

СОДЕРЖАНИЕ АНТОЦИАНОВ В ОБРАЗЦАХ ЗЕРНОВОК ЯЧМЕНЯ И ОВСА ИЗ КОЛЛЕКЦИИ ВИР

Лукина К. А.¹, Шоева О. Ю.², Ковалева О. Н.^{1*}, Лоскутов И. Г.¹

¹Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР), 190000 Россия, г.Санкт-Петербург, ул. Б. Морская, 42, 44

²Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), 630090 Россия, г. Новосибирск, пр.ак. Лаврентьева, 10;

* ✉ o.kovaleva@vir.nw.ru

Актуальность. Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) и овес (*Avena sativa* L.) – зерновые культуры, относящиеся к одним из основных источников питания и кормов в Российской Федерации. Они содержат белки, различные группы витаминов, жиры, углеводы, β-глюканы, минеральные вещества и разнообразные биологически активные соединения, в том числе антоцианы. Антоцианы привлекают все больше внимания в связи с широким спектром полезных свойств для человека. Все это позволяет рассматривать зерно ячменя и овса как потенциально перспективный экономический продукт и компонент функционального питания. Цель данной работы оценить относительное содержание антоцианов в образцах ячменя и овса с различной пигментацией зерновки и цветковых чешуй. **Материалы и методы.** Изучено 32 образца ячменя и 11 образцов овса спектрофотометрическим методом. Экстрагирование антоцианов из зерновок ячменя и овса проводилось 1% раствором HCl в метаноле. **Результаты и обсуждение.** В результате изучения выделены образцы и разновидности с наибольшим содержанием антоцианов: ячмень – к-15904 (Китай), к-19906 (Монголия), к-18709 (Япония), к-18723, к-18729 (Канада), к-17725 (Турция), относящиеся к разновидности var. *violaceum*; к-29568 (Япония) – var. *densoviolaceum*; к-8690 (Эфиопия) – var. *griseinigrum*; к-28205 (Германия) – var. *nudidubium*; овес – к-15527 (*A. abyssinica* Hochst. var. *braunii* Koern., Эфиопия) и к-15245 (*A. strigosa* Schreb. subsp. *brevis* var. *tephera* Mordv. ex Sold. et Rod., Польша). **Заключение.** Полученные результаты показывают, что коллекция ВИР включает потенциально ценные образцы для разработки сортов с повышенным содержанием антоцианов, которые могут быть использованы для расширения ассортимента функциональных продуктов.

Ключевые слова: *Hordeum vulgare* L., *Avena sativa* L., антоцианы, спектрофотометрический метод, генетические ресурсы растений

Для цитирования:

Лукина К.А., Шоева О.Ю., Ковалева О.Н., Лоскутов И.Г. Содержание антоцианов в образцах зерновок ячменя и овса из коллекции ВИР. *Биотехнология и селекция растений*. 2021;4(3):5-14. DOI: 10.30901/2658-6266-2021-3-04

Прозрачность финансовой деятельности. Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. **Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.** **Дополнительная информация.** Полные данные этой статьи доступны <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-3-04> **Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы. Все авторы одобрили рукопись. Конфликт интересов отсутствует.**

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования России в рамках соглашения № 075-15-2020-911 от 16.11.2020 о предоставлении гранта в форме субсидий из федерального бюджета на осуществление государственной поддержки создания и развития научного центра мирового уровня «Агротехнологии будущего».

ANTHOCYANIN CONTENT IN GRAINS OF BARLEY AND OAT ACCESSIONS FROM THE VIR COLLECTION

Lukina K. A.¹, Shoeva O. Y.², Kovaleva O. N.^{1*}, Loskutov I. G.¹

¹N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources (VIR),
42, 44 Bolshaya Morskaya Street, St. Petersburg 190000, Russia

² Institute of Cytology and Genetics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICG SB RAS),
10, Acad. Lavrentieva Ave., Novosibirsk 630090, Russia;

*  o.kovaleva@vir.nw.ru

Background. Barley (*Hordeum vulgare* L.) and oat (*Avena sativa* L.) are grain crops belonging to one of the main sources of food and forage in the Russian Federation. They contain proteins, various groups of vitamins, fats, carbohydrates, β -glucans, minerals and different bioactive compounds, including anthocyanins. Recently, much attention has been given to anthocyanins due to their various valuable properties. Therefore, the grain of barley and oat is a potentially promising economic product and a component of functional nutrition. The aim of this work was to estimate the content of anthocyanins in barley and oat accessions with different pigmentation of kernels and lemma. **Materials and methods.** 32 barley and 11 oat accessions were studied by spectrophotometry. Anthocyanins were extracted from barley and oat kernels with a 1% HCl solution in methanol. **Results and discussion.** As a result of the study, accessions and varieties with the highest content of anthocyanins were identified: for barley these are k-15904 (China), k-19906 (Mongolia), k-18709 (Japan), k-18723, k-18729 (Canada), k-17725 (Turkey) belonging to var. *violaceum*; k-29568 (Japan) – var. *densoviolaceum*; k-8690 (Ethiopia) – var. *griseinigrum*; k-28205 (Germany) – var. *nudidubium*; and for oat these are k-15527 (*A. ayssinica* Hochst. var. *braunii* Koern., Ethiopia) and k-15245 (*A. strigosa* Schreb. subsp. *brevis* var. *tephera* Mordv. ex Sold. et Rod., Poland). **Conclusion.** The obtained results demonstrated that the VIR collection includes accessions with potential value for the development of varieties with an increased anthocyanin content, which can be used as functional food products.

Key words: *Hordeum vulgare* L., *Avena sativa* L., anthocyanins, spectrophotometric method, plant genetic resources

For citation:

Lukina K.A., Shoeva O.Y., Kovaleva O.N., Loskutov I.G. Anthocyanin content in grains of barley and oat accessions from the VIR collection. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2021;4(3):5-14. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2021-3-04

Financial transparency. The authors have no financial interest in the presented materials or methods.

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

Extended data is available for this paper at <https://doi.org/10.30901/2658-6266-2021-3-04> **The journal's opinion is neutral to the presented materials, the author, and his or her employer. All authors approved the manuscript. No conflict of interest.**

ORCID ID:

Lukina K.A. <https://orcid.org/0000-0001-5477-8684>

Shoeva O.Y. <https://orcid.org/0000-0001-5289-8631>

Kovaleva O.N. <https://orcid.org/0000-0002-3990-6526>

Loskutov I.G. <https://orcid.org/0000-0002-9250-7225>

УДК 543.4:543.86:547.973:633.16:633.13

Поступила в редакцию: 19.11.2021

Принята к публикации: 15.12.2021

Acknowledgments: The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of Agreement No. № 075-15-2020-911 of 16.11.2020 on providing a grant in the form of subsidies from the federal budget for the implementation of state support for the creation and development of the world-class scientific center “Agrotechnologies for the future”.

Введение

Зерновые культуры являются основными источниками питания и кормов во всем мире, обеспечивая более половины калорий, потребляемых человеком. В последнее время селекция зерновых культур направлена на создание высокопродуктивных сортов с высоким качеством зерна.

Помимо белка, зерно злаков богато жирами, витаминами, макро- и микроэлементами, а также разнообразными биологически активными соединениями (фенольными соединениями, каротиноидами, токоферолами и другими) (Loskutov, Khlestkina, 2021). В последние годы на мировом рынке появилось большое количество новых продуктов из ячменя и овса, предназначенных для диетического питания. Ячмень и овес являются одними из наиболее востребованных и распространенных зерновых культур.

Ячмень (*Hordeum vulgare* L.) – важная продовольственная, кормовая и пивоваренная культура, отличающаяся хорошей адаптивностью к различным условиям выращивания. Зерно ячменя отличается высоким содержанием белков, углеводов, в том числе β-глюканов, минеральных веществ, витаминов А, D, Е, РР, В, фенольных соединений, обладающих антиоксидантной активностью (Shvachko et al., 2021; Francavilla, Joye, 2020). Все это позволяет рассматривать зерно ячменя как перспективный экономический продукт и компонент функционального питания (Yudina et al., 2021).

Овес (*Avena sativa* L.) – зерновая культура, выращиваемая, в основном, для кормовых и пищевых целей. Овес содержит ценные питательные вещества, такие как белки, ненасыщенные жирные кислоты, минералы, липиды, витамины, клетчатку, что объясняет его использование для профилактики распространенных заболеваний (Shvachko et al., 2021).

Все больше привлекают внимание антоцианы основных зерновых культур (Bellido, Beta, 2009) как природные антиоксиданты. Зерно с высоким содержанием этих соединений может быть использовано для разработки новых функциональных пищевых продуктов (Abdel-Aal et al., 2006).

Антоцианы относятся к группе водорастворимых флавоноидов, отвечающих за различную пигментацию тканей растений (Castañeda-Ovando et al., 2009). У ячменя различные части могут иметь антоциановую окраску: листовые пластинки, листовое влагалище, ушки листового влагалища, стебель, ости, жилки колосковой чешуи и зерновки (Lundqvist et al., 2003).

Антоциановые пигменты у овса встречаются намного реже и пока мало изучены, но всходы и стебель ряда сортов несут следы присутствия антоциана (Tikhvinsky, Doronin, 2007). Кроме того, темная окраска (коричневая и серая) цветковых чешуй зерновок овса связана с меланиновым красителем (Varga et al., 2016), также являющегося природным антиоксидантом (Vargach et al., 2017).

Все антоцианы имеют одну и ту же основную структуру, ион флавилия, состоящий из двух ароматиче-

ских кольцевых структур, связанных трехуглеродным гетероциклическим кольцом, содержащим кислород (Francavilla, Joye, 2020). Антоцианидин (форма агликона) является основной структурной единицей антоциана. Добавление боковой цепи сахара приводит к образованию гликозидной формы молекулы антоцианидина, называемой антоцианом (Castañeda-Ovando et al., 2009). Более 23 антоцианидинов и 500 различных антоцианов были идентифицированы и выделены из растений (Riaz et al., 2016).

Профиль антоцианов и их количество варьирует в ячмене в зависимости от генотипа и условий окружающей среды. Антоцианы могут синтезироваться в перикарпе и алейроновом слое зерна, придавая зерну, соответственно, фиолетовую и голубую окраску (Harlan, 1914; Adzhieva et al., 2016). При этом химический состав антоцианов перикарпа и алейронового слоя, разный. В перикарпе преобладает цианидин-3-глюкозид, тогда как в алейроновом слое – дельфинидин-3-глюкозид (Kim et al., 2007; Siebenhandl et al., 2007). Сорта ячменя с фиолетовой и синей окраской зерновки имеют более высокое среднее содержание антоцианов, чем черные и желтые (Siebenhandl et al., 2007). Изучение состава антоцианов сорта ячменя ‘Russia 68’ с пурпурным околоплодником, показало превалирование пеонидин-3-глюкозида (P3G) и цианидин-3-глюкозида (C3G) (Zhang et al., 2017).

В настоящее время наиболее изучена система генов, участвующих в синтезе флавоноидных пигментов. С 1970-х годов в геноме ячменя идентифицированы и локализованы как структурные гены, кодирующие ферменты метаболизма флавоноидов, так и регуляторные гены, определяющие тканеспецифическое накопление данных пигментов в зерновке и вегетативных органах. К настоящему времени выделены нуклеотидные последовательности регуляторных генов *Ant1* и *Ant2*, определяющих накопление антоцианов в перикарпе зерновки, а также генов *HvMpc2*, *HvMyc2*, *HvWD40*, определяющих накопление антоцианов в алейроновом слое зерновки ячменя (Shoeva et al., 2018). Установлено, что ключевые гены синтеза антоцианов в перикарпе ячменя *H. vulgare* *Ant2* и *Ant1* – это гены *bHLH* и *Myb*, которые располагаются на хромосомах 2Н (ген *Myc1*) и 7Н (ген *Mpc1-H1*) в коллинеарных локусах хромосом риса *O. sativa* L. (Strygina, 2020).

Распространение форм ячменя с антоциановой окраской зерновки преимущественно характерно для земледельческих районов Эфиопии и Эритреи, Малой Азии, Сирии, Палестины, Месопотамии и Закавказья (Vavilov, 1967), особенно в высокогорных и предгорных районах, где интенсивность солнечной радиации резко возрастает (Tikhvinsky, 1991).

Антоцианы выполняют большое количество функций в растениях (Nam et al., 2006; Khlestkina, 2013). Подтверждено, что антоцианы обладают антиоксидантными, противовоспалительными (Tsuda et al., 2002), антидиабетическими (Prior, Wu, 2006), противораковыми (Kang

et al., 2003), гипогликемическими (Jurgoński et al., 2008; Grace et al., 2009), нейропротекторными и другими полезными для здоровья человека свойствами (Yudina et al., 2021).

Растительное сырье с высоким содержанием антоцианов перспективно для производства безопасных и эффективных функциональных продуктов (Karaaslan et al., 2011). Антоцианы ячменя привлекают все большее внимание, как доступные для широкого потребителя источники натуральных антиоксидантов, длительно сохраняющие свои свойства (Bellido, Beta, 2009; Yudina et al., 2021).

Мировая коллекция ФИЦ Всероссийского института генетических ресурсов растений им. Н.И. Вавилова (ВИР) насчитывает более 18 тысяч образцов культурного ячменя и более 12 тысяч образцов культурного овса. Генетическое разнообразие коллекции ВИР служит основой для работы многих селекционных учреждений России. Поиск потенциальных источников для расширения ассортимента продуктов здорового питания является

актуальной задачей, а коллекция ВИР может обеспечить ее выполнение.

Целью данной работы было оценить содержание антоцианов в образцах ячменя и овса с различной степенью пигментации зерновки и цветковых чешуй.

Материал и методы

В качестве объекта исследования для определения содержания антоцианов были использованы зерновки образцов ячменя и овса из коллекции ВИР. Образцы характеризовались различной окраской зерновки и цветковых чешуй (табл. 1 и 2). Наибольший интерес представляют зерновки голозерного ячменя разной окраски (Рисунок), так как цветковые чешуи овса и ячменя преимущественно удаляют при переработке и не используют в пищевых целях. Всего было изучено 32 образца ячменя и 11 образцов овса.

Таблица 1. Разновидности ячменя *Hordeum vulgare* L., использованные для изучения

Table 1. Botanical varieties of barley *H. vulgare* L. used in the study

Разновидность/ Botanical varieties	Двурядный/ Многорядный/ 2-row/6-row	Пленчатый/ Голозерный/ covered/naked	Описание/ Description
var. <i>nutans</i> Schubl.	Двурядный	Пленчатый	Колосья и зерновки желтые
var. <i>persicum</i> Koern.	Двурядный	Пленчатый	Колосья черные, ости гладкие, черные или желтовато-серые
var. <i>nudum</i> L.	Двурядный	Голозерный	Колосья желтые, зерновки желтого цвета. Наиболее распространенная разновидность из группы двурядного голозерного ячменя
var. <i>dupialbum</i> Koern.	Двурядный	Голозерный	Колосья желтые, безостые, зерновки желтые,
var. <i>viride</i> Vav. et Orl.	Двурядный	Голозерный	Колосья желтые, зерновки зеленые
var. <i>nudidubium</i> Koern.	Двурядный	Голозерный	Колосья грязно-желто-фиолетовые, зерновки фиолетово-бурые
var. <i>nigrinudum</i> Vav.	Двурядный	Голозерный	Колосья черные и рыхлые, зерновки черные
var. <i>pallidum</i> Ser.	Многорядный	Пленчатый	Колосья и зерновки желтые, встречается повсеместно
var. <i>nigrum</i> (Willd.) Link.	Многорядный	Пленчатый	Колосья и ости черные или серые
var. <i>nigripallidum</i> Regel.	Многорядный	Пленчатый	Колосья черные или серые, ости желтые
var. <i>trifurcatum</i> (Schlecht.) Wender.	Многорядный	Голозерный	Колосья и зерновки желтые, вместо остей все колоски имеют трехлопастные придатки – фурки
var. <i>aethiops</i> Koern.	Многорядный	Голозерный	Колосья черные, вместо остей все колоски имеют трехлопастные придатки – фурки, зерновки буро-черные
var. <i>violaceum</i> Koern.	Многорядный	Голозерный	Колосья желтые, зерновки фиолетовые
var. <i>himalayense</i> (Ritt.) Koern.	Многорядный	Голозерный	Колосья желтые, зерновки зеленые
var. <i>densoviolaceum</i>	Многорядный	Голозерный	Колосья желтые, плотные, зерновки фиолетовые

Разновидность/ Botanical varieties	Двурядный/ Многорядный/ 2-row/6-row	Пленчатый/ Голозерный/ covered/naked	Описание/ Description
var. <i>griseinigrum</i> Vav. et Orl.	Многорядный	Голозерный	Колосья желтые, зерновки черные с буровато-серым оттенком
var. <i>aethiopicum</i> Vav. et Orl.	Многорядный	Голозерный	Колосья и ости черные, зерновки черные
var. <i>nudimelanocrithum</i> Giess. et al.	Многорядный	Голозерный	Колосья черные и черно-коричневые, плотные, зерновки черные
var. <i>tibetanum</i> Vav. et Orl.	Многорядный	Голозерный	Колосья серовато-черные, зерновки темно-коричневые
var. <i>duplinigrum</i> Koern.	Многорядный	Голозерный	Колосья, ости и зерновки черные



Рисунок. Зерновки разновидностей голозерного ячменя из коллекции ВИР

Figure. Kernels of botanical varieties of naked barley from the VIR collection

A – var. *aethiops* Koern.; B – var. *nudum* L.; C – var. *nudidubium* Koern.

Таблица 2. Разновидности овса, использованные для изучения

Table 2. Oat botanical varieties used in the study

Название вида и разновидности/ Species and botanical varieties	Описание/ Description
<i>Avena strigosa</i> Schreb. subsp. <i>brevis</i> var. <i>tephera</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Диплоид. Метелка раскидистая. Цветковые чешуи серые. Колоски остистые.
<i>A. strigosa</i> Schreb. subsp. <i>nudibrevis</i> (Vav.) Kobyl. et Rod. comb. nov.	Диплоид. Зерновка голая, укороченная, слабоволосистая.
<i>A. abyssinica</i> Hochst. var. <i>braunii</i> Koern.	Тетраплоид. Цветковые чешуи коричневые. Колоски остистые.
<i>A. abyssinica</i> Hochst. var. <i>hildebrandtii</i> Koern.	Тетраплоид. Цветковые чешуи серые. Колоски остистые.
<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>culta</i> Thell.	Гексаплоид. Цветковые чешуи красновато-бурые. Колоски остистые.
<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>nigra</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Гексаплоид. Цветковые чешуи черные. Колоски остистые. Характеризуется грубыми цветковыми пленками
<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>ursina</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Гексаплоид. Цветковые чешуи коричневые. Колоски остистые.
<i>A. sativa</i> L. var. <i>affinis</i> Koern.	Гексаплоид. Зерновка голая. Цветковые чешуи коричневые. Колоски остистые.
<i>A. sativa</i> L. var. <i>aurea</i> Koern.	Гексаплоид. Цветковые чешуи желтые.
<i>A. sativa</i> L. var. <i>grisea</i> Koern.	Гексаплоид. Цветковые чешуи серые.
<i>A. sativa</i> L. var. <i>montana</i> Alef.	Гексаплоид. Цветковые чешуи коричневые. Колоски остистые.

Содержание антоцианов определяли спектрофотометрическим методом (Abdel-Aal, Hucl, 1999). Материал измельчали до однородной массы. Экстрагирование антоцианов из зерновок ячменя и овса производили раствором 1% HCl в метаноле (соотношение образца и растворителя 1:5 w/v), с инкубацией при 4°C в течение ночи, с последующим центрифугированием и отбором пробы для измерения. Оптическая плотность антоцианов определяли при длине волны $\lambda=530$ нм, с поправкой на содержание зеленых пигментов – при $\lambda=700$ нм. Измерения проводили на спектрофотометре SmartSpec TM Plus spectrophotometer (Bio-Rad Laboratories, USA). Сумму антоцианов рассчитывали с использованием коэффици-

ента экстинкции¹ равного 25,965 моль⁻¹ см⁻¹ (в пересчете на цианидин-3-глюкозид, мг/кг). Данный коэффициент выбран исходя из ранее опубликованных результатов (Abdel-Aal, Hucl, 1999).

Статистическая обработка данных была проведена с помощью программы IBM SPSS Statistics (версия 21).

Результаты и обсуждение

Средняя концентрация свободных антоцианов в зерновках и цветковых чешуях ячменя и овса в 1% растворе HCl в метиловом спирте (в пересчете на цианидин-3-глюкозид мг/кг) показана в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Общее содержание антоцианов в зерновках ячменя, мг/кг (в пересчете на цианидин-3-глюкозид)

Table 3. Total content of anthocyanins in barley kernels, mg/kg (in terms of cyanidin-3-glucoside)

№ каталога ВИР/ VIR catalogue number	Разновидность/ Botanical variety	Название/ Designation	Происхождение/ Origin	Средняя концентрация свободных антоцианов, мг/кг/ Average concentration of free anthocyanins, mg/kg
25816	<i>viride</i>	Select Bifar C.I.14145	США	5,62±1,29
28650	<i>himalayense</i>	S-281	Мексика	6,89±1,55
31430	<i>nudum</i>	AF Lucius	Чехия	7,58±0,58
24612	<i>trifurcatum</i>	Faust 1	США	8,27±1,96
31430	<i>nudum</i>	AF Lucius	Чехия	8,47±2,02
26860	<i>nigrinudum</i>	C.I.2222-Un3-Un6	США	9,54±2,13
23378	<i>duplinigrum</i>	C.I.10405	Боливия	9,97±0,99
31380	<i>nutans</i>	KWS Harris	Германия	10,40±1,48
22752	<i>Nudimelanocritum</i>	Местный	Эфиопия	10,49±3,13
31390	<i>aethiops</i>	Гранал 32	Челябинская обл.	10,89±1,88
26274	<i>aethiopicum</i>	Местный	Боливия	11,12±4,67
31436	<i>pallidum</i>	Wolmari	Финляндия	11,47±0,49
30299	<i>duplialbum</i>	Grannenlose Zeizeilige	Польша	11,90±1,19
30314	<i>nutans</i>	Суздалец	Московская обл.	12,22±0,35
24817	<i>tibetanum</i>	H-3869 Gidole 2	Ботсвана	12,31±0,55
6039	<i>himalayense</i>	Местный калъджоу	Афганистан	12,91±5,74

¹ **От Редактора:** В Международной системе единиц (СИ) единицей коэффициента молярной экстинкции является квадратный метр, делённый на моль (м²·моль⁻¹). Здесь оставлен авторский вариант размерности моль⁻¹·см⁻¹ (M⁻¹·cm⁻¹), поскольку он широко используется в научном сообществе.

¹ **Editor's note:** In the International System of Units (SI), the unit of the molar extinction coefficient is a square meter per mol (m² mol⁻¹). The author's version of the dimension representation mole⁻¹·cm⁻¹ (M⁻¹·cm⁻¹) is retained here because it is widely used in the scientific community.

№ каталога ВИР/ VIR catalogue number	Разновидность/ Botanical variety	Название/ Designation	Происхождение/ Origin	Средняя концентрация свободных антоцианов, мг/кг/ Average concentration of free anthocyanins, mg/kg
10143	<i>himalayense</i>		Таджикистан	12,97±2,21
28650	<i>himalayense</i>	S-281	Мексика	13,95±2,47
8279	<i>persicum</i>	Персикум 64	Саратовская обл.	16,60±0,69
31390	<i>aethiops</i>	Гранал 32	Челябинская обл.	18,21±4,14
14294	<i>himalayense</i>	Местный	Таджикистан	19,43±4,97
26606	<i>nigripallidum</i>	Местный	Эфиопия	21,47±1,17
30658	<i>nigrum</i>	C.I. 11065	Перу	21,93±3,17
29568	<i>densoviolaceum</i>	H.3890 Mochi Mugi	Япония	37,27±10,85
28205	<i>nudidubium</i>	АНОР 3024	Германия	37,38±5,17
18723	<i>violaceum</i>	Purple hullless C.I.1415	Канада, Онтарио	45,83±6,96
18709	<i>violaceum</i>	Murasaki mochi C.I.5899	Япония	48,71±9,59
18729	<i>violaceum</i>	Subaethiops C.I.2216	Канада, Онтарио	49,26±13,32
17725	<i>violaceum</i>		Турция	58,65±1,47
15904	<i>violaceum</i>		Китай	79,23±9,05
8690	<i>griseinigrum</i>		Эфиопия	84,42±20,27
19906	<i>violaceum</i>	Местный	Монголия	145,37±27,57
			НСР _{0,5}	12,48

Более высокое содержание антоцианов отмечено в случае зерновок голозерного ячменя фиолетового цвета. Показатели для антоцианов у зерновок желтой, зеленой и черной окраски не имели существенных отличий. Среди образцов ячменя наибольшими значениями для содержания антоцианов характеризовались к-15904 (Китай), к-19906 (Монголия), к-18709 (Япония), к-18723, к-18729 (Канада), к-17725 (Турция), относящиеся к разновидности var. *violaceum*; к-29568 (Япония) – var. *densoviolaceum*; к-8690 (Эфиопия) – var. *griseinigrum*; к-28205 (Германия) – var. *nudidubium*. Средние значения

свободных антоцианов у данных образцов варьировали от 37 до 145 мг/кг. Для других образцов значения не превышали 21 мг/кг.

Среди выделенных образцов ячменя с повышенным содержанием антоцианов (84,42 мг/кг) образец к-8690 (var. *griseinigrum*, Эфиопия) представляет особый интерес. Для него характерны черные зерновки с буровато-серым оттенком. Вероятно, черная окраска зерновки указывает на присутствие меланинов, что делает данный образец перспективным для изучения комплексного эффекта антоцианов и меланинов.

**Таблица 4. Содержание антоцианов в зерновках овса, мг/кг
(в пересчете на цианидин-3-глюкозид).**

**Table 4. Total content of anthocyanins in oat kernels, mg/kg
(in terms of cyanidin-3-glucoside).**

№ каталога ВИР/ VIR catalogue number	Разновидность/ Botanical variety	Название/ Designation	Происхождение/ Origin	Средняя концентрация свободных антоцианов, мг/кг/ Average concentration of free anthocyanins, mg/kg
12133	<i>A. sativa</i> L. var. <i>affinis</i> Koern.	Rhea	Франция	7,26±0,96
4585	<i>A. abyssinica</i> Hochst. var. <i>braunii</i> Koern.	Местный	Эфиопия	7,29±0,85
15130	<i>A. strigosa</i> Schreb. ssp. <i>nudibrevis</i> (Vav.) Kobyl. et Rod. Comb. Nov.	23 Avena Strigosa nuda	Великобритания	8,56±0,83
9093	<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>nigra</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Avoine Noire 912	Алжир	9,48±1,21
1790	<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>ursina</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Местный	США	9,71±0,74
15174	<i>A. byzantina</i> K. Koch. var. <i>culta</i>	Furlong	Канада	10,12±2,18
14787	<i>A. sativa</i> L. var. <i>aurea</i> Koern.	Привет	Московская обл.	11,30±0,56
11515	<i>A. sativa</i> L. var. <i>grisea</i> Koern.	Pin-Lan-Che-U-Sao	Китай	11,76±3,01
15698	<i>A. sativa</i> L. var. <i>montana</i> Alef.	Harve Fran Mero	Швеция	11,93±2,08
15527	<i>A. abyssinica</i> Hochst. var. <i>braunii</i> Koern.	Местный	Эфиопия	14,64±1,52
15245	<i>A. strigosa</i> Schreb. ssp. <i>brevis</i> var. <i>tepherea</i> Mordv. ex Rod. et Sold.	Местный	Польша	20,49±3,04
			НСР _{0,5}	1,42

Аналогичные данные были получены в работах зарубежных авторов (Siebenhandl et al., 2007; Zhang et al., 2017; Lin et al., 2018). Например, у голозерных сортов ячменя Тибетского происхождения с различной окраской зерновок, объединенных в группу под названием Qingke, наибольшее содержание антоцианов наблюдали в сортах ‘Ganyucang’, ‘ВТНВ’ (95,5 мг цианидин-3-глюкозида/кг) с черной окраской зерновок. Более низкие значения были у сортов с зеленой окраской зерновки ‘Dingqing’, ‘BLТНВ’, самые низкие у сортов с неокрашенной зерновкой ‘Zangqing 320’, ‘WTНВ’ (Lin et al., 2018). Однако, такая связь содержания антоциана с окраской зерновки, выявленная авторами других публикаций, в отличие от нашего исследования, была продемонстрирована на ограниченном числе образцов голозерного ячменя местного происхождения.

Концентрация свободных антоцианов почти во всех зерновках была практически одинаковой и не превышала 11 мг/кг (см. табл. 4). Эти данные соотносятся с показателями, полученными нами для зерновок ячменя без антоциановой окраски. Однако у образцов к-15527 (*A. abyssinica* Hochst. var. *braunii* Koern., Эфиопия) и к-15245 (*A. strigosa* Schreb. ssp. *brevis* var. *tepherea*

Mordv. ex Rod. et Sold., Польша) наблюдалась повышенная концентрация антоцианов. Поэтому, данные образцы являются перспективными для дальнейшего изучения пигментов овса. До настоящего времени исследований по содержанию антоцианов в различных сортах овса не проводилось.

Заключение

В ходе исследования установлено: голозерные образцы ячменя с фиолетовой окраской зерновки имеют повышенное содержание антоцианов. Наибольшими значениями для содержания антоцианов характеризовались образцы ячменя: к-15904 (Китай), к-19906 (Монголия), к-18709 (Япония), к-18723, к-18729 (Канада), к-17725 (Турция), относящиеся к разновидности var. *violaceum*; к-29568 (Япония) – var. *densoviolaceum*; к-8690 (Эфиопия) – var. *griseinigrum*; к-28205 (Германия) – var. *nudidubium*. Данные образцы могут быть использованы для селекционной работы, направленной на получение сортов с повышенным содержанием целевых соединений в зерновках, и последующего расширения ассортимента функционального питания. Напри-

мер, изготовление отрубей и цельнозерновых продуктов с повышенным содержанием антиоксидантов.

Выделено два образца овса: к-15527 (*A. ayssinica* Hochst. var. *braunii* Koern., Эфиопия) и к-15245 (*A. strigosa* Schreb. Subsp. *brevis* var. *tephera* Mordv. ex Rod. et Sold., Польша) с небольшим содержанием антоцианов. Для выделения источников более высокого содержания антоцианов в зерновках овса требуется продолжить изучение образцов коллекции относительно данного признака.

Таким образом, установлено, что содержание антоцианов в зерновках ячменя и овса варьирует в зависимости от генотипа растений. В дальнейшем следует направить усилия на изучение качественного состава антоцианов у образцов овса и ячменя из коллекции ВИР, взятых в настоящее исследование.

Литература/References

- Abdel-Aal E., Hucl P. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*. 1999;76:350-354.
- Abdel-Aal E.S.M., Young J.C., Rabalski I. Anthocyanin composition in black, blue, pink, purple, and red cereal grains. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006;54:4696-4704. DOI: 10.1021/jf0606609
- Adzhieva V.F., Babak O.G., Shoeva O.Y., Kilchevsky A.V., Khlestkina E.K. Molecular genetic mechanisms of the development of fruit and seed coloration in plants. *Russian Journal of Genetics: Applied Research*. 2016;6(5):537-552. DOI: 10.1134/S2079059716050026.
- Bellido G.G., Beta T. Anthocyanin composition and oxygen radical scavenging capacity (ORAC) of milled and pearled purple, black, and common barley. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2009;57(3):1022-1028. DOI: 10.1021/jf802846x
- Castañeda-Ovando A., de Lourdes Pacheco-Hernández M., Páez-Hernández M.E., Rodríguez J.A., Galán-Vidal C.A. Chemical studies of anthocyanins: A review. *Food Chemistry*. 2009;113(4):859-871. DOI: 10.1016/j.foodchem.2008.09.001
- Francavilla A., Joye I.J. Anthocyanins in whole grain cereals and their potential effect on health. *Nutrients*. 2020;12(10):2922. DOI: 10.3390/nul2102922
- Grace M.H., Ribnicky D.M., Kuhn P., Poulev A., Logendra S., Yousef G.G., Raskin I., Lila M.A. Hypoglycemic activity of a novel anthocyanin-rich formulation from lowbush blueberry, *Vaccinium angustifolium* Aiton. *Phytomedicine*. 2009;16:406-415. DOI: 10.1016/j.phymed.2009.02.018
- Harlan H.V. Some distinctions in our cultivated barleys with reference to their use in plant breeding. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture; 1914. 38 p. (Bulletin of the U.S. Department of Agriculture; No. 137). DOI: 10.5962/bhl.title.109258
- Kang S.Y., Seeram N.P., Nair M.G., Bourquin L.D. Tart cherry anthocyanins inhibit tumor development in ApcMin mice and reduce proliferation of human colon cancer cells. *Cancer Letters*. 2003;194(1):13-19.
- Karaaslan M., Ozden M., Vardin H., Turkoglu H. Phenolic fortification of yogurt using grape and callus extracts. *LWT - Food Science and Technology*. 2011;44(4):1065-1072.
- Khlestkina E.K. The adaptive role of flavonoids: emphasis on cereals. *Cereal Research Communications*. 2013;41:185-198. DOI: 10.1556/CRC.2013.0004
- Jurgoński A., Juśkiewicz J., Zduńczyk Z. Ingestion of black chokeberry fruit extract leads to intestinal and systemic changes in a rat model of prediabetes and hyperlipidemia. *Plant Foods for Human Nutrition*. 2008;63:176-182. DOI: 10.1007/s11130-008-0087-7
- Kim M.J., Hyun J.N., Kim J.A., Park J.C., Kim M.Y., Kim J.G., Lee S.J., Chun S.C., Chung I.M. Relationship between phenolic compounds, anthocyanins content and antioxidant activity in colored barley germplasm. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007;55(12):4802-4809. DOI: 10.1021/jf0701943.
- Lin S., Guo H., Gong J.D.B., Lu M., Lu M.-Y., Wang L., Zhang Q., Qin W., Wu D.-T. Phenolic profiles, β -glucan contents, and antioxidant capacities of colored Qingke (Tibetan hulless barley) cultivars. *Journal of Cereal Science*. 2018;81:69-75. doi: 10.1016/j.jcs.2018.04.001.
- 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
- Lundqvist U., Franckowiak J.D. Diversity of barley mutants. In: Von Bothmer R., van Hintum T., Knüpffer H., Sato K. (eds.) *Diversity in barley (Hordeum vulgare)*. Amsterdam: Elsevier; 2003 p.77-96.
- Nam S.H., Choi S.P., Kang M.Y., Koh H.J., Kozukue N., Friedman M. Antioxidative activities of bran extracts from twenty one pigmented rice cultivars. *Food Chemistry*. 2006;94:613-620.
- Prior R.L., Wu X. Anthocyanins: structural characteristics that result in unique metabolic patterns and biological activities. *Free Radical Research*. 2006;40(10):1014-1028. DOI: 10.1080/10715760600758522
- Riaz M., Zia-ul-haq M., Saad B. Anthocyanins as natural colours. In: *Anthocyanins and human health: Biomolecular and therapeutic aspects*. New York: Springer International; 2016 p.47-55.
- Shoeva O.Y., Strygina K.V., Khlestkina E.K. Genes determining the synthesis of flavonoid and melanin pigments in barley. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2018;22(3):333-342. DOI: 10.18699/VJ18.369. [in Russian] (Шоева О.Ю., Сtryгина К.В., Хлесткина Е.К. Гены, контролирующие синтез флавоноидных и меланиновых пигментов ячменя. *Вавиловский журнал генетики и селекции*. 2018;22(3):333-342). DOI: 10.18699/VJ18.369.
- Shvachko N.A., Loskutov I.G., Semilet T.V., Popov V.S., Kovaleva O.N., Konarev A.V. Bioactive components in oat and barley grain as a promising breeding trend for functional food production. *Molecules*. 2021;26(8):2260. DOI: 10.3390/molecules26082260
- Siebenhandl S., Grausgruber 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. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007;55(21):8541-8547. DOI: 10.1021/jf072021j
- Strygina K.V. Synthesis of flavonoid pigments in grain of representatives of Poaceae: general patterns and exceptions in N.I. Vavilov's Homologous Series. *Russian Journal of Genetics*. 2020;56(11):1345-1358. [in Russian] (Сtryгина К.В. Синтез флавоноидных пигментов в зерновке у представителей Poaceae: общие закономерности и исключения в гомологических рядах Н.И. Вавилова. *Генетика*. 2020;56(11):1304-1319). DOI: 10.1134/S1022795420110095
- Tikhvinsky S.F. Anthocyanin forms of cultivated plants and their use in breeding (Antotsianovye formy kulturnykh rasteniy i ikh ispolzovaniye v selektsii). *Sbornik trudov Kirovskogo SKNI = Proceedings of the Kirov Agricultural Institute*. 1991;3-6 [in Russian] (Тихвинский С.Ф. Антоциановые формы культурных растений и их использование в селекции. *Сборник трудов Кировского СХИ*; 1991:3-6).
- Tikhvinsky S.F., Dronin S.V. Anthocyan pigments of plants and their role in adaptive selection of agricultures. *Theoretical and applied ecology*. 2007;3:15-19. [in Russian] (Тихвинский С.Ф., Дронин С.В. Антоциановые пигменты растений и их роль в адаптивной селекции сельскохозяйственных культур. *Теоретическая и прикладная экология*. 2007;3:15-19).
- Tsuda T., Horio F., Osawa T. Cyanidin 3-O- β -D-glucoside suppresses nitric oxide production during a zymosan treatment in rats. *Journal of Nutritional Science and Vitaminology (Tokyo)*. 2002;48(4):305-310. DOI: 10.3177/jnsv.48.305
- Varga M., Berkesi O., Darula Z., Palágyi A. Structural characterization of allomelanin from black oat. *Phytochemistry*. 2016;130:313-320. DOI: 10.1016/j.phytochem.2016.07.002.
- Vargach J.I., Loskutov I.G., Mertvishcheva M.E. Antioxidant activity of oat kernel (*Avena L.*) In: N.I. Vavilov's ideas in the modern world. IV. Vavilov international conference "N.I. Vavilov's ideas in the contemporary world", St. Petersburg, November 20-24, 2017. St. Petersburg:VIR, 2017. p.234-235. [in Rus-

- sian] (Варгач Ю.И., Лоскутов И.Г., Мертвищева М.Е. Антиоксидантная активность зерновок овса (*Avena L.*). В кн.: Идеи Н.И. Вавилова в современном мире: тезисы докладов IV Вавиловской международной научной конференции, Санкт-Петербург, 20–24 ноября 2017 г. Санкт-Петербург: ВИР; 2017. С.234-235).
- Vavilov N.I. Centres of origin of cultivated plants (Tsentry proiskhozhdeniya kulturnykh rasteniy). In.: *N.I. Vavilov. Selected works: In 2 volumes. Vol. 1 (N.I. Vavilov Izbranny'e proizvedeniya: V 2 t. T. 1)*. Leningrad: Nauka; 1967. p.88-202. [in Russian] (Вавилов Н.И. Центры происхождения культурных растений. В кн.: *Н.И. Вавилов. Избранные произведения: В 2 т. Т. 1*. Ленинград: Наука; 1967. С.88-202).
- Yudina R.S., Gordeeva E.I., Shoeva O.Yu., Tikhonova M.A., Khlestkina E.K. Anthocyanins as functional food components. *Vavilov Journal of Genetics and Breeding*. 2021;25(2):178-189. [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
- Zhang X-W, Jiang Q-T, Wei Y-M, Liu C. Inheritance analysis and mapping of quantitative trait loci (QTL) controlling individual anthocyanin compounds in purple barley (*Hordeum vulgare L.*) grains. *PLoS ONE*. 2017;12(8):e0183704. DOI: 10.1371/journal.pone.0183704