (2-1-1, 2-1-3, 2-1-5 и 2-1-6), которые в дальнейшем изучались как отдельные семьи. В последующих вегетациях все растения были фиолетовозерными, но различались по морфологии. На рис. 3 представлены изображения колоса (в двух проекциях) и зерна

некоторых перспективных гибридов F₆ и их родителей. Полученные образцы имеют окрашенное зерно и остистый колос, по морфологии больше похожий на тритикале Садко. Следует заметить, что у гибридов, как и у материнского сорта Садко, шейка стебля имеет опушение. Этот признак контролируется доминантным геном *Hp*, локализованным в хромосоме 5R (Korzun et al., 1996), следовательно, отобранные нами формы тритикале несут хромосому 5 ржи либо ее фрагмент.

Потомство F₅₋₆ тестировали по признакам продуктивности в полевых условиях 2024–2025 гг. совместно с родительскими формами (см. таблицу). Структурный анализ выполняли на 10 типичных растениях каждой семьи, в качестве контроля использовали тритикале Садко. При выращивании в поле установлено, что гибриды, как и тритикале Садко, были устойчивы к полеганию, тогда как полба имела слабую соломину и полегла полностью. Гибридные формы тритикале и сорт Садко, в отличие от полбы, характеризовались легким обмолом колоса; семена вымачивались без чешуек; стержень колоса прочный.

Гибридные линии в годы изучения имели длину колоса и число колосков в колосе на уровне контроля Садко (более 9 см и 23 шт. соответственно), тогда как длина колоса полбы не превышала 8 см, а число колосков у нее составило 17–18 шт. По числу зерен главного колоса гибриды уступали контролю, достоверно ниже были значения семей 2-1-3 и 2-1-5 в 2025 г. (29.6 и 29.5 шт. против 45.7 шт. у Садко). При этом полба в оба года имела достоверно меньшее число зерен, чем Садко, что обусловлено меньшим количеством колосков в колосе. В свою очередь, пониженное число завязавшихся зерен у гибридных форм тритикале связано с частичной стерильностью. Вес зерна с колоса гибридных семей в годы изучения был на уровне контроля, но не превышал его и составил в среднем 0.85 г в 2024 г. и 1.69 г в 2025 г., лишь у образца 2-1-3 в 2024 г. масса зерна с колоса была достоверно ниже – 0.62 г.

Масса 1000 зерен является показателем крупности зерна; в годы изучения у полученных фиолетовозерных форм тритикале она была на уровне контрольного сорта и составила 29.8 и 47.6 г в 2024 и 2025 гг. при 33.8 и 50.2 г со-

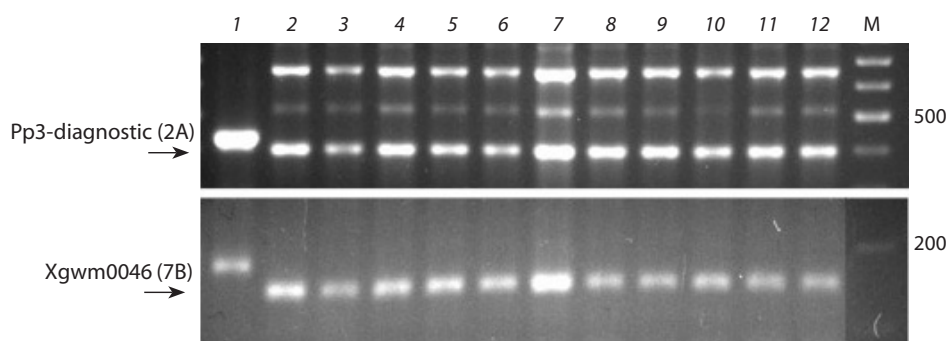


Рис. 2. Электрофореграммы продуктов ПЦР гибридов F₄: *Triticosecale* × *T. dicoccum* и их родительских форм с ДНК маркерами Pp3-diagnostic и Xgwm0046.

1 – тритикале Садко; 2 – полба 27-3/17; 3–12 – гибриды F₄: Садко × 27-3/17; М – ДНК маркер Step 100. Стрелками указаны фрагменты ДНК, соответствующие доминантному аллелю гена *Pp3* на хромосоме 2A (≈398 п. н.) и маркера Xgwm0046, сцепленного с доминантным аллелем гена *Pp-B1* на хромосоме 7B (≈186 п. н.).



Рис. 3. Колосья и зерна фиолетовозерных гибридов F₆: Садко × 27-3/17 (*Triticosecale* × *T. dicoccum*) и их родителей.

Показатели продуктивности гибридов F₅₋₆ фиолетовозерных форм тритикале и их родителей в 2024–2025 гг.

Образец	Длина главного колоса, см		Число колосков главного колоса, шт.		Число зерен главного колоса, шт.		Вес зерен главного колоса, г		Масса 1000 зерен, г		Урожайность, г/м ²	
	2024 г.	2025 г.	2024 г.	2025 г.	2024 г.	2025 г.	2024 г.	2025 г.	2024 г.	2025 г.	2024 г.	2025 г.
2-1-1	9.67 ± 0.49	9.71 ± 0.67	24.4 ± 1.1	24.6 ± 1.4	27.7* ± 4.9	38.6 ± 6.7	0.85* ± 0.22	1.98 ± 0.43	30.1 ± 3.4	47.5 ± 5.9	216* ± 52	493 ± 49
2-1-3	9.56 ± 0.68	9.42 ± 0.78	23.6 ± 1.4	23.0 ± 1.9	21.6* ± 8.2	29.6* ± 4.6	0.62* ± 0.35	1.39 ± 0.42	29.2 ± 5.7	46.0 ± 0.8	163** ± 30	384* ± 86
2-1-5	9.66 ± 0.76	9.28 ± 0.42	23.2 ± 1.1	23.6 ± 1.4	32.5* ± 4.0	29.5* ± 3.8	0.99 ± 0.22	1.38* ± 0.25	29.5 ± 3.4	46.6 ± 6.5	244** ± 32	404* ± 35
2-1-6	9.29 ± 0.46	9.56 ± 0.34	24.2 ± 1.1	23.8 ± 0.9	30.2* ± 5.7	39.8 ± 3.5	0.95 ± 0.24	2.00 ± 0.23	30.5 ± 2.6	50.1 ± 3.0	281* ± 79	486 ± 94
Среднее значение	9.55 ± 0.17	9.49 ± 0.18	23.9 ± 0.6	23.8 ± 0.7	28.0* ± 4.7	34.4 ± 5.6	0.85* ± 0.16	1.69 ± 0.34	29.8 ± 0.6	47.6 ± 1.8	275** ± 44	470 ± 61
Тритикале Садко	10.19 ± 0.36	10.10 ± 0.34	24.6 ± 0.6	24.8 ± 0.9	44.8 ± 2.9	45.7 ± 2.9	1.53 ± 0.20	2.28 ± 0.12	33.8 ± 2.7	50.2 ± 3.3	473 ± 29	584 ± 40
Полба 27-3/17	6.79** ± 0.46	7.73** ± 0.39	17.0** ± 0.9	17.8** ± 0.9	29.9* ± 2.3	35.1* ± 2.0	1.00 ± 0.08	1.38** ± 0.05	33.7 ± 2.6	39.5* ± 2.6	235** ± 36	306** ± 29

Примечание. Среднее значение – среднее значение признака гибридных форм тритикале. Достоверные отличия от тритикале Садко. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$.

ответственно у Садко. По урожайности гибриды уступали контрольному сорту тритикале, особенно в 2024 г., когда их средняя урожайность составила 275 г/м² при 473 г/м² у Садко. В 2025 г. в вегетационный период складывались более благоприятные погодные условия и урожайность гибридов выросла до 470 г/м². Сорт Садко также показал более высокий результат, сформировав урожай в размере 584 г/м².

На основании данных оценки признаков продуктивности можно сделать вывод, что созданные нами формы тритикале с фиолетовым зерном имеют признаки, схожие по значению с гексаплоидной тритикале Садко. Однако у большинства гибридов все еще присутствует частичная стерильность колоса, возможно, это связано с нарушениями в мейозе. Как показали выполненные ранее цитологические исследования F₆ гибридов полбы с тритикале, аномалии в мейозе происходят на протяжении нескольких поколений (Silkova et al., 2023). Также известно, что у гибридов тритикале стабилизация геномов и нормализация процесса мейоза могут происходить и в более поздних поколениях (Kalinka, Achrem, 2018).

Для определения содержания антоцианов в зерне среди четырех семей в поколении F₆ было отобрано девять растений, выделившихся по озерненности колоса и показателям продуктивности. Все зерна имели антоциановую окраску от средней до интенсивной. Общее содержание антоцианов (СА) определяли в цельнозерновой муке полевого материала 2025 г. Сравнение проводили с показателями полбы 27-3/17 – донора фиолетовой окраски (рис. 4). Полученные данные показали, что гибриды различались по СА от 36.0 до 529.3 мкг/г. У контроля (полбы) значение составило 382.6 мкг/г. Достоверно более высокий показатель наблюдали у образца 2-1-6-6 – 529.3 мкг/г. На уровне полбы были значения: у 2-1-1-4е – 399.5 мкг/г, 2-1-5-10а – 429.9 и 2-1-6-4б – 395.4 мкг/г. Высокие показатели СА (более 200 мкг/г) также отмечены у образцов 2-1-1-4д, 2-1-3-5а и 2-1-5-7. Наименьшие значения СА (36 мкг/г) выявили в цельнозерновой муке образцов 3а и 3б из семьи 2-1-3. Белозерный материнский сорт тритикале Садко имел общее содержание антоцианов 4.1 мкг/г муки.

В зерне фиолетовозерной пшеницы, по оценкам разных авторов, общее содержание антоцианов находится в пределах от 16 до 477 мкг/г (Гордеева и др., 2024). В нашей работе получены формы тритикале с высоким содержанием антоцианов – 529 мкг/г, что превышает показатели донорной линии фиолетовозерной полбы. Как известно, для биосинтеза антоцианов в перикарпе зерновки необходимо комплементарное взаимодействие двух генов, *Pp-1* и *Pp-3*. Ген *Pp-3* является уникальным, он унаследован от эфиопской пшеницы (Хлесткина и др., 2014). Ген *Pp-1*, контролирующей окраску колеоптиле и других органов растений, широко распространен среди редких видов пшениц (Шоева и др., 2024) и сортов мягкой пшеницы (Гордеева и др., 2024).

Окраска органов растения также встречается у сортов тритикале. Например, сорт ярового тритикале Аморе имеет сильную антоциановую окраску колеоптиле (Скатова и др., 2018), сорта Венец, Уллубий, Богуслав – среднюю

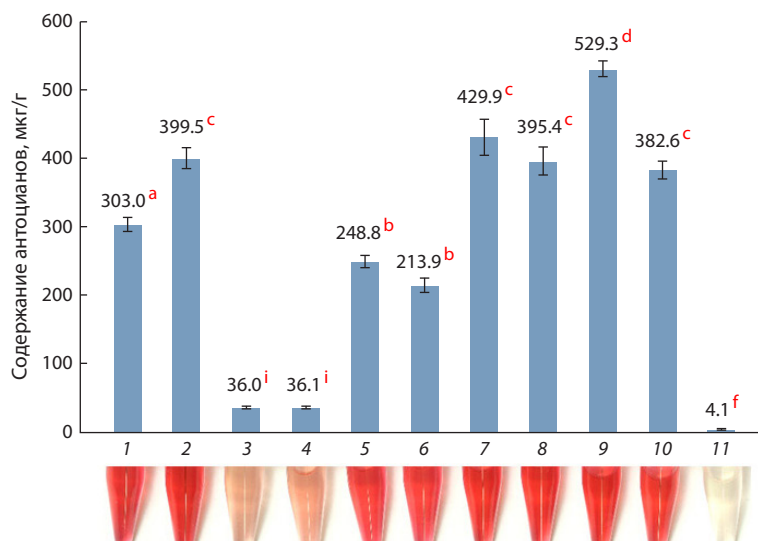


Рис. 4. Общее содержание антоцианов в пересчете на Су-3-Glu в метанольных экстрактах из цельнозерновой муки девяти гибридов фиолетовозерных тритикале и их родительских форм.

1 – F₆ 2-1-1-4д; 2 – F₆ 2-1-1-4е; 3 – F₆ 2-1-3-3а; 4 – F₆ 2-1-3-3б; 5 – F₆ 2-1-3-5а; 6 – F₆ 2-1-5-7; 7 – F₆ 2-1-5-10а; 8 – F₆ 2-1-6-4б; 9 – F₆ 2-1-6-6; 10 – полба 27-3/17; 11 – тритикале Садко. Символы а–ф свидетельствуют о статистически значимых различиях между сравниваемыми группами при $p < 0.05$.

окраску (<https://gossortrf.ru>). У используемого в нашей работе тритикале Садко в описании сорта указана антоциановая окраска ушек флагового листа (Гриб и др., 2011). Вероятно, у Садко присутствует один из аллелей гена *Pp-1*, который в сочетании с генами *Pp3*, и *Pp-B1* от полбы определяет большую выраженность признака окраски зерна у некоторых гибридов.

Получение константных форм или линий пшенично-рожанных амфилоидов, создаваемых на основе гибридизации тритикале с полбой, – длительный процесс. Его сложность обусловлена продолжающимся формообразованием, связанным как с рекомбинацией генов двух видов, так и с геномными перестройками. Для ускорения решения этой проблемы на следующем этапе селекции важно применение метода удвоенных гаплоидов на основе лучших форм фиолетовозерных тритикале.

Заключение

Нами предпринята успешная попытка создания форм тритикале с фиолетовым зерном на основе скрещивания сорта тритикале Садко и полбы 27-3/17, донора генов *Pp3* и *Pp-B1*, отвечающих за окраску зерна. Полученные гибридные формы тритикале имеют фиолетовый цвет зерна, высокое общее содержание антоцианов, по показателям продуктивности и форме колоса приближающиеся к материнской форме тритикале. Дальнейшие исследования должны быть направлены на создание константных генетически стабильных линий фиолетовозерных тритикале, которые послужат исходным селекционным материалом и станут донорами для передачи другим сортам тритикале признака высокого содержания антоцианов в зерне. Предполагается, что зерно фиолетовозерных тритикале будет использоваться как дополнительный источник антиоксидантов в функциональном питании человека и животных.

Список литературы / References

- Василова Н.З., Асхадуллин Д.Ф., Асхадуллин Д., Багавиева Э.З., Тазутдинова М.Р., Хусаинова И.И. Фиолетовозерный сорт яровой мягкой пшеницы Надира. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2021;4(40):66-75. doi 10.24412/2309-348X-2021-4-66-75 [Vasilova N.Z., Askhadullin D.F., Askhadullin D., Bagavieva E.Z., Tazutdinova M.R., Khusainova I.I. Violet-green variety of spring soft wheat Nadira. *Zernobobovye i Krupyanye Kul'tury = Legumes Groat Crops*. 2021;4(40):66-75. doi 10.24412/2309-348X-2021-4-66-75 (in Russian)]
- Гордеева Е.И., Шоева О.Ю., Шаманин В.П., Хлесткина Е.К. Использование молекулярных маркеров в селекции мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) с различной антоциановой окраской зерновок. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023;9(2):86-99. doi 10.18699/LettersVJ-2023-9-11 [Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Shamanin V.P., Khlestkina E.K. The molecular markers applying in breeding of spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) lines with different anthocyanin coloration of the grains. *Pisma v Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selektii = Letters to Vavilov J Genet Breed*. 2023;9(2):86-99. doi 10.18699/LettersVJ-2023-9-11 (in Russian)]
- Гордеева Е.И., Шаманин В.П., Хлесткина Е.К., Шоева О.Ю. Особенности селекции фиолетовозерной пшеницы на основе сортов с антоциановой окраской coleoptiles и стебля. *Сельскохозяйственная биология*. 2024;59(3):507-524. doi 10.15389/agrobiology.2024.3.507rus [Gordeeva E.I., Shamanin V.P., Khlestkina E.K., Shoeva O.Yu. On peculiarities of breeding purple-grained wheat based on varieties with anthocyanin pigmentation of coleoptiles and stems. *Sel'skokhozyaystvennaya Biologiya = Agricultural Biology*. 2024;59(3):507-524. doi 10.15389/agrobiology.2024.3.507rus (in Russian)]
- Гриб С.И., Буштевич В.Н., Полякова Е.Л., Крылова Т.М., Павлова Л.Д., Бондарчук В.А., Филатова Т.Ф., Пилипенко Д.В. Тритикале «Садко». Патент на селекционное достижение № 307, Республика Беларусь, от 15.06.2011 [Grib S.I., Bushtevich V.N., Polyakova E.L., Krylova T.M., Pavlova L.D., Bondarchuk V.A., Filatova T.F., Pilipenko D.V. Triticale variety "Sadko". Patent for a Selection Achievement No. 307. Republic of Belarus, 15.06.2011 (in Russian)]

- Миронцева А.А., Цед Е.А., Волкова С.В. Обоснование применения биоактивированного зерна тритикале в спиртовом производстве. *Техника и технология пищевых производств*. 2018;48(1): 57-65. doi 10.21603/2074-9414-2018-1-57-65
[Mironitseva A., Tsed E., Volkova S. Justification of bioactivated grain triticale use in alcohol production. *Tekhnika i Tekhnologiya Pishchevykh Proizvodstv = Food Processing: Techniques and Technology*. 2018;48(1):57-65. doi 10.21603/2074-9414-2018-1-57-65 (in Russian)]
- Петраш Н.В., Стёпочкин П.И. Создание фиолетовозерных гибридов в отдаленных скрещиваниях тритикале, мягкой пшеницы и полбы методом эмбриокультуры *in vitro*. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2023;9(4):183-188. doi 10.18699/LettersVJ-2023-9-25
[Petrash N.V., Stepochkin P.I. Development of purple-grain hybrids in distant crosses of triticale, bread wheat and emmer using the embryo culture. *Pisma v Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Lett Vavilov J Genet Breed*. 2023;9(4):183-188. doi 10.18699/LettersVJ-2023-9-25 (in Russian)]
- Рубец В.С., Ворончихина И.Н., Игонин В.Н., Сидоренко В.С., Ворончихин В.В. Характеристика фиолетовозерных сортов яровой мягкой пшеницы в условиях центрального района Нечерноземной зоны России. *Международный сельскохозяйственный журнал*. 2022;65(5):525-529. doi 10.55186/25876740_2022_65_5_525
[Rubets V.S., Voronchikhina I.N., Igonin V.N., Sidorenko V.S., Voronchikhin V.V. Characteristics of violet-green variety of spring soft wheat in the conditions of the central region of the Non-Chernozem zone of Russia. *Mezhdunarodnyi Sel'skokhoziaystvennyi Zhurnal*. 2022;5:525-529. doi 10.55186/25876740_2022_65_5_525 (in Russian)]
- Скатова С.Е., Васильев В.В., Тысленко А.М., Зуев Д.В. Тритикале яровое Аморе – новый сорт для адаптивного земледелия Нечерноземья. *Владимирский земледелец*. 2018;2(84):10-15
[Skatova S.E., Vasiliev V.V., Tyslenko A.M., Zuev D.V. Spring triticale 'Amore' is a new variety for adaptive agriculture in the Non Black soil zone. *Vladimirskij Zemledelets*. 2018;2(84):10-15 (in Russian)]
- Стёпочкин П.И., Владимиров Н.С. Характеристика линий C₁ озимых гомогеномных октоплоидных тритикале по количеству хромосом, озерненности и морозостойкости. *Генетика*. 1978;14(9): 1597-1603
[Stepochkin P.I., Vladimirov N.S. Chromosome number, seed set and winter hardiness characteristics of C₁ winter lines of homogenomic 8x triticale. *Genetika = Genetics (Moscow)*. 1978;14(9):1597-1603 (in Russian)]
- Стёпочкин П.И., Гордеева Е.И., Хлесткина Е.К. Маркер-ориентированная селекция в создании гибридных линий *Triticum dicoccon* (Schrack) Schuebl. × *Triticum aethiopicum* Jakubz. с фиолетово-окрашенным зерном. *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции*. 2023;184(2):139-148. doi 10.30901/2227-8834-2023-2-139-148
[Stepochkin P.I., Gordeeva E.I., Khlestkina E.K. Marker-assisted breeding of hybrid lines of *Triticum dicoccon* (Schrack) Schuebl. × *Triticum aethiopicum* Jakubz. with purple grain. *Proceedings on Applied Botany, Genetics and Breeding*. 2023;184(2):139-148. doi 10.30901/2227-8834-2023-2-139-148 (in Russian)]
- Хлесткина Е.К., Шоева О.Ю., Гордеева Е.И. Гены биосинтеза флавоноидов пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2014;18(4/1):784-796
[Khlestkina E.K., Shoeva O.Y., Gordeeva E.I. Flavonoid biosynthesis genes in wheat. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2014;18(4/1):784-796 (in Russian)]
- Хлесткина Е.К., Усенко Н.И., Гордеева Е.И., Стабровская О.И., Шарфунова И.Б., Отмахова Ю.С. Маркер-контролируемое получение и производство форм пшеницы с повышенным уровнем биофлавоноидов: оценка продукции для обоснования значимости направления. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2017;21(5):545-553. doi 10.18699/VJ17.25-o
[Khlestkina E.K., Usenko N.I., Gordeeva E.I., Stabrovskaya O.I., Sharfunova I.B., Otmakhova Y.S. Evaluation of wheat products with high flavonoid content: justification of importance of marker-assisted development and production of flavonoid-rich wheat cultivars. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2017;21(5):545-553. doi 10.18699/VJ17.25-o (in Russian)]
- Чуманова Е.В., Ефремова Т.Т., Соболев К.В., Косяева Е.А. Получение гибридных линий *Triticum petropavlovskiy* Udacz. et Migusch. × *Triticum aestivum* L. с крупной окрашенной зерновкой и повышенным содержанием антиоксидантов. *Письма в Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;11(2):80-89. doi 10.18699/letvjgb-2025-11-12
[Chumanova E.V., Efremova T.T., Sobolev K.V., Kosyaeva E.A. Development and characterization of wheat hybrids *Triticum petropavlovskiy* Udacz. et Migusch. × *Triticum aestivum* L. with large colored grain and increased antioxidant content. *Pisma v Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Lett Vavilov J Genet Breed*. 2025;11(2):80-89. doi 10.18699/letvjgb-2025-11-12 (in Russian)]
- Шоева О.Ю., Гордеева Е.И., Хлесткина Е.К. Внутривидовой ДНК-маркер для отбора пшеницы с повышенным содержанием антоцианов в перикарпе зерновки. Патент RU 2774444 C1, от 29 ноября 2021 г. Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/6b/b4/734418d3890f53/RU2774444C1.pdf>
[Shoeva O.Yu., Gordeeva E.I., Khlestkina E.K. Intrageneric DNA Marker for Selecting Wheat with High Anthocyanin Content in the Pericarp of the Grain. Russian patent RU 2774444C1, 29.11.2021. <https://patentimages.storage.googleapis.com/7f/6b/b4/734418d3890f53/RU2774444C1.pdf> (in Russian)]
- Шоева О.Ю., Гордеева Е.И., Хлесткина Е.К., Гашимов М.Э., Куркиев К.У. Исследование редких видов пшениц как доноров для селекции на содержание антоцианов в зерне. *Сельскохозяйственная биология*. 2024;59(5):955-972. doi 10.15389/agrobiologia.2024.5.955rus
[Shoeva O.Yu., Gordeeva E.I., Khlestkina E.K., Gashimov M.E., Kurkiev K.U. Study of rare species of wheat as donors for breeding for functional nutrition. *Sel'skokhoziaystvennaya Biologiya = Agricultural Biology*. 2024;59(5):955-972. doi 10.15389/agrobiologia.2024.5.955rus (in Russian)]
- Юдина Р.С., Гордеева Е.И., Шоева О.Ю., Тихонова М.А., Хлесткина Е.К. Антоцианы как компоненты функционального питания. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2021;25(2):178-189. doi 10.18699/VJ21.022
[Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Yu., Tikhonova M.A., Khlestkina E.K. Anthocyanins as functional food components. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2021; 25(2):178-189. doi 10.18699/VJ21.022 (in Russian)]
- Badaev N.S., Badaeva E.D., Bolsheva N.L., Maximov N.G., Zelenin A.V. Cytogenetic analysis of forms produced by crossing hexaploid triticale with common wheat. *Theor Appl Genet*. 1985;70: 536-541. doi 10.1007/BF00305987
- Camerlengo F., Kiszonas A.M. Genetic factors influencing triticale quality for food. *J Cereal Sci*. 2023;113:103744. doi 10.1016/j.jcs.2023.103744
- Cantale C., Petrazzuolo F., Correnti A., Farneti A. Triticale for bioenergy production. *Agric Agric Sci Procedia*. 2016;8:609-616. doi 10.1016/j.aaspro.2016.02.083
- Francavilla A., Joye I.J. Anthocyanins in whole grain cereals and their potential effect on health. *Nutrients*. 2020;12(10):2922. doi 10.3390/nu12102922
- Gard M., Kaur S., Sharma A., Kumari A., Tiwari V., Sharma S., Kapoor P., Sheoran B., Goyal A., Krishania M. Rising demand for healthy foods-anthocyanin biofortified colored wheat is a new research trend. *Front Nutr*. 2022;9:878221. doi 10.3389/fnut.2022.878221
- Gaviley O.V., Katerynych O.O., Ionov I.A., Dekhtiarova O.O., Grifin D.K., Romanov M.N. Triticale: a general overview of its use in poultry production. *Encyclopedia*. 2024;4(1):395-414. doi 10.3390/encyclopedia4010027

- Hamid, Kathuria D., Gautam S., Suri S., Jaiswal A.K. Triticale. In: Singh J., Kaur S., Rasane P., Singh J. (Eds) *Cereals and Nutraceuticals*. Singapore: Springer, 2024;163-189. doi 10.1007/978-981-97-2542-7_8
- Kalinka A., Achrem M. Reorganization of wheat and rye genomes in octoploid triticale (\times *Triticosecale*). *Planta*. 2018;247(4):807-829. doi 10.1007/s00425-017-2827-0
- Kamanova S., Yermekov Y., Shah K., Mulati A., Liu X., Bulashev B., Toimbayeva D., Ospankulova G. Review on nutritional benefits of triticale. *Czech J Food Sci*. 2023;41(4):248-262. doi 10.17221/67/2023-CJFS
- Khlestkina E.K. Genes determining the coloration of different organs in wheat. *Russ J Genet Appl Res*. 2013;3(1):54-65. doi 10.1134/S2079059713010085
- Khlestkina E.K., Shoeva O.Y., Gordeeva E.I. Flavonoid biosynthesis genes in wheat. *Russ J Genet Appl Res*. 2015;5(3):268-278
- Korzun V., Melz G., Börner A. RFLP mapping of the dwarfing (*Ddw1*) and hairy peduncle (*Hp*) genes on chromosome 5 of rye (*Secale cereale* L.). *Theor Appl Genet*. 1996;92:1073-1077. doi 10.1007/BF00224051
- Kukoeva T.V., Molobekova C.A., Totsky I.V., Vasiliev G.V., Pronozin A.Y., Afonnikov D.A., Khlestkina E.K., Shoeva O.Y. Enrichment of grain anthocyanin content through marker-assisted breeding for *Ant1*, *Ant2* or *HvMyc2* genes in barley (*Hordeum vulgare* L.). *Agronomy*. 2024;14(6):1231. doi 10.3390/agronomy14061231
- Latini A., Cantale C., Gazza L., Nocente F., Migliore G., Maccioni O., Marconi O., Floridi S., De Francesco G., Ammar K., Galeffi P. Exploring the potential of triticale lines for bioethanol production. *Explor Foods Foodomics*. 2024;2:613-625. doi 10.37349/eff.2024.00054
- Leonova S., Badamshina E., Koshchina E., Kalugina O., Gareeva I., Leshchenko N. Triticale flour in bakery and rusk products. *Food Sci Technol Int*. 2022;28(6):524-534. doi 10.1177/10820132211023273
- Losert D., Maurer H.P., Marulanda J.J., Würschum T. Phenotypic and genotypic analyses of diversity and breeding progress in European triticale (\times *Triticosecale* Wittmack). *Plant Breed*. 2017;136(1):18-27. doi 10.1111/pbr.12433
- Loskutov I.G., Khlestkina E.K. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain. *Plants*. 2021;10(1):86. doi 10.3390/plants10010086
- Muntzing A. Historical review of the development of triticale. In: *Triticale: Proceedings of an International Symposium*, El Batán, Mexico. 1974:13-30
- Niedziela A., Orłowska R., Machezyńska J., Bednarek P.T. The genetic diversity of triticale genotypes involved in Polish breeding programs. *Springerplus*. 2016;5(1):355. doi 10.1186/s40064-016-1997-8
- Plaschke J., Ganai M.W., Roeder M.S. Detection of genetic diversity in closely related bread wheat using microsatellite markers. *Theor Appl Genet*. 1995;91(6-7):1001-1007. doi 10.1007/BF00223912
- Shamanin V.P., TekinCakmak Z.H., Gordeeva E.I., Karasu S., Pototskaya I., Chursin A.S., Pozherukova V.E., Ozulku G., Morgounov A.I., Sagdic O., Koksel H. Antioxidant capacity and profiles of phenolic acids in various genotypes of purple wheat. *Foods*. 2022;11(16):2515. doi 10.3390/foods11162515
- Sharma A., Yadav M., Tiwari A., Ali U., Krishania M., Bala M., Sharma P., Goudar G., Roy J.K., Navik U., Garg M. A comparative study of colored wheat lines across laboratories for validation of their phytochemicals and antioxidant activity. *J Cereal Sci*. 2023;112:103719. doi 10.1016/j.jcs.2023.103719
- Sharma S., Chunduri V., Kumar A., Kumar R., Khare P., Kondepudi K.K., Bishnoi M., Garg M. Anthocyanin bio-fortified colored wheat: nutritional and functional characterization. *PLoS One*. 2018;13(4):0194367. doi 10.1371/journal.pone.0194367
- Shoeva O.Y., Gordeeva E.I., Khlestkina E.K. The regulation of anthocyanin synthesis in the wheat pericarp. *Molecules*. 2014;19(12):20266-20279. doi 10.3390/molecules191220266
- Silkova O.G., Ivanova Y.N., Loginova D.B., Solovey L.A., Sycheva E.A., Dubovets N.I. Karyotype reorganization in wheat-rye hybrids obtained via unreduced gametes: is there a limit to the chromosome number in triticale? *Plants*. 2021;10(10):2052. doi 10.3390/plants10102052
- Silkova O.G., Ivanova Y.N., Stepochkin P.I. Creation and study of emmer (*Triticum dicoccum*) \times triticale hybrids. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Seleksii = Vavilov J Genet Breed*. 2023;27(4):323-332. doi 10.18699/VJGB-23-39
- Zhu F. Triticale: nutritional composition and food uses. *Food Chem*. 2018;241:468-479. doi 10.1016/j.foodchem.2017.09.009

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 10.11.2025. После доработки 14.01.2026. Принята к публикации 15.01.2026.