

doi 10.18699/vjgb-25-42

## Антоцианы и фенольные соединения в окрашенном зерне пшеницы

Е.В. Чуманова , Т.Т. Ефремова , К.В. Соболев <sup>1, 2</sup>, Е.А. Косяева <sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный аграрный университет, Новосибирск, Россия chumanova@bionet.nsc.ru

**Аннотация.** Пшеница является чрезвычайно важным и предпочтительным источником питания человека во многих регионах земного шара. Получение биофортифицированных сортов мягкой пшеницы с окрашенным зерном, которое, как известно, содержит целый ряд биологически активных соединений, в том числе антоцианы, фенольные соединения, витамины и минералы, отражает общемировую тенденцию на увеличение разнообразия и повышение качества рациона путем разработки и внедрения разнообразных продуктов функционального питания. В настоящей работе описаны генетические системы, регулирующие биосинтез и накопление антоцианов в перикарпе и алейроновом слое, присутствие которых придает зерну фиолетовую, голубую и черную окраску. Обзор посвящен систематизации информации об особенностях качественного и количественного содержания антоцианов, растворимых и нерастворимых фенольных кислот в зерне пшеницы с различной окраской, а также показателях антиоксидантной активности спиртовых экстрактов зерна в зависимости от содержания антоцианов и фенольных соединений. Огромным количеством исследований подтверждено, что данные соединения являются антиоксидантами и соединениями с противовоспалительной активностью и их употребление вносит важный вклад в профилактику ряда социально значимых заболеваний человека. Употребление продуктов из окрашенного зерна злаков может способствовать дополнительному обогащению рациона людей биологически активными соединениями наряду с привычными источниками антиоксидантов. Отдельное внимание в обзоре уделено описанию достижений отечественных селекционеров, усилия которых в этой области позволили получить ряд перспективных сортов и линий с окрашенным зерном, которые могут послужить основой создания рынка биофортифицированных диетических продуктов питания в России и увеличения экспортного потенциала рынка зерна.

**Ключевые слова:** пшеница; голубая, фиолетовая, черная окраска зерна; антоцианы; фенольные соединения; антиоксидантная активность

**Для цитирования:** Чуманова Е.В., Ефремова Т.Т., Соболев К.В., Косяева Е.А. Антоцианы и фенольные соединения в окрашенном зерне пшеницы. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2025;29(3):392-400. doi 10.18699/vjgb-25-42

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (№ 24-26-20028) и Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (№ р-99).

## Anthocyanins and phenolic compounds in colored wheat grain

E.V. Chumanova , T.T. Efremova , K.V. Sobolev <sup>1, 2</sup>, E.A. Kosyeva <sup>1, 2</sup><sup>1</sup> Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia<sup>2</sup> Novosibirsk State Agrarian University, Novosibirsk, Russia chumanova@bionet.nsc.ru

**Abstract.** Wheat is an extremely important and preferred source of human nutrition in many regions of the world. The production of biofortified colored-grain wheat varieties, which are known to contain a range of biologically active compounds, including anthocyanins, phenolic compounds, vitamins and minerals, reflects a worldwide trend toward increasing dietary diversity and improving diet quality through the development and introduction of diverse functional foods. The present work describes the genetic systems that regulate the biosynthesis and accumulation of anthocyanins in the pericarp and aleurone layer, the presence of which imparts purple, blue and black grain color. The review is devoted to the systematization of available information on the peculiarities of qualitative and quantitative content of anthocyanins, soluble and insoluble phenolic acids in wheat grain of different color, as well as on indicators of antioxidant activity of alcoholic extracts of grain depending on the content of anthocyanins and phenolic compounds. A huge number of studies have confirmed that these compounds are antioxidants, have anti-inflammatory activity and their consumption makes an important contribution to the prevention of a number of socially significant human diseases. Consumption of colored cereal grain products may contribute to an additional enrichment of bioactive compounds in human diet along with the usual sources of antioxidants. Special attention in the review is paid to the description of achievements of Russia's breeders in developing promising

varieties and lines with colored grain, which will be a key factor in expanding the opportunities of the domestic and international grain market.

**Key words:** wheat; blue, purple, black grain; anthocyanins; phenolic compounds; antioxidant activity

**For citation:** Chumanova E.V., Efremova T.T., Sobolev K.V., Kosyayeva E.A. Anthocyanins and phenolic compounds in colored wheat grain. *Vavilovskii Zhurnal Genetiki i Selekcii* = *Vavilov J Genet Breed.* 2025;29(3):392-400. doi 10.18699/vjgb-25-42

## Введение

Пшеница занимает важное место в структуре мирового потребления. За последние два десятилетия направление биофортификации, связанное с повышением пищевой ценности продуктов питания из зерна пшеницы, стало актуальным трендом в селекции. В частности, внимание исследователей и селекционеров сосредоточено на получении богатых антоцианами сортов пшеницы с окрашенным зерном. В зависимости от типа и накопления антоцианов (АЦ) в разных слоях зерновки зерно пшеницы может иметь фиолетовую (ФЗ; в перикарпе, контролируется генами *Pp*), голубую (ГЗ; в алейроновом слое, гены *Ba*) и темно-фиолетовую (черную) окраску (ЧЗ; в обоих слоях одновременно, *Ba* + *Pp*).

Ценностью зерна такой пшеницы, по сравнению с зерном красной (КЗ) и белой (БЗ) окраски, является более разнообразный состав обладающих важными биологическими свойствами флавоноидов (Wang et al., 2020; Razgonova et al., 2021), более высокое содержание белка и незаменимых аминокислот (Tian et al., 2018; Garg et al., 2022), макро- и микроэлементов Zn, Fe, Mg, K, Ca, Se, Cu и Mn (Ficco et al., 2014; Sharma S. et al., 2018; Tian et al., 2018; Dhua et al., 2021; Shamanin et al., 2024) и витаминов B1, B2, B9 и E (Granda et al., 2018). АЦ и фенольные соединения (ФС) обладают мощным антиоксидантным потенциалом, защищая клетки от повреждения свободными радикалами, противостоят воспалительной и антибактериальной активности, предотвращают развитие диабета, сердечно-сосудистых, нейродегенеративных заболеваний и рака (Laddomada et al., 2017; Francavilla, Joye, 2020; Mohammadi et al., 2024).

В Китае, Индии, Сингапуре, Канаде и Австрии пшеница с окрашенным зерном используется для производства продуктов функционального питания из цельнозерновой муки, содержащей большое количество антиоксидантов. Это различные виды цельнозернового хлеба, хлебобулочные и макаронные изделия, каши, печенье, панкейки, бисквиты, крекеры (Garg et al., 2022; Gamel et al., 2023). Однако содержание АЦ и ФС уменьшается при воздействии высоких температур. Потери АЦ при выпечке хлеба достигают 10–73 %; в процессе приготовления лапши, пасты, лепешек, бисквитов – 29–74 % АЦ и 26–80 % ФС (Garg et al., 2022). Хлебобулочные изделия из окрашенного зерна по хлебопекарным и органолептическим свойствам не уступают или даже превосходят изделия из неокрашенной муки, и у них увеличен срок хранения (Хлесткина и др., 2017).

В последние годы в нашей стране с целью формирования здорового образа жизни и питания проводятся мероприятия, направленные на создание антоциан-биофортифицированной пшеницы (Хлесткина и др., 2017; Василова и др., 2021; Рубец и др., 2022; Gordeeva et al., 2022;

Shamanin et al., 2022, 2024), поскольку в России пшеница является важной продовольственной культурой.

В данном обзоре представлена информация о генетических факторах, регулирующих накопление АЦ в окрашенном зерне пшеницы, особенностях содержания АЦ, ФС и антиоксидантной активности (АОА) зерна с различной окраской, а также обобщены сведения о достижениях российских ученых в получении перспективных линий и сортов с окрашенным зерном.

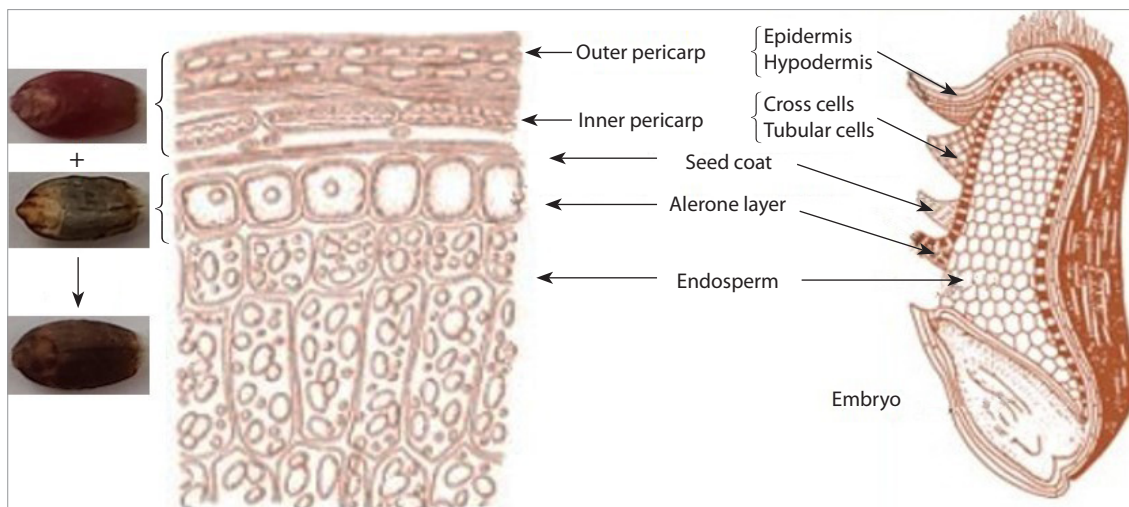
## Генетический контроль синтеза и накопления антоцианов в зерне пшеницы

Зерновка пшеницы состоит из зародыша и эндосперма, окруженных плотным эпидермисом и семенной оболочкой (рис. 1). Зерновку окружает плодовая оболочка (перикарп, или перикарпий, от греч. *peri* – около, *carpos* – плод), которая выполняет защитную функцию и состоит из эпидермиса, гиподермиса, остатков тонкостенных клеток, промежуточных, поперечных и трубчатых клеток. Клетки семенной оболочки (семенная кожура, пигментный слой, *testa*) КЗ пшениц содержат проантоцианидины, повышающие устойчивость зерна к предуборочному прорастанию (Himi et al., 2011). Алейроновый слой зерна – это наружный слой эндосперма, состоящий из одного слоя клеток квадратной или слегка продолговатой формы. Он получил свое название из-за содержания алейроновых зерен, являющихся структурами для хранения белков.

Зерновка пшеницы может быть окрашена в голубой, фиолетовый и темно-фиолетовый (черный) цвет в зависимости от типа и накопления АЦ в разных слоях. Синтез АЦ в алейроновом слое определяет появление голубовато-серой окраски, фиолетовая окраска обусловлена накоплением АЦ в клетках перикарпа. Черный цвет зерна пшеницы является результатом накопления АЦ одновременно в перикарпе и алейроновом слое (см. рис. 1).

Биосинтез АЦ в алейроновом слое находится под контролем доминантных аллелей генов *Ba* (Blue aleurone), локализованных в хромосомах четвертой гомеологической группы некоторых видов злаков. *Ba1* (син. *Ba(b)*) локализован в длинном плече хромосомы 4E (ранее 4Ag) *Thinopyrum ponticum* (Podp.) Barkworth & D.R. Dewey (*Agropyron elongatum* L., *Lophopyrum ponticum* (Podb.) Love, *Elytrigia pontica* (Podp.) Holub) (Zheng et al., 2006), *Ba2* (син. *Ba(a)*) – в длинном плече хромосомы 4A<sup>bo</sup> *Triticum boeoticum* Boiss. или 4A<sup>m</sup> *T. monococcum* L. (Singh et al., 2007). *BaThb* (син. *Ba(c)*) расположен в хромосоме 4J *Th. bessarabicum* (Săvul. & Rayss) Á. Löve (Shen et al., 2013).

Геном-кандидатом *Ba1* является *ThMyc4E*, кодирующий транскрипционный фактор (ТФ) MYC-типа с доменом bHLH (Li N. et al., 2017). В качестве вероятного кандидата *Ba(a)* рассматривается *TbMyC4A*, кодирующий bHLH ТФ,



**Рис. 1.** Внутреннее строение зерновки пшеницы: продольный и поперечный разрез.  
Адаптировано из (Laddomada et al., 2015).

содержащий три регуляторных домена bHLH-MYC\_N, HLH и ACT-like (Liu X. et al., 2021). Считается, что гены *BaThb* и *Ba1* могут иметь общее происхождение (Burešová et al., 2015), поскольку *Th. bessarabicum* является вероятным донором генома E<sup>b</sup> большинства полиплоидных видов пырея, включая *Th. ponticum*.

Гены *Ba* интрогрессированы в геном мягкой пшеницы с использованием транслокаций, замещенных или дополненных линий. Созданы линии сорта Саратовская 29 (C29), у которых хромосомы 4B или 4D замещены хромосомой 4E *Th. ponticum* (Арбузова и др., 2012; Gordeeva et al., 2022). Liu Xin с сотрудниками (2020) получили шесть замещенных линий 4A<sup>bo</sup>(4B), несущих ген *Ba2*: Z18-1150, Z18-1195, Z18-1223, Z18-1244, Z18-1289 и Z18-3816. Анализ хромосомного состава ряда линий с ГЗ методом гибридизации *in situ* показал присутствие шести типов интрогрессий хроматина *Th. ponticum*: дителосомно дополненных (Blue Norco), дисомно замещенных (Blue Baart), T4BS.4AgL (UC66049), а также транслокаций различных дистальных частей плеч хромосом *Th. ponticum* (Sebesta Blue 1-3) (Burešová et al., 2015). Shen с коллегами (2013) создали 157 линий от скрещивания сорта Чайниз Спринг и амфилоида *T. aestivum*-*Th. bessarabicum*, среди которых были выделены моносомно и дисомно дополненные линии с хромосомами 4J, 4JL и 4JS, а также T4DS.4DL-4JL, несущие фрагмент хромосомы 4J.

Одной из значимых проблем в селекции сортов ГЗ пшеницы является одновременная передача генов пырея, отрицательно влияющих на урожайность полученных гибридов из-за эффекта сцепления (Garg et al., 2016). С этой точки зрения предпочтительней вовлекать в селекцию доноры фиолетовой окраски, которые лишены подобного недостатка.

Фиолетовая окраска зерна обусловлена синтезом АЦ в клетках перикарпа. Первые образцы тетраплоидной пшеницы *T. aethiopicum* Jakubz. (*T. turgidum* L. subsp. *abyssinicum* Vavilov), имеющей гены фиолетовой окраски, были собраны Виттмаком в Абиссинии (Северная Эфиопия) в начале 1870-х гг. и завезены в Европу, откуда в дальней-

шем распространились по разным странам (Eticha et al., 2011). Примечательно, что в Эфиопии до сих пор возделывают ландрасы ФЗ пшеницы.

Синтез АЦ в перикарпе контролируется комплементарным взаимодействием генов *Pp* (Purple pericarp): *Pp-1* (*TaPpm1*) и *Pp3* (*TaPpb1/TaMyc1*), кодирующих разные типы ТФ, активирующих транскрипцию структурных генов биосинтеза АЦ (Jiang W. et al., 2018). *Pp-1* является MYB-подобным ТФ с регуляторным доменом R2R3. Установлена его локализация в коротких плечах хромосом седьмой гомеологической группы. *Pp-A1* расположен в 7AS (*T. aestivum*) (Gordeeva et al., 2015), *Pp-B1* – в 7BS (7B *T. durum*, 7S *Aegilops speltoides* Tausch.) (Khlestkina et al., 2010) и *Pp-D1* – в 7DS (*T. aestivum*) (Tereshchenko et al., 2012).

Доминантный аллель гена *Pp3*, локализованный в центромерном районе хромосомы 2A, кодирует ТФ с регуляторным доменом bHLH (Shoeva et al., 2014). Была показана тканеспецифическая транскрипционная активность доминантного аллеля *TaMyc1*, который является вероятным кандидатом *Pp3*, в окрашенном перикарпе зерновок и более низкий уровень экспрессии в coleoptile, чешуях и листьях. В отличие от *Pp3*, *Pp-1* экспрессируется во многих тканях растений (Shoeva et al., 2014; Jiang W. et al., 2018). Установлено, что у мягкой пшеницы *TaMyc1* имеет не менее четырех копий. Еще три копии, *TaMyc2-4*, локализованы соответственно в 2AL, 2BL и 2DL и не транскрибируются в перикарпе. Сравнение экспрессии *TaMyc1* в почти изогенных линиях, несущих различные комбинации доминантных и рецессивных аллелей *Pp-1* и *Pp3*, позволило сделать вывод о том, что *Pp-D1* частично супрессирует экспрессию *TaMyc1* в перикарпе (Shoeva et al., 2014).

В кодирующей области *TaPpm1* обнаружено четыре аллельных варианта: *TaPpm1a* (доминантный, у генотипов с ФЗ) и *TaPpm1b*, *TaPpm1c*, *TaPpm1d* (нефункциональные из-за различных по размеру инсерций, вызывающих сдвиг рамки считывания или преждевременную терминацию транскрипции у сортов с неокрашенным зерном). В промо-

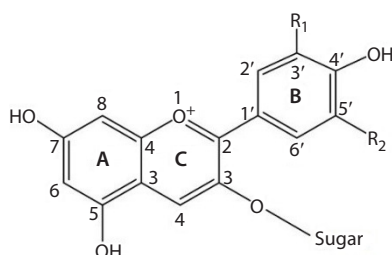


Рис. 2. Структура основных антоцианидинов, содержащихся в зерне пшеницы.

| Агликон      | R <sub>1</sub>   | R <sub>2</sub>   | Цвет                  |
|--------------|------------------|------------------|-----------------------|
| Цианидин     | ОН               | Н                | Фиолетовый            |
| Дельфинидин  | ОН               | ОН               | Голубой               |
| Мальвидин    | ОСН <sub>3</sub> | ОСН <sub>3</sub> | Красновато-фиолетовый |
| Пеларгонидин | Н                | Н                | Оранжево-красный      |
| Пеонидин     | ОСН <sub>3</sub> | Н                | Голубовато-фиолетовый |
| Петунидин    | ОСН <sub>3</sub> | ОН               | Фиолетовый            |

торной области *TaPpb1* у ФЗ сортов было выявлено шесть тандемных повторов длиной 261 п. н. (аллель *TaPpb1a*), в то время как у сортов с неокрашенным зерном присутствовал только один повтор (*TaPpb1b*) (Jiang W. et al., 2018).

Регуляция экспрессии структурных генов пути биосинтеза АЦ происходит при участии комплекса MBW, в состав которого входят белки R2R3-MYB, bHLH и WD40. Аллельные вариации *TaPpm1* влияют на антоциановую пигментацию, изменяя способность связываться с bHLH, тогда как вариации в промоторе *TaPpb1* изменяют уровень его экспрессии (Jiang W. et al., 2018).

## Содержание антоцианов в окрашенном зерне пшеницы

Антоцианы являются водорастворимыми пигментами, которые относятся к флавоноидам и придают окраску различным частям растений. В основе молекулы АЦ (рис. 2) лежит антоцианидин (агликон), к которому в положении 3, а иногда в положениях 3 и 5 О-гликозидными связями присоединены остатки сахаров, чаще всего глюкозы, галактозы, арабинозы и рутинозы, которые могут ацилироваться алифатическими и ароматическими кислотами (Francavilla, Joye, 2020). Шесть основных антоцианидинов: цианидин, дельфинидин, мальвидин, пеларгонидин, пеонидин и петунидин – в свою очередь различаются по количеству гидроксид- или метоксигрупп (см. рис. 2).

Общее содержание АЦ у пшеницы сильно варьирует и составляет в среднем от 10 до 305 мкг/г у ФЗ, от 17 до 211 мкг/г у ГЗ и от 56 до 198 мкг/г у ЧЗ. В целом пшеница с ЧЗ имеет более высокий уровень АЦ. БЗ и КЗ генотипы имеют самые низкие значения (7–10 мкг/г) (Abdel-Aal, Hucl, 2003; Abdel-Aal et al., 2006; Varga et al., 2013; Garg et al., 2016; Kumari et al., 2020; Wang et al., 2020; Iannucci et al., 2022). Кроме того, в цельнозерновой муке количество АЦ меньше, чем во фракции отрубей (Siebenhandl et al., 2007; Iannucci et al., 2022) (Приложение, табл. S1)<sup>1</sup>. Содержание АЦ у ГЗ пшеницы в среднем выше, чем у ФЗ, однако встречаются и исключения (Abdel-Aal et al., 2016). Предполагается, что в ГЗ и ЧЗ расположение пигмента в более глубоких слоях приводит к повышенной стабильности АЦ (Garg et al., 2016). Находящиеся в алейроновом слое АЦ более доступны, чем АЦ в перикарпе, поскольку менее прочно связаны с клеточными компонентами.

Качественный состав АЦ различается у ГЗ и ФЗ пшениц. Считается, что ФЗ сорта, несмотря на меньшее, как правило, содержание АЦ, более разнообразны по составу

отдельных АЦ. Цианидин-3-глюкозид имеет наибольшую концентрацию (30–58 %) среди АЦ в ФЗ. Наряду с цианидин-3-глюкозидом выявлено высокое содержание производных цианидина: цианидин-3-галактозида, цианидин-3-рутинозида, цианидин-3-(6"-малонилглюкозида), а также дельфинидин-3-галактозида, мальвидин-3-глюкозида, пеонидин-3-глюкозида, петунидин-3-глюкозида, пеонидин-3-(6"-малонилглюкозида) (Hosseinian et al., 2008; Abdel-Aal et al., 2018; Jiang Y. et al., 2024; Shamanin et al., 2024).

Abdel-Aal с сотрудниками (2006) идентифицировали восемь АЦ в ФЗ: цианидин-3-глюкозид, цианидин-3,5-диглюкозид, пеонидин-3-глюкозид, малонил- и сукцинил-производные цианидина и пеонидина. Затем был идентифицирован еще ряд АЦ в ФЗ: дельфинидин-3-рутинозид, мальвидин-3-рутинозид, мальвидин сукцинилглюкозид, пеларгонидин-3-(6"-малонилглюкозид), пеонидин-3-рутинозид, петунидин-3-(6"-малонилглюкозид) (Abdel-Aal et al., 2018). Среди тринадцати изученных АЦ были обнаружены арабинозид-производные цианидина, дельфинидина, пеларгонидина и пеонидина, глюкозид-производные мальвидина, пеларгонидина, петунидина и дельфинидин-3-галактозид (Hosseinian et al., 2008).

Были описаны гликозиды цианидина с молекулой гексозы, ацетилированные малоновой и/или уксусной кислотой, дельфинидина с молекулой гексозы, ацетилированные кумаровой кислотой, пеонидина с гексозой/рамнозой, ацетилированные малоновой и/или уксусной кислотой и петунидина с двумя или тремя молекулами гексозы и рамнозы, ацетилированные кофейной или кумаровой кислотой (Bartl et al., 2015). Jiang Y. с сотрудниками (2024) показали присутствие 26 антоциановых гликозидов, в том числе 12 ацилированных (ацетил-, малонил- и сукцинил-производные). Содержание АЦ и отдельных антоциановых соединений возрастало при уменьшении диаметра частиц муки (мука грубого, тонкого и супертонкого помола).

Среди антоциановых пигментов в ГЗ главным образом представлены дельфинидин-3-рутинозид, дельфинид-3-глюкозид, мальвидин-3-глюкозид (Ficco et al., 2014), дельфинидин-3-рутинозид, цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рутинозид (Abdel-Aal et al., 2006), мальвидин-3-глюкозид, дельфинид-3-галактозид, цианидин-3-глюкозид (Sharma N. et al., 2020), дельфинидин-3-рутинозид, дельфинид-3-глюкозид, петунидин-3-глюкозид (Iannucci et al., 2022). Наибольшее содержание имеют дельфинидин-3-глюкозид (9.9–56.5 мкг/г) и дельфинидин-3-рутинозид (35.9–72.5 мкг/г) (Abdel-Aal et al., 2006; Ficco et al., 2014;

<sup>1</sup> Табл. S1–S5 Приложения см. по адресу:

<https://vavilovj-icg.ru/download/pict-2025-29/appx13.pdf>

Iannucci et al., 2022) или дельфинидин-3-галактозид и мальвидин-3-глюкозид (Sharma N. et al., 2020). У ГЗ пшеницы было найдено 8 АЦ: цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-рутинозид, дельфинидин-3-глюкозид, дельфинидин-3-рутинозид, мальвидин-3-рутинозид, пеонидин-3-рутинозид, петунидин-3-глюкозид, петунидин-3-рутинозид (Abdel-Aal et al., 2006). В работе Ficco с сотрудниками (2014) представлены 8 АЦ и выделены новые производные пеонидина. Bartl с коллегами (2015) идентифицировали производные цианидина, дельфинидина, мальвидина, пеонидина и петунидина с одной, двумя или тремя молекулами гексозы с присоединенной молекулой рамнозы или кумаровой кислоты.

Пшеница с ЧЗ имеет не только большее суммарное содержание АЦ, но и более разнообразный состав. В ГЗ присутствовали 10 различных АЦ, в ФЗ – 6 и в ЧЗ – 11 (Sharma N. et al., 2020). Идентифицировано 22 различных соединения в ГЗ, 23 в ФЗ и 26 в ЧЗ, включая цианидин-3-(6"-сукцинилглюкозид), цианидин-3-(2G-ксилозилрутинозид), цианидин-3-(3",6"-дималонилглюкозид), цианидин-3-(6"-ферулоилглюкозид)-5-глюкозид, цианидин-3-рутинозид-3'-глюкозид, дельфинидин-3-кофеоилглюкозид, дельфинидин-3-самбубиозид, мальвидин-3-рутинозид-5-глюкозид, мальвидин-3-(6"-п-кофеоилглюкозид), пеларгонидин-3-(6"-малонилглюкозид), пеонидин-3-рутинозид-5-глюкозид, пеонидин-3,5-диглюкозид, петунидин-3-рутинозид-5-глюкозид (Garg et al., 2016). Пшеница с ЧЗ имеет высокую концентрацию цианидин-3-глюкозида, цианидин-3,5-ди-глюкозида, дельфинидин-3-глюкозида, дельфинидин-3-галактозида и мальвидин-3-глюкозида (Sharma N. et al., 2020; Shamanin et al., 2024). В БЗ и КЗ сортах пшеницы в небольшой концентрации присутствуют производные цианидина, дельфинидина, мальвидина и пеонидина, наибольшее содержание имеет цианидин-3-глюкозид (Ficco et al., 2014; Garg et al., 2016; Sharma N. et al., 2020). Более подробную информацию об антоциановых гликозидах в зерне с различной окраской можно найти в табл. S2 Приложения.

Генетические особенности обуславливают индивидуальный антоциановый профиль сорта (Abdel-Aal, Hucl, 2003). На состав АЦ влияют также используемое для помола зерна оборудование, технология извлечения и количественного анализа АЦ. Содержание АЦ зависит от внешних факторов, таких как температура в период налива зерна, засуха, поражение болезнями (Garg et al., 2022). Abdel-Aal и Hucl (2003) пришли к выводу, что в течение трех лет выращивания внешние факторы оказывают меньшее влияние на содержание АЦ у ГЗ пшеницы, чем у ФЗ, что может объясняться различиями в расположении пигментов. Содержание АЦ увеличивается во время развития зерна и при уменьшении в два раза числа колосков в колосе (Bustos et al., 2012). Снижение АЦ наблюдается при затенении растений до начала кущения, перед созреванием и при дистальном положении зерен в колосе. Применение магниевых удобрений в период вегетации и ранняя уборка увеличивали содержание АЦ в ФЗ на 65 и 39 % соответственно. Накопление АЦ у ФЗ пшеницы повышалось при выращивании в условиях недостатка азота (Fan et al., 2020) и поздних сроках посева (Beleggia et al., 2021).

## Содержание фенольных соединений в окрашенном зерне пшеницы

Фенольные соединения являются вторичными метаболитами, играющими важную роль в механизмах защиты растений от ультрафиолетового излучения, подавлении патогенов и обеспечении структурной целостности клеточной стенки. Среди ФС наиболее распространенный класс – фенольные кислоты (ФК) (Laddomada et al., 2017), которые состоят из фенольного кольца и функциональной группы карбоновой кислоты. С химической точки зрения обнаруженные в зерне пшеницы ФК можно разделить на производные гидроксибензойной кислоты (ванильная, сирингиновая, п-гидроксибензойная, галловая, салициловая, протокатеховая, эллаговая и гентизиновая, которые имеют С6-С1 структуру) и гидроксикоричной кислоты (феруловая, коричная, кумаровая, кофейная, синаповая – ароматические соединения с трехуглеродной боковой цепью С6-С3) (табл. S3 Приложения). Отдельные соединения в каждой из этих групп отличаются друг от друга наличием и строением боковых радикалов.

ФК встречаются в трех различных формах: нерастворимой связанной эфирными и эфирно-эфирными связями с компонентами клеточной стенки, такими как целлюлоза, арабиноксилан, лигнин и белки (в среднем около 50–70 %), растворимой конъюгированной с сахарами или другими низкомолекулярными компонентами (13–20 %) и растворимой свободной (0.5–2.0 %) (Menga et al., 2023).

Общее содержание растворимых и нерастворимых ФС зерна пшеницы с различной окраской возрастает в следующем порядке: белое < фиолетовое < голубое < черное (Kumari et al., 2020; Paznocht et al., 2020), причем в окрашенном зерне содержание ФС в 4–6 раз выше по сравнению с неокрашенным (Sharma S. et al., 2018; Kumari et al., 2020; Wang et al., 2020; Garg et al., 2022; Shamanin et al., 2022; Sahu et al., 2023). В целом, независимо от окраски зерна, больше всего фенольных кислот, так же как и АЦ, находится в оболочках зерна, которые удаляются при помолу, и только при употреблении продуктов из цельнозерновой муки можно получить всю возможную пользу. Количественное содержание растворимых и нерастворимых ФС в зерне пшеницы с различной окраской представлено в табл. S4 Приложения.

Феруловая кислота является наиболее распространенным соединением в зерне пшеницы, составляя в среднем 65.0–94.9 % всех нерастворимых связанных ФС (Ma et al., 2021). Количественное содержание отдельных фенольных кислот в свободном и связанном виде может варьировать в широких пределах в зависимости от генотипа, что было показано в работах различных авторов. ФЗ имеет более высокое содержание растворимых и нерастворимых ФК, включая феруловую, ванилиновую и кофейную, чем БЗ и КЗ (Ma et al., 2016).

Изучение содержания свободных ФК во фракциях отрубей показало, что максимальное значение было характерно для ФЗ – 636–1140 мкг/г (GAE, gallic acid equivalent), а у ГЗ и ЧЗ – 476–874 и 495–590 мкг/г соответственно. Наибольшее содержание у всех образцов имели галловая (29–33 мкг/г), феруловая и изоферуловая (59–66 мкг/г) и салициловая (30–65 мкг/г) кислоты (Zhang et al., 2018). Среди связанных ФК наиболее высокие значения имели

феруловая (от 1726 мкг/г в ЧЗ до 2620 мкг/г в ГЗ) и салициловая (от 535 мкг/г в ГЗ до 906 мкг/г в ЧЗ). В целом содержание ФК как в свободной, так и в связанной форме и АОА постепенно снижалось в следующем порядке: внешние отруби > грубые отруби > шорты.

Общее содержание ФС варьировало у КЗ сортов от 446 до 708 мкг/100 г (GAE) (189–271 и 227–487 мкг/100 г свободных и связанных соответственно), у ГЗ линий – 457 и 767 мкг/100 г (204 и 247 мкг/100 г; 253 и 520 мкг/100 г), у ФЗ – 353–772 мкг/100 г (164–248 и 190–431 мкг/100 г) и 476–520 мкг/100 г (190–218 и 259–323 мкг/100 г) у ЧЗ линий (Shamanin et al., 2022). В связанных фракциях некоторых образцов ФЗ пшеницы, так же как и у гибридов F<sub>4</sub> с ЧЗ, наибольшие значения приходились на феруловую и синаповую кислоты: 307–582 и 277–619 мкг/г ФЗ, 257–424 и 272–450 мкг/г ЧЗ, у ряда образцов преобладали эллаговая или протокатеховая (31–89 и 90–157 мкг/г) кислоты. В свободной фракции присутствовали преимущественно галловая и протокатеховая, а у ряда образцов ФЗ пшеницы – эллаговая кислота.

В свободной фракции отрубей из ФЗ преобладала ванильная (20.3–34.2 мкг/г) и транс-феруловая (8.4–20.2 мкг/г) кислоты, а в связанной – цис- и транс-феруловая (245.1–304.6 мкг/г), п-кумаровая (8.8–9.9 мкг/г) и ванильная (6.5–7.2 мкг/г) (Bueno-Herrera, Pérez-Magariño, 2020). Более высокое содержание ФС было характерно для фракции мелких отрубей с диаметром частиц 200–800 мкм, чем для фракции грубых отрубей (800–2000 мкм) и муки. Количество феруловой кислоты во фракции ГЗ отрубей было выше, чем во фракциях ФЗ и КЗ (2264, 1945 и 988 мкг/100 г соответственно) (Geyik et al., 2023). В свободных фракциях у КЗ преобладала п-кумаровая (11.5 мкг/100 г), а у ФЗ и ГЗ пшеницы – эллаговая кислота (14.7 и 11.5 мкг/100 г соответственно).

Изучение динамики содержания фенольных кислот в БЗ, КЗ и ФЗ показало, что максимальный уровень феруловой и сиригиневой кислот наблюдался через 14 дней после цветения, уровень п-кумаровой и кофейной кислот достигал максимума через 7 дней, а уровень ванилиновой кислоты увеличивался постепенно во время налива зерна и достигал максимума на стадии спелости (35 дней после цветения) (Ma et al., 2016). У БЗ пшеницы содержание фенольных кислот и экспрессия ряда генов пути биосинтеза фенольных кислот (*TaPAL1*, *TaPAL2*, *TaC3H1*, *TaC3H2*, *TaC4H*, *Ta4CL1*, *Ta4CL2*, *TaCOMT1* и *TaCOMT2*) были выше на ранней стадии налива зерна, а у ФЗ, напротив, на более поздних стадиях.

### Антиоксидантная активность окрашенных зерен

Антиоксиданты обладают способностью нейтрализовать свободные радикалы, которые приводят к повреждению клеточных структур. К соединениям, содержащимся в зерне пшеницы и проявляющим наиболее высокую АОА, относятся АЦ, ФК, флавоны и флавонолы. Для оценки АОА зерна *in vitro* и *in vivo* используется ряд методов. DPPH (2,2-дифенил-1-пикрилгидразил) основан на регистрации восстановления радикалов DPPH при взаимодействии с антиоксидантами, ABTS (2,2'-азинобис-(3-этилбензотиазолин-6-сульфокислота)) – на умень-

шении интенсивности поглощения катионами радикала ABTS, ORAC (oxygen radicals absorbance capacity) – на способности перехватывать пероксильные радикалы, FRAP (ferric reducing antioxidant power) – на восстановлении иона железа Fe(III) до Fe(II) в составе комплекса 2,4,6-3(2-пиридил)-1,3,5-триазин, CUPRAC (cupric reducing antioxidant capacity) – на изменении оптической плотности в реакции восстановления Cu<sup>2+</sup> до Cu<sup>+</sup>, PCL – на регистрации хемилюминесценции (Ma et al., 2016; Abdel-Aal et al., 2018; Sharma S. et al., 2018; Shamanin et al., 2024). АОА окрашенного зерна пшеницы по сравнению с неокрашенным в основном связана с более высоким содержанием в нем АЦ. Они определяют 69 % общей способности к поглощению свободных радикалов у ГЗ пшеницы (Hu et al., 2007), 19 % приходится на ФК, а вклад связанных значительно выше, чем свободных (Zhang et al., 2018; Shamanin et al., 2022). Среди всех АЦ наиболее сильной АОА обладает цианидин-3-глюкозид, который в 3.5 раза сильнее, чем тролокс (аналог витамина Е).

Пшеницы с ГЗ, ФЗ и ЧЗ имеют более высокие показатели АОА по сравнению с БЗ и КЗ (Ficco et al., 2014; Ma et al., 2016; Sharma S. et al., 2018; Kumari et al., 2020; Wang et al., 2020). Наиболее высокие значения АОА, определенные методами ABTS и DPPH, характерны для ЧЗ; затем АОА, содержание АЦ и ФС убывают в последовательности голубое > фиолетовое > белое зерно (Kumari et al., 2020; Sharma A. et al., 2023). В табл. S5 Приложения приведены значения АОА зерна с различной окраской, определенные с использованием разных методов. Поскольку соединения, обладающие антиоксидантными свойствами, находятся преимущественно во фракции отрубей, то АОА отрубей значительно выше, чем цельного зерна (Siebenhandl et al., 2007; Abdel-Aal et al., 2018; Iannucci et al., 2022; Saini et al., 2023). Показано, что АОА муки супертонкого помола превышала в 1.18 и 1.62 раза таковую у муки грубого помола (ABTS и ORAC) (Jiang Y. et al., 2024). Наблюдалась положительная корреляция между количеством ФС в муке и АОА ( $r = 0.769$  (ABTS) и  $r = 0.984$  (FRAP)) (Li Y. et al., 2015), ФС и ABTS ( $r = 0.97$ ) (Ficco et al., 2014), растворимых ФС и DPPH ( $r = 0.65$ ) (Sharma S. et al., 2018). Значимые положительные корреляции обнаружены также между содержанием АЦ и АОА (PCL) ( $r = 0.9$ ) (Sharma S. et al., 2018), отдельными антоцианами и ABTS ( $r = 0.65–0.91$ ) (Shamanin et al., 2024).

### Достижения селекции мягкой пшеницы в России в получении сортов с окрашенным зерном

В России работа над получением перспективных селекционных линий и сортов пшеницы с окрашенным зерном активно ведется в нескольких научных учреждениях. К настоящему времени прошли конкурсное сортоиспытание и включены в реестр селекционных достижений три сорта мягкой пшеницы с ФЗ: Надира (ФИЦ КазНЦ РАН, 2022 г.), Памяти Коновалова (ФНЦ зернобобовых и крупяных культур и РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023 г.) и Эф 22 (ОмГАУ им. П.А. Столыпина, 2024 г.). Эти сорта характеризуются высоким содержанием АЦ и повышенной АОА и поэтому могут использоваться для производства функциональных продуктов питания. Сорт Надира получен методом индивидуального отбора из

гибридной популяции F<sub>3</sub> Л.22-95 / Kommissar (Василова и др., 2021). Л.22-95, созданная в Сибирском НИИСХ, являлась донором фиолетовой окраски зерна. Сорт среднеспелый, рекомендован для возделывания в Волго-Вятском, Средневолжском и Уральском регионах. Средняя урожайность в конкурсном сортоиспытании за 2016–2018 гг. составила 4.8 т/га (у стандарта Йолдыз – 4.7 т/га). Устойчив к пыльной головне, средневосприимчив к бурой ржавчине и мучнистой росе. По засухоустойчивости – на уровне стандартных сортов. По содержанию белка в зерне (13.8 %), сырой клейковины (25.5 %) и хлебопекарным качествам соответствует требованиям, предъявляемым к ценным сортам.

Сорт Памяти Коновалова создан методом индивидуального отбора из гибридной популяции (Laval 19 × Гранни) × Гранни. Донором фиолетовой окраски служил Laval 19 (Канада). Сорт является среднеспелым и рекомендован для возделывания в Московской области. Урожайность зерна с делянки в 2020–2021 гг. составила 451 и 284 г/м<sup>2</sup> (у стандарта Злата – 593 и 408 г/м<sup>2</sup>). Хлебопекарные качества удовлетворительные и хорошие, хороший филлер. Устойчив к полеганию, септориозу и фузариозу колоса, среднеустойчив к бурой ржавчине (Рубец и др., 2022).

Сорт Иволга фиолетовая (РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева) является изогенной F<sub>3</sub> линией сорта Иволга. Среднеспелый сорт. Урожайность зерна с делянки в 2020–2021 гг. составила 417 и 358 г/м<sup>2</sup> – ниже, чем у сорта Злата. Устойчив к полеганию, бурой ржавчине и мучнистой росе, восприимчив к фузариозу и септориозу (Рубец и др., 2022).

В ОмГАУ им. П.А. Столыпина совместно с ИЦиГ СО РАН в результате скрещивания линий сорта С29 с генами *Va* и *Pp* с сортами сибирской селекции Элемент 22 (количество Zn более 50 мг/кг), Айна, Тобольская и линией BW49880 (CIMMYT, высокое содержание Zn) получен ряд перспективных линий (Gordeeva et al., 2020; Shamanin et al., 2022). Эти линии характеризуются высоким уровнем АЦ (максимальное значение 254 и 326 мкг/100 г у F<sub>4</sub> с F<sub>3</sub> и ЧЗ на основе BW 49880), ФС (767 и 599–772 мг/100 г (GAE); 520 и 427–566 мг/100 г общих и связанных ФК у F<sub>3</sub> линии Blue 10 (s:C29 4Th(4D)/Элемент 22) и F<sub>3</sub> гибридов BC<sub>1</sub>F<sub>4</sub>–BC<sub>1</sub>F<sub>5</sub> по сорту Элемент 22 соответственно), Zn (44.5–56.5 мг/кг) и Fe (53.5–65.5 мг/кг) и высокой АОА (482–494 мг TE/100 г (trolox equivalent) для F<sub>3</sub> линий BC<sub>1</sub>F<sub>8</sub> сорта Тобольская и F<sub>4</sub> по сорту Элемент 22 и линии BW 49880 (CUPRAC)) (Shamanin et al., 2022, 2024).

Сорт ЭФ 22 создан за шесть лет с помощью маркеропосредованной селекции (SSR маркеры, фланкирующие гены *Pp-D1* и *Pp3*) (Gordeeva et al., 2020). Донором фиолетовой окраски для этого сорта послужила линия i:C29<sup>PF</sup> (интрогрессии от Purple Feed) (Arbuzova et al., 1998). ЭФ 22 включен в государственный реестр по Уральскому и Западно-Сибирскому регионам. Среднепоздний, ценный по качеству. Средняя урожайность за 2016–2020 гг. составила 3.12 т/га, у сорта Элемент 22 – 3.89 т/га (Потоцкая и др., 2022). Изучение характеристик хлеба, приготовленного из цельнозерновой муки ЭФ 22, селекционных линий Blue 10 и Purple 8 (Элемент 22\*2/i:C29<sup>PF</sup>), показало более высокое содержание ФС и АОА, более низкий гликемический индекс по сравнению с хлебом из белой пшеницы (Koksel et al., 2023).

## Заключение

В обзоре суммирована информация о генетическом контроле регуляции биосинтеза и накопления АЦ в перикарпе и алейроновом слое с участием генов *Va*, *Pp-1* и *Pp3*. Представлена характеристика пшеницы с различной окраской зерна по содержанию АЦ, ФС и АОА. Для F<sub>3</sub>, F<sub>3</sub> и ЧЗ характерны более высокий уровень АЦ, ФС и АОА, чем для неокрашенного зерна. Количество АЦ, растворимых и нерастворимых ФС и показатели АОА возрастают в следующем порядке: F<sub>3</sub> > F<sub>3</sub> > ЧЗ. F<sub>3</sub> и ЧЗ имеют более разнообразный состав АЦ по сравнению с F<sub>3</sub>. Полученные отечественными селекционерами сорта с окрашенным зерном являются источником биоактивных соединений, играющих важную роль в профилактике заболеваний, и могут служить основой развития отрасли антоциан-биофортифицированных продуктов питания на внутреннем рынке и повышения стоимости экспортируемой зерновой продукции.

## Список литературы / References

- Арбузова В.С., Бадаева Е.Д., Ефремова Т.Т., Осадчая Т.С., Трубачеева Н.В., Добровольская О.Б. Цитогенетическое изучение голубозерной линии мягкой пшеницы сорта Саратовская 29. *Генетика*. 2012;48(8):926-933
- [Arbuzova V.S., Badaeva E.D., Efremova T.T., Osadchaia T.S., Trubacheva N.V., Dobrovol'skaia O.B. A cytogenetic study of the blue-grain line of the common wheat cultivar Saratovskaya 29. *Russ. J. Genet.* 2012;48(8):785-791. doi 10.1134/S102279541205002X]
- Василова Н.З., Асхадуллин Д.Ф., Асхадуллин Д.Ф., Багавиева Э.З., Тазутдинова М.Р., Хусайнова 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.F., Bagavieva E.Z., Tazutdinova M.R., Khusainova I.I. Violet-green variety of spring soft wheat Nadira. *Zernobobovye i Krupnye Kul'tury = Legumes Groat Crops*. 2021;4(40):66-75. doi 10.24412/2309-348X-2021-4-66-75 (in Russian)]
- Потоцкая И.В., Нардин Д.С., Юркинсон А.В., Потоцкая А.А., Шаманин В.П. Перспективы «цветной пшеницы» для функционального питания. В: Сб. статей междунар. научн.-практ. конф. «Вавиловские чтения – 2022», Саратов, 22–25 нояб. 2022 г. Саратов, 2022;190-194
- [Pototskaya I.V., Nardin D.S., Yurkinson A.V., Pototskaya A.A., Shamanin V.P. Prospects of “colored wheat” for functional nutrition. In: Abstracts from the Int. conf. “Vavilov Readings – 2022”. Nov. 22–25, 2022. Saratov, Russia, 2022;190-194 (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. *Международ. с.-х. журн.* 2022;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'skokhozyaystvennyi Zhurnal = Int. Agric. J.* 2022;5:525-529. doi 10.55186/25876740\_2022\_65\_5\_525 (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 Selekcii = Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2017;21(5):545-553. doi 10.18699/VJ17.25-o (in Russian)]
- Abdel-Aal E.S.M., Hucl P. Composition and stability of anthocyanins in blue-grained wheat. *J. Agric. Food Chem.* 2003;51(8):2174-2180. doi 10.1021/jf021043x
- Abdel-Aal E.S.M., Young J.C., Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *J. Agric. Food Chem.* 2006;54(13):4696-4704. doi 10.1021/jf0606609
- Abdel-Aal E.S.M., Hucl P., Shipp J., Rabalski I. Compositional differences in anthocyanins from blue- and purple-grained spring wheat grown in four environments in central Saskatchewan. *Cereal Chem.* 2016;93(1):32-38. doi 10.1094/cchem-03-15-0058-R
- Abdel-Aal E.S.M., Hucl P., Rabalski I. Compositional and antioxidant properties of anthocyanin-rich products prepared from purple wheat. *Food Chem.* 2018;254:13-19. doi 10.1016/j.foodchem.2018.01.170
- Arbuzova V.S., Maystrenko O.I., Popova O.M. Development of near-isogenic lines of the common wheat cultivar 'Saratovskaya 29'. *Cereal Res. Commun.* 1998;26:39-46. doi 10.1007/BF03543466
- Bartl P., Albrecht A., Skrt M., Tremlová B., Ošádalová M., Šmejkal K., Vovk I., Ulrih N.P. Anthocyanins in purple and blue wheat grains and in resulting bread: quantity, composition, and thermal stability. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 2015;66(5):514-519. doi 10.3109/09637486.2015.1056108
- Beleggia R., Ficco D.B.M., Pecorella I., De Vita P., Nigro F.M., Giovanniello V., Colecchia S.A. Effect of sowing date on bioactive compounds and grain morphology of three pigmented cereal species. *Agronomy*. 2021;11(3):591. doi 10.3390/agronomy11030591
- Bueno-Herrera M., Pérez-Magariño S. Validation of an extraction method for the quantification of soluble free and insoluble bound phenolic compounds in wheat by HPLC-DAD. *J. Cereal Sci.* 2020; 93:102984. doi 10.1016/j.jcs.2020.102984
- Burešová V., Kopecký D., Bartoš J., Martinek P., Watanabe N., Vyhnanek T., Doležel J. Variation in genome composition of blue-aleurone wheat. *Theor. Appl. Genet.* 2015;128(2):273-282. doi 10.1007/s00122-014-2427-3
- Bustos D.V., Riegel R., Calderini D.F. Anthocyanin content of grains in purple wheat is affected by grain position, assimilate availability and agronomic management. *J. Cereal Sci.* 2012;55(3):257-264. doi 10.1016/j.jcs.2011.12.001
- Dhua S., Kumar K., Kumar Y., Singh L., Sharanagat V.S. Composition, characteristics and health promising prospects of black wheat: a review. *Trends Food Sci. Technol.* 2021;112:780-794. doi 10.1016/j.tifs.2021.04.037
- Eticha F., Grausgruber H., Siebenhandl-Ehn S., Berghofer E. Some agronomic and chemical traits of blue aleurone and purple pericarp wheat (*Triticum* L.). *J. Agric. Sci. Technol.* 2011;1:48-58
- Fan X., Xu Z., Wang F., Feng B., Zhou Q., Cao J., Ji G., Yu Q., Liu X., Liao S., Wang T. Identification of colored wheat genotypes with suitable quality and yield traits in response to low nitrogen input. *PLoS One*. 2020;15(4):0229535. doi 10.1371/journal.pone.0229535
- Ficco D.B.M., De Simone V., Colecchia S.A., Pecorella I., Platani C., Nigro F., Finocchiaro F., Papa R., De Vita P. Genetic variability in anthocyanin composition and nutritional properties of blue, purple, and red bread (*Triticum aestivum* L.) and durum (*Triticum turgidum* L. ssp. *turgidum* convar. *durum*) wheats. *J. Agric. Food Chem.* 2014;62(34):8686-8695. doi 10.1021/jf5003683
- 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
- Gamel T.H., Muhammad S., Saeed G., Ali R., Abdel-Aal E.S.M. Purple wheat: food development, anthocyanin stability, and potential health benefits. *Foods*. 2023;12(7):1358. doi 10.3390/foods12071358
- Garg M., Chawla M., Chunduri V., Kumar R., Sharma S., Sharma N.K., Kaur N., Kumar A., Munday J.K., Saini M.K., Singh S.P. Transfer of grain colors to elite wheat cultivars and their characterization. *J. Cereal Sci.* 2016;71:138-144. doi 10.1016/j.jcs.2016.08.004
- Garg 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
- Geyik Ö.G., Tekin-Cakmak Z.H., Shamanin V.P., Karasu S., Pototskaya I.V., Shepelev S.S., Chursin A.S., Morgounov A.I., Yaman M., Sagdic O., Koksels H. Effects of phenolic compounds of colored wheats on colorectal cancer cell lines. *Qual. Assur. Saf. Crop. Foods*. 2023;15(4):21-31. doi 10.15586/qas.v15i4.1354
- Gordeeva E.I., Shioeva O.Y., Khlestkina E.K. Marker-assisted development of bread wheat near-isogenic lines carrying various combinations of purple pericarp (*Pp*) alleles. *Euphytica*. 2015;203(2): 469-476. doi 10.1007/S10681-014-1317-8/FIGURES/2
- Gordeeva E., Shamanin V., Shioeva O., Kukoeva T., Morgounov A., Khlestkina E. The strategy for marker-assisted breeding of anthocyanin-rich spring bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars in Western Siberia. *Agronomy*. 2020;10(10):1603. doi 10.3390/agronomy10101603
- Gordeeva E., Shioeva O., Mursalimov S., Adonina I., Khlestkina E. Fine points of marker-assisted pyramiding of anthocyanin biosynthesis regulatory genes for the creation of black-grained bread wheat (*Triticum aestivum* L.) lines. *Agronomy*. 2022;12(12):2934. doi 10.3390/agronomy12122934
- Granda L., Rosero A., Benešová K., Pluháčková H., Neuwirthová J., Cerkal R. Content of selected vitamins and antioxidants in colored and nonpigmented varieties of quinoa, barley, and wheat grains. *J. Food Sci.* 2018;83(10):2439-2447. doi 10.1111/1750-3841.14334
- Himi E., Maekawa M., Miura H., Noda K. Development of PCR markers for *Tamyb10* related to *R-1*, red grain color gene in wheat. *Theor. Appl. Genet.* 2011;122(8):1561-1576. doi 10.1007/s00122-011-1555-2
- Hosseini F.S., Li W., Beta T. Measurement of anthocyanins and other phytochemicals in purple wheat. *Food Chem.* 2008;109(4):916-924. doi 10.1016/j.foodchem.2007.12.083
- Hu C., Cai Y.Z., Li W., Corke H., Kitts D.D. Anthocyanin characterization and bioactivity assessment of a dark blue grained wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Hedong Wumai) extract. *Food Chem.* 2007; 104(3):955-961. doi 10.1016/j.foodchem.2006.12.064
- Iannucci A., Suriano S., Cancellaro S., Trono D. Anthocyanin profile and main antioxidants in pigmented wheat grains and related mill-stream fractions. *Cereal Chem.* 2022;99(6):1282-1295. doi 10.1002/cche.10591
- Jiang W., Liu T., Nan W., Jeewani D.C., Niu Y., Li C., Wang Y., Shi X., Wang C., Wang J., Li Y., Gao X., Wang Z. Two transcription factors *TaPpm1* and *TaPpb1* co-regulate anthocyanin biosynthesis in purple pericarps of wheat. *J. Exp. Bot.* 2018;69(10):2555-2567. doi 10.1093/jxb/ery101
- Jiang Y., Qi Z., Li J., Gao J., Xie Y., Henry C.J., Zhou W. Role of superfine grinding in purple-whole-wheat flour. Part I: Impacts of size reduction on anthocyanin profile, physicochemical and antioxidant properties. *LWT*. 2024;197:115940. doi 10.1016/j.lwt.2024.115940
- Khlestkina E.K., Röder M.S., Börner A. Mapping genes controlling anthocyanin pigmentation on the glume and pericarp in tetraploid wheat (*Triticum durum* L.). *Euphytica*. 2010;171(1):65-69. doi 10.1007/s10681-009-9994-4
- Koksels H., Cetiner B., Shamanin V.P., Tekin-Cakmak Z.H., Pototskaya I.V., Kahraman K., Sagdic O., Morgounov A.I. Quality, nutritional properties, and glycemic index of colored whole wheat breads. *Foods*. 2023;12(18):3376. doi 10.3390/foods12183376
- Kumari A., Sharma S., Sharma N., Chunduri V., Kapoor P., Kaur S., Goyal A., Garg M. Influence of biofortified colored wheats (purple, blue, black) on physicochemical, antioxidant and sensory characteristics of chapatti (indian flatbread). *Molecules*. 2020;25(21):5071. doi 10.3390/molecules25215071

- Laddomada B., Caretto S., Mita G. Wheat bran phenolic acids: bioavailability and stability in whole wheat-based foods. *Molecules*. 2015;20(9):15666-15685. doi 10.3390/molecules200915666
- Laddomada B., Durante M., Mangini G., D'Amico L., Lenucci M.S., Simeone R., Piarulli L., Mita G., Blanco A. Genetic variation for phenolic acids concentration and composition in a tetraploid wheat (*Triticum turgidum* L.) collection. *Genet. Resour. Crop Evol.* 2017; 64(3):587-597. doi 10.1007/s10722-016-0386-z
- Li N., Li S., Zhang K., Chen W., Zhang B., Wang D., Liu D., Liu B., Zhang H. *TbMYC4E*, candidate *Blue aleurone 1* gene controlling the associated trait in *Triticum aestivum*. *PLoS One*. 2017;12(7):0181116. doi 10.1371/journal.pone.0181116
- Li Y., Ma D., Sun D., Wang C., Zhang J., Xie Y., Guo T. Total phenolic, flavonoid content, and antioxidant activity of flour, noodles, and steamed bread made from different colored wheat grains by three milling methods. *Crop J.* 2015;3(4):328-334. doi 10.1016/j.cj.2015.04.004
- Liu X., Zhang M., Jiang X., Li H., Jia Z., Hao M., Jiang B., Huang L., Ning S., Yuan Z., Chen Xuejiao, Chen Xue, Liu D., Liu B., Zhang L. *TbMYC4A* is a candidate gene controlling the blue aleurone trait in a wheat-triticum boeoticum substitution line. *Front. Plant Sci.* 2021; 12:762265. doi 10.3389/fpls.2021.762265
- Liu Xin, Feng Z., Liang D., Zhang M., Liu Xiaojuan, Hao M., Liu D., Ning S., Yuan Z., Jiang B., Chen Xuejiao, Chen Xue, Zhang L. Development, identification, and characterization of blue-grained wheat – *Triticum boeoticum* substitution lines. *J. Appl. Genet.* 2020; 61(2):169-177. doi 10.1007/s13353-020-00553-9
- Ma D., Li Y., Zhang J., Wang C., Qin H., Ding H., Xie Y., Guo T. Accumulation of phenolic compounds and expression profiles of phenolic acid biosynthesis-related genes in developing grains of white, purple, and red wheat. *Front. Plant Sci.* 2016;7:185202. doi 10.3389/fpls.2016.00528
- Ma D., Wang C., Feng J., Xu B. Wheat grain phenolics: a review on composition, bioactivity, and influencing factors. *J. Sci. Food Agric.* 2021;101(15):6167-6185. doi 10.1002/JSCA.11428
- Menga V., Giovanniello V., Savino M., Gallo A., Colecchia S.A., De Simone V., Zingale S., Ficco D.B.M. Comparative analysis of qualitative and bioactive compounds of whole and refined flours in durum wheat grains with different year of release and yield potential. *Plants*. 2023;12(6):1350. doi 10.3390/plants12061350
- Mohammadi N., Farrell M., O'Sullivan L., Langan A., Franchin M., Azevedo L., Granato D. Effectiveness of anthocyanin-containing foods and nutraceuticals in mitigating oxidative stress, inflammation, and cardiovascular health-related biomarkers: a systematic review of animal and human interventions. *Food Funct.* 2024;15(7):3274-3299. doi 10.1039/d3fo04579j
- Paznoch L., Kotíková Z., Burešová B., Lachman J., Martinek P. Phenolic acids in kernels of different coloured-grain wheat genotypes. *Plant Soil Environ.* 2020;66(2):57-64. doi 10.17221/380/2019-PSE
- Razgonova M.P., Zakharenko A.M., Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Antonova E.V., Pikula K.S., Koval L.A., Khlestkina E.K., Golokhvast K.S. Phytochemical analysis of phenolics, sterols, and terpenes in colored wheat grains by liquid chromatography with tandem mass spectrometry. *Molecules*. 2021;26(18):5580. doi 10.3390/molecules26185580
- Sahu R., Mandal S., Das P., Ashraf G.J., Dua T.K., Paul P., Nandi G., Khanra R. The bioavailability, health advantages, extraction method, and distribution of free and bound phenolics of rice, wheat, and maize: a review. *Food Chem. Adv.* 2023;3:100484. doi 10.1016/j.focha.2023.100484
- Saini P., Kumar N., Kumar S., Panghal A., Atkan A.K. Analysis of engineering properties, milling characteristics, antioxidant potential, and nutritional benefits of purple wheat and its bran. *Food Bioeng.* 2023;2(4):406-419. doi 10.1002/fbe2.12073
- Shamanin V.P., Tekin-Cakmak 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
- Shamanin V.P., Tekin-Cakmak Z.H., Karasu S., Pototskaya I.V., Gordeeva E.I., Verner A.O., Morgounov A.I., Yaman M., Sagdic O., Koksel H. Antioxidant activity, anthocyanin profile, and mineral compositions of colored wheats. *Qual. Assur. Saf. Crop. Foods*. 2024;16(1):98-107. doi 10.15586/qas.v16i1.1414
- 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 N., Tiwari V., Vats S., Kumari A., Chunduri V., Kaur S., Kapoor P., Garg M. Evaluation of anthocyanin content, antioxidant potential and antimicrobial activity of black, purple and blue colored wheat flour and wheat-grass juice against common human pathogens. *Molecules*. 2020;25(24):5785. doi 10.3390/molecules25245785
- 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
- Shen Y., Shen J., Dawadondup, Zhuang L., Wang Y., Pu J., Feng Y., Chu C., Wang X., Qi Z. Physical localization of a novel blue-grained gene derived from *Thinopyrum bessarabicum*. *Mol. Breed.* 2013; 31(1):195-204. doi 10.1007/s11032-012-9783-y
- 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
- Siebenhandl S., Gausgruber H., Pellegrini N., Del Rio D., Fogliano V., Pernice R., Berghofer E. Phytochemical profile of main antioxidants in different fractions of purple and blue wheat, and black barley. *J. Agric. Food Chem.* 2007;55(21):8541-8547. doi 10.1021/jf072021j
- Singh K., Ghai M., Garg M., Chhuneja P., Kaur P., Schnurbusch T., Keller B., Dhaliwal H.S. An integrated molecular linkage map of diploid wheat based on a *Triticum boeoticum* × *T. monococcum* RIL population. *Theor. Appl. Genet.* 2007;115:301-312. doi 10.1007/s00122-007-0543-z
- Tereschenko O., Gordeeva E., Arbuzova V., Börner A., Khlestkina E. The D genome carries a gene determining purple grain colour in wheat. *Cereal Res. Commun.* 2012;40(3):334-341. doi 10.1556/crec.40.2012.3.2
- Tian S., Chen Z., Wei Y. Measurement of colour-grained wheat nutrient compounds and the application of combination technology in dough. *J. Cereal Sci.* 2018;83:63-67. doi 10.1016/j.jcs.2018.07.018
- Varga M., Bánhid J., Cseuz L., Matuz J. The anthocyanin content of blue and purple coloured wheat cultivars and their hybrid generations. *Cereal Res. Commun.* 2013;41(2):284-292. doi 10.1556/crec.41.2013.2.10
- Wang X., Zhang X., Hou H., Ma X., Sun S., Wang H., Kong L. Metabolomics and gene expression analysis reveal the accumulation patterns of phenylpropanoids and flavonoids in different colored-grain wheats (*Triticum aestivum* L.). *Food Res. Int.* 2020;138:109711. doi 10.1016/j.foodres.2020.109711
- Zhang J., Ding Y., Dong H., Hou H., Zhang X. Distribution of phenolic acids and antioxidant activities of different bran fractions from three pigmented wheat varieties. *J. Chem.* 2018;1:459243. doi 10.1155/2018/6459243
- Zheng Q., Li B., Mu S., Zhou H., Li Z. Physical mapping of the blue-grained gene(s) from *Thinopyrum ponticum* by GISH and FISH in a set of translocation lines with different seed colors in wheat. *Genome*. 2006;49(9):1109-1114. doi 10.1139/g06-073

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

Поступила в редакцию 03.06.2024. После доработки 09.09.2024. Принята к публикации 11.09.2024.