



Сравнительное исследование влияния температурного воздействия на биохимический и минеральный состав зерна почти-изогенных линий пшеницы, различающихся по антоциановой пигментации

А. В. Сумина¹, В. И. Полонский², Е. И. Гордеева³, К. А. Молобекова³, О. Ю. Шоева³

¹ Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, Абакан, Россия

² Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Россия

³ Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЦиГ СО РАН), Новосибирск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Олеся Юрьевна Шоева, olesya_ter@bionet.nsc.ru

Актуальность. Мягкая пшеница *Triticum aestivum* L., накапливающая антоциановые соединения в зерне, является ценным сырьем для создания функциональных продуктов питания. В процессе их производства применяются различные технологические операции, среди которых ключевую роль играют термические методы, такие как обжарка. Как известно, при этом формируются характерные вкусоароматические и текстурные характеристики конечного продукта, а также повышается биодоступность питательных веществ. Однако исследования влияния термической обработки на биохимический и минеральный состав богатого антоцианами зерна до настоящего момента не проводилось. Целью настоящего исследования является анализ влияния термообработки пигментированного зерна пшеницы на содержание в нем органических и минеральных компонентов при производстве хакасского национального продукта талгана, изготавливаемого из обжаренного и перемолотого зерна. **Материалы и методы.** В работе использовали почти-изогенные линии пшеницы iP и iP7D, отличающиеся наличием антоцианов в зерне. В пробах талгана, взятых с различных технологических этапов (цельное зерно, обжаренное зерно, готовый продукт) проводили оценку содержания общей влаги, клетчатки, белка, кальция, фосфора, сахара и сырой золы согласно ГОСТ. Содержание антоцианов в зерне изучаемых образцов пшеницы до и после термической обработки и измельчения проводили с помощью спектрофотометрии. **Результаты и обсуждение.** Было показано, что окрашенная антоцианами линия iP статистически превосходит неокрашенную iP7D по содержанию в зерне антоцианов, общей влаги, клетчатки и фосфора, тогда как по уровню белка, кальция и сырой золы различий между линиями выявлено не было. При производстве талгана, включающего термическую обработку без и с измельчением зерна, у обеих линий большинство исследуемых параметров зерна либо сохранялись на исходном уровне, либо повышались по сравнению с необработанным зерном. Исключениями стало снижение после обработки содержания кальция в зерне линии iP7D, и антоцианов в зерне линии iP. Зерно неокрашенной линии характеризовалось большей чувствительностью к технологическим этапам обработки, под воздействием которых наблюдалось увеличение всех проанализированных показателей, кроме содержания общей влаги. У окрашенной линии обработка повлияла на повышение содержания только клетчатки и сахара. **Заключение.** Выявленные особенности важно учитывать для разработки продуктов на основе зерна пшеницы, содержащего антоцианы, где баланс между вкусом, текстурой и сохранением биоактивных компонентов играет ключевую роль.

Ключевые слова: функциональный продукт, антоцианы, зерно, тепловое воздействие, белок, кальций, фосфор, клетчатка

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда в рамках проекта № 25-16-20101 и Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области в рамках проекта № 30-2025-000848

Для цитирования: Сумина А.В., Полонский В.И., Гордеева Е.И., Молобекова К.А., Шоева О.Ю. Сравнительное исследование влияния температурного воздействия на биохимический и минеральный состав зерна почти-изогенных линий пшеницы, различающихся по антоциановой пигментации. *Биотехнология и селекция растений*. 2025;8(4):. DOI: 10.30901/2658-6266-2025-4-07

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах. Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. Мнение журнала нейтрально к изложенным материалам, авторам и их месту работы.

© Сумина А.В., Полонский В.И., Гордеева Е.И., Молобекова К.А., Шоева О.Ю., 2025

Original article

DOI: 10.30901/2658-6266-2025-4-o7

A comparative study of the influence of temperature on the biochemical and mineral composition of grain of near-isogenic wheat lines differing in anthocyanin pigmentation

Alena V. Sumina¹, Vadim I. Polonskiy², Elena I. Gordeeva³, Camilla A. Molobekova³, Olesya Y. Shoeva³¹ N.F. Katanov Khakass State University, Abakan, Russia² Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia³ Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICG SB RAS), Novosibirsk, Russia**Corresponding author:** Olesya Y. Shoeva, olesya_ter@bionet.nsc.ru

Background. Common wheat *Triticum aestivum* L., which grain accumulates anthocyanin compounds with broad biological activity, is a valuable raw material for the production of functional foods. Various technological processes are used in the production of such foods, among which thermal methods such as roasting play a key role. These methods are known to shape the characteristic flavor, aroma, and textural characteristics of the final product, and also increase the bioavailability of nutrients. However, the effect of heat treatment on the biochemical and mineral composition of anthocyanin-rich grain has not yet been studied. The aim of this research was to analyze the effect of heat treatment of pigmented wheat grain on its organic and mineral content during the production of talgan, a Khakass national product made from roasted and milled grain. **Materials and methods.** The research employed near-isogenic iP and iP7D wheat lines differing in the presence of anthocyanins in the grain. Talgan samples taken from various processing stages (original grain, roasted grain, and finished product) were assessed for total moisture, fiber, protein, calcium, phosphorus, sugar, and crude ash content according to GOST standards. Anthocyanin content in the grain of the studied wheat accessions before and after heat treatment and milling was determined using spectrophotometry. **Results and discussion.** The grain of the colored iP line was statistically shown to be superior to that of the uncolored iP7D line in anthocyanin content, total moisture, fiber, phosphorus, and crude ash, while protein, calcium, and crude ash contents did not differ between the lines. During the production of talgan, which includes heat treatment of the whole and ground grain, most of the studied grain parameters either remained at the initial level, or increased compared to the untreated grain. The exceptions were a decrease in the calcium content in the grain of the iP7D line and of anthocyanin in the grain of the iP line after treatment. Grain of the uncolored line was more sensitive to technological processing stages, under the influence of which an increase in all the analyzed parameters was recorded, with the exception for the total moisture content, which remained unchanged compared to the original grain. In the colored line, however, the treatment caused only an increase in fiber and sugar content. **Conclusions.** The revealed features are important to consider when developing products based on wheat grain containing anthocyanins, where the balance between taste, texture and the preservation of bioactive components plays a key role.

Keywords: functional product, anthocyanins, grain, heat effect, protein, calcium, phosphorus, fiber

Acknowledgements: The work was financially supported by a grant from the Russian Science Foundation under Project No. 25-16-20101 and the Ministry of Science and Innovation Policy of the Novosibirsk Region under Project No. 30-2025-000848

For citation: Sumina A.V., Polonskiy V.I., Gordeeva E.I., Molobekova C.A., Shoeva O.Y. A comparative study of the influence of temperature on the biochemical and mineral composition of grain of near-isogenic wheat lines differing in anthocyanin pigmentation. *Plant Biotechnology and Breeding*. 2025;9(4):. (In Russ.). DOI: 10.30901/2658-6266-2025-4-o7

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. The journal's opinion is neutral to the presented materials, the authors, and their employers.

© Sumina A.V., Polonskiy V.I., Gordeeva E.I., Molobekova C.A., Shoeva O.Y., 2025

Введение

В рамках реализации государственных инициатив, направленных на укрепление общественного здоровья, разработка функциональных пищевых продуктов, оказывающих положительное воздействие на организм, становится приоритетом во многих странах (Loskutov, Khlestkina, 2021). Особое значение в этом контексте приобретают изделия, созданные на основе широко потребляемых злаков, таких как мягкая пшеница. Важнейшими характеристиками данной культуры является ее питательная и функциональная ценность. В зерновках пшеницы могут накапливаться антоциановые соединения, придавая им синюю, фиолетовую или черную окраску (Gordeeva et al., 2022). Данные соединения обладают антиоксидантной активностью, а также выступают в роли медиаторов сигнальных каскадов, индуцированных воздействием активных форм кислорода, способствуя профилактике сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, а также метаболических нарушений и болезни Альцгеймера (Li et al., 2017). Благодаря уникальным характеристикам, пигментированное зерно рассматривается как перспективный компонент для создания обогащенных функциональных продуктов с повышенной питательной ценностью (Francavilla, Joye, 2020; Garg et al., 2022).

Производство зерновых продуктов питания неизбежно связано с применением технологических операций, среди которых ключевую роль играют термические методы, такие как обжарка. В ходе тепловой обработки в зерне запускается комплекс физико-химических процессов: желатинизация крахмала, денатурация белковых структур, взаимодействие макронутриентов между собой, а также реакции потемнения Майяра (Li et al., 2023). Эти преобразования не только формируют характерные вкусоароматические и текстурные характеристики конечного продукта, но и повышают биодоступность питательных веществ. Например, термическая обработка может разрушать антипитательные соединения, высвобождая витамины и минералы, а также улучшать усвояемость белков за счет изменения их пространственной структуры (Samtiya et al., 2020). Таким образом, технологические процессы не только обеспечивают безопасность продукта, но и оптимизируют его функциональные и питательные свойства, делая их более доступными для организма. В связи с этим особой ценностью для питания обладает продукт хакасской национальной кухни – талган (талкан). Это дисперсный продукт из обжаренных зерен, занимающий промежуточное положение между мукой и крупкой. В традиционной кухне народов Азии он используется для приготовления питательных напитков путем размешивания его в воде, кисломолочных продуктах или чае, а также в качестве основы для каш, добавки в супы и мясные фарши, что определяет его высокую пищевую и культурную ценность (Sumina et al., 2019). Для изготовления талгана, как правило используют зерно пшеницы, ячменя или овса. Однако богатое антоцианами зерно указанных

культур для производства талгана ранее не использовалось и исследований влияния термообработки на биохимический и минеральный состав готового продукта не проводилось.

В представленной работе для изучения влияния термообработки пигментированного зерна пшеницы при изготовлении талгана на содержание в нем органических и минеральных компонентов в качестве точной генетической модели были использованы почти-изогенные линии, отличающиеся наличием рекомбинантного фрагмента в хромосоме 2A, несущего ген *Pp3*, контролирующей синтез антоциановых пигментов в перикарпе зерна (Gordeeva et al., 2015). Использование этих линий позволит связать отличия в биохимическом и минеральном составе между окрашенным и неокрашенным зерном с известными различиями в геноме, что в конечном итоге позволит направленно создавать сырье для производства целевого продукта с заданными свойствами.

Материалы и методы

Растительный материал. В работе были использованы почти-изогенные линии пшеницы *i:S29Pp-ALPp-Dlpp3^h* (сокращённо *iP7D*) и *i:S29Pp-ALPp-Dlpp3^h* (*iP*), созданные на основе краснотельного сорта ‘Саратовская 29’ и различающиеся по окраске зерновок (рисунк). Линия *iP7D* имеет неокрашенное зерно, тогда как линия *iP* отличается фиолетовой окраской, обусловленной накоплением антоциановых пигментов в перикарпе (Gordeeva et al., 2015). Зерно было собрано с растений, выращенных на экспериментальном участке селекционно-генетического комплекса Института цитологии и генетики СО РАН в 2018 году. До проведения исследования зерно хранилось в прохладном зернохранилище комплекса.

Обработка зерна. Зерно подвергали обработке по технологии получения хакасского национального зернового продукта талгана (Sumina et al., 2019). Для его изготовления предварительно очищенное от посторонних примесей зерно массой 100 граммов термически обрабатывали, обжаривали на протяжении 10 минут при 150°C; далее охлаждали и измельчали до размера частиц 0,25-0,70 мм.

Содержание органических и минеральных компонентов в зерне. Исследование содержания органических и минеральных компонентов в зерне изучаемых линий проведено на базе лабораторий ФГБУ «Росагрохимслужба» и Хакасского государственного университета им. Н.Ф. Катанова (г. Абакан). Пробы талгана для исследования были отобраны на различных технологических этапах: цельное зерно (без термической обработки и измельчения), обжаренное зерно (после термической обработки, но не измельченное) и готовый продукт (термически обработанное и измельченное зерно, талган). Для лабораторного анализа помол выполняли до получения гомогенной, репрезентативной пробы для точного количественного определения содержания таких химических соединений, как белок, углеводы, сырая зола, клет-

чатка, кальций, фосфор и антоцианы. Частицы измельчали до размера 0,20-0,40 мм, при этом все компоненты

зерна: эндосперм, зародыш, отруби – были равномерно распределены в пробе.

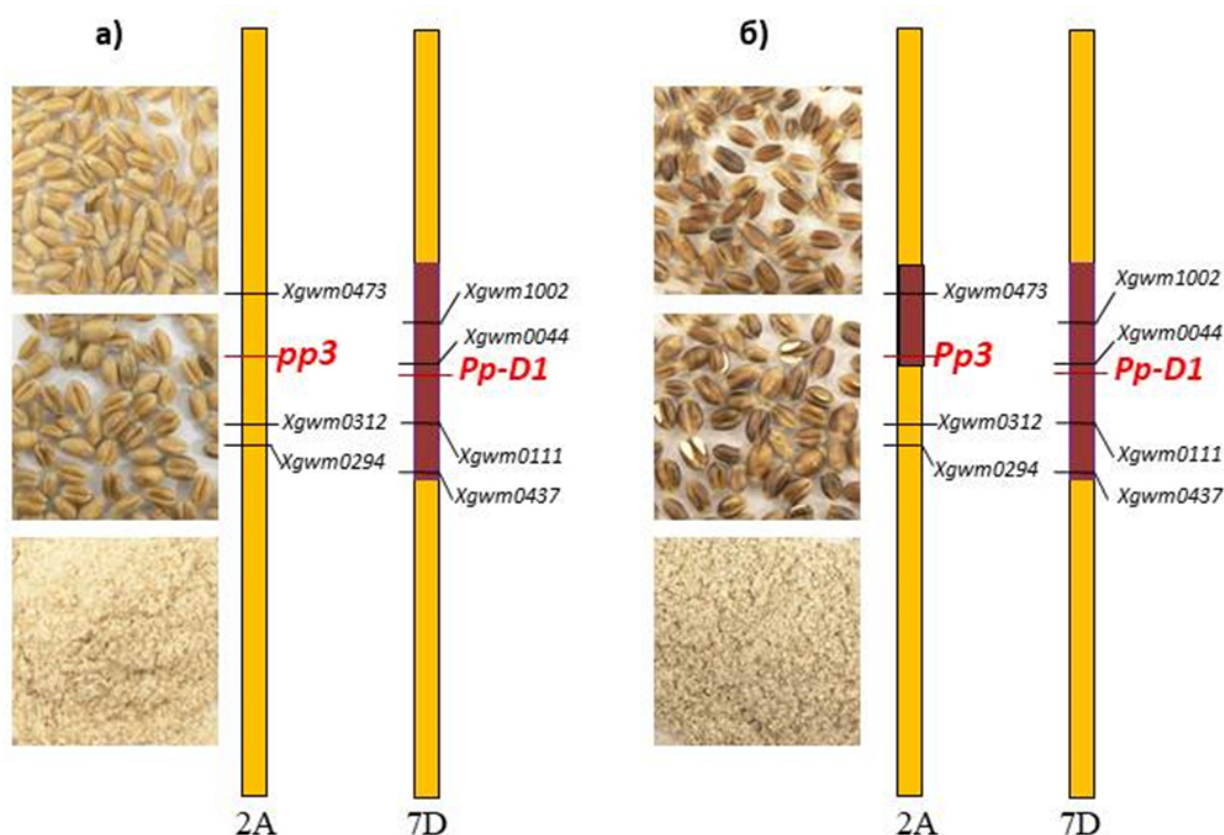


Рисунок. Схематическое изображение хромосом 2A и 7D почти-изогенных линий пшеницы iP7D (a) и iP (б), используемых в работе, и зерно этих линий: цельное (сверху), обжаренное (в центре) и термически обработанное и измельченное (снизу)

Бордовым цветом обозначены рекомбинантные участки, привнесенные в геном родительского сорта 'Саратовская 29' от сорта 'Purple', несущего доминантные аллели генов *Pp-D1* и *Pp3*, контролирующих синтез антоцианов в перикарпе.

Положение рекомбинантных участков относительно ДНК-маркеров отмечено согласно Gordeeva et al., 2015

Figure. Schematic representation of chromosomes 2A and 7D of near-isogenic wheat lines iP7D (a) and iP (b) used in the study, and grain of these lines: whole (top), roasted (center), and heat-treated and ground (bottom)

Recombinant regions introduced into the genome of the parental cv. 'Saratovskaya 29' from cv. 'Purple' carrying dominant alleles of the *Pp-D1* and *Pp3* genes, which control anthocyanin synthesis in the pericarp, are marked in burgundy.

The recombinant regions position relative to DNA markers is indicated according to Gordeeva et al., 2015

После проведения технологических операций образцы были приведены к равновесной влажности. Общая влага зерна была определена с помощью методики, заключающейся в высушивании навески при температуре $103 \pm 2^\circ\text{C}$ до постоянной массы в соответствии с ГОСТ 31640-2012 (State Standard, 2020a).

Содержание клетчатки определяли посредством гидролиза образца зерна серной кислотой и щелочью с последующим прокаливанием остатка в соответствии с ГОСТ 31675-2012 (State Standard, 2020b). Содержание сырого протеина (белков) оценивали через определение

азота методом Кельдаля (Zolotov, 2004) с последующим пересчетом на белок в соответствии с ГОСТ 13496.4-2019 (State Standard, 2019a). Содержание кальция было определено в соответствии с ГОСТ 32904-2014 (State Standard, 2020c), фосфора – ГОСТ 26657-97 (State Standard, 2015a), сахара – ГОСТ 26176-2019 (State Standard, 2019b), сырой золы – ГОСТ 26226-95 (State Standard, 2015b). Каждый метод был стандартизован для обеспечения точности и воспроизводимости результатов. Для каждого образца пшеницы измерения всех параметров были проведены в четырех повторностях в аккредитованной испытатель-

ной лаборатории с использованием стандартизованных методик, что гарантирует воспроизводимость и надежность полученных количественных данных. Содержание антоцианов в зерне до и после термической обработки и измельчения проводили с помощью спектрофотометрии, согласно ранее описанной методике (Gordeeva et al., 2022). Для каждого образца измерение содержания антоцианов было выполнено в трехкратной повторности.

Статистический анализ полученных измерений проводили в программе Statistica v. 6.1 (StatSoft, Inc., Талса, Оклахома, США). Оценку статистической существенности различий между средними значениями выполняли

с помощью медианного теста. При $p < 0,05$ различия считали статистически значимыми.

Результаты

Биохимический и минеральный состав зерна. Биохимический и минеральный состав зерна неокрашенной iP7D и окрашенной iP линий пшеницы, а также влияние технологических этапов (термической обработки и измельчения) на эти показатели, представлены в Таблице.

Таблица. Влияние технологических этапов (обжаривание; обжаривание и измельчение) на биохимический и минеральный состав неокрашенного и окрашенного зерна пшеницы

Table. The influence of technological stages (roasting; roasting and grinding) on the biochemical and mineral composition of uncolored and colored wheat grain

Параметр, размерность/ Parameter, dimension	iP7D	iP7D обжаривание/ roasting	iP7D обжаривание + измельчение/ roasting + grinding	iP	iP обжаривание/ roasting	iP обжаривание + измельчение/ roasting + grinding
Антоцианы, мг/кг	4,47±2,13 ^{a*}	-	5,79±1,68 ^{a\$}	58,62±1,05 ^{A*}	-	51,07±2,00 ^{B\$}
Общая влага, %	8,43±0,23 ^{a*}	8,45±0,37 ^{a#}	8,29±0,11 ^a	8,95±0,10 ^{A*}	8,86±0,10 ^{A#}	8,65±0,38 ^A
Клетчатка, г/кг	42,40±0,99 ^{a*}	48,90±0,92 ^{b#}	44,28±0,76 ^{a\$}	50,20±1,21 ^{A*}	52,00±1,46 ^{A#}	56,40±0,73 ^{B\$}
Белок, %	14,38±0,73 ^a	15,19±1,13 ^{ab}	16,38±0,52 ^b	15,67±1,10 ^A	15,88±0,97 ^A	16,06±0,53 ^A
Кальций, г/кг	1,10±0,08 ^a	0,60±0,21 ^b	0,60±0,28 ^b	1,00±0,35 ^A	0,70±0,21 ^A	0,70±0,18 ^A
Фосфор, г/кг	4,20±0,24 ^{a*}	4,70±0,15 ^a	4,90±0,11 ^b	4,80±0,13 ^{A*}	4,90±0,26 ^A	5,10±0,29 ^A
Сахар, г/кг	18,10±0,76 ^{a*}	26,30±0,47 ^{b#}	28,10±0,71 ^{c\$}	23,20±0,81 ^{A*}	25,20±0,41 ^{B#}	37,80±0,49 ^{C\$}
Сырая зола, г/кг	26,20±0,17 ^a	31,50±0,69 ^{b#}	24,70±0,63 ^{c\$}	26,30±0,44 ^A	26,20±0,52 ^{A#}	26,10±0,43 ^{A\$}

Примечание: одинаковыми буквенными индексами отмечены статистически не отличающиеся значения параметров в зерне до и после обработок, для линии iP7D используются строчные индексы, для линии iP – заглавные; достоверные отличия значений параметров между линиями iP и iP7D в исходном зерне отмечены знаком *, в обжаренном цельном зерне – знаком # и в обжаренном измельченном зерне – знаком \$ ($p < 0,05$, медианный тест)/ **Note:** the same letter indices indicate statistically indistinguishable parameter values for the grain before and after treatments, lowercase indices are used for the iP7D line, uppercase ones are used for the iP line; reliable differences in parameter values between the iP and iP7D lines in the original grain are marked with the sign *, in the roasted whole grain – with the sign #, and in the roasted ground grain – with the sign \$ ($p < 0.05$, median test).

Зерно линии iP по сравнению с iP7D характеризуется большим содержанием антоцианов (58,62 мг/кг и 4,47 мг/кг), общей влаги (8,95% и 8,43%), клетчатки (50,20 г/кг и 42,40 г/кг), фосфора (4,80 г/кг и 4,20 г/кг) и сахара (23,20 г/кг и 18,10 г/кг). Содержание белка (15,67% и 14,38%), кальция (1,00 г/кг и 1,10 г/кг) и сырой золы (26,30 г/кг и 26,20 г/кг) между исследуемыми линиями не отличается.

По другим параметрам линии продемонстрировали чувствительность к одному или обоим этапам технологической обработки, при этом реакция линий по некоторым из изучаемых параметров различалась. Так, содержание антоцианов в зерне линии iP7D не отличалось после обжарки и измельчения, тогда как у линии iP данный показатель снижался на 13% с 58,62 мг/кг до 51,07 мг/кг. Содержание клетчатки в зерне линии iP7D после обжарки

увеличилось на 15% с 42,40 г/кг до 48,90 г/кг, а при последующем измельчении – снизилось до 44,28 г/кг, достигнув уровня содержания клетчатки в исходном образце. Для линии iP наблюдалась другая тенденция: при обжарке содержание клетчатки в зерне не изменялось, тогда как при последующем измельчении этот показатель увеличился на 12% с 50,20 г/кг до 56,40 г/кг.

Содержание белка в зерне линии iP7D под действием термообработки и измельчения увеличилось на 14% с 14,38% до 16,38%, при этом не было выявлено достоверного отличия от содержания белка в конечном продукте, изготовленном из зерна линии iP. У линии iP этот показатель оставался неизменным после каждого этапа технологической обработки, варьируя в пределах 15,67%-16,06%.

Содержание кальция в зерне линии iP7D достоверно снизилось на 45% с 1,1 г/кг до 0,6 г/кг после обра-

ботки зерна, оставаясь на уровне показателя линии iP, у которой данный показатель сохранился неизменным после всех технологических этапов, варьируя в пределах 0,7 г/кг-1,0 г/кг.

Содержание фосфора у линии iP7D после обработки повысилось на 17% с 4,2 г/кг до 4,9 г/кг, при этом оно достоверно не отличалось от содержания фосфора в конечном продукте линии iP, у которой данный показатель остался неизменным после всех технологических этапов, варьируя в пределах 4,8 г/кг-5,1 г/кг.

Содержание сахара увеличилось в зерне у обеих линий в обжаренном цельном и измельченном зерне. У линии iP7D этот показатель повысился на 55% с 18,10 г/кг до 28,10 г/кг, тогда как у iP – на 63% с 23,20 г/кг до 37,80 г/кг.

Содержание сырой золы, что является показателем минерализации, у линии iP7D повысилось после обжарки на 20% с 26,20 г/кг до 31,50 г/кг, но снизилось в последующем до 24,70 г/кг. Это достоверно ниже показателя, установленного в случае окрашенной линии iP, для которой он остался неизменным после всех этапов технологической обработки, варьируя в пределах 26,10 г/кг-26,30 г/кг.

Обсуждение

В пищевой промышленности термическая обработка зерна используется для улучшения и изменения качества продуктов питания, продления срока их хранения и повышения эффективности последующей обработки. Способ термообработки, температура и время воздействия оказывают существенное влияние на биохимический и минеральный состав подвергнутого воздействию зерна (Li et al., 2023). Кроме этого, эффект зависит от исходного биохимического состава зерна, который может значительно различаться у разных сортов (Raigar, Mishra, 2018; Dongmo et al., 2020). В представленном исследовании термическому воздействию подверглось зерно двух почти-изогенных линий. Несмотря на небольшие генетические различия между ними (см. рисунок), изучаемые линии отличались друг от друга не только по наличию и отсутствию антоциановой пигментации, но и по содержанию общей влаги, клетчатки, сахара и фосфора, с преобладанием данных показателей у окрашенной линии (см. таблица). Наблюдаемые различия между линиями могут быть обусловлены наличием в рекомбинантных районах, по которым изучаемые линии отличаются, генов, контролирующих синтез и метаболизм сахаров (Wasserman et al., 2025), а также локусов количественных признаков, ассоциированных с содержанием фитиновой кислоты, в состав которой входит фосфор (Wen et al., 2022).

В результате термической обработки у обеих линий было зафиксировано изменение биохимического и минерального состава зерна, не связанное с концентрированием веществ вследствие потери влаги при термообработке,

поскольку после проведения технологических операций все образцы были приведены к равновесной влажности.

У окрашенной линии iP в результате термообработки и измельчения зерна снизилось содержания антоцианов на 13%, тогда как в зерне линии iP7D содержание антоцианов, выявленных в незначительном количестве, не изменилось. Отличия в степени деградации антоцианов между линиями могут быть обусловлены различиями в их стабильности, которая, как было показано, повышается с помощью гликозилирования и ацилирования, а также в присутствии углеводов, белков и некрахмальных полисахаридов, таких как гемицеллюлоза, β -глюканы (Chen et al., 2023; Tobolka et al., 2024).

Обе линии продемонстрировали увеличение содержания клетчатки, которое произошло у линии iP7D на этапе обжаривания, а у линии iP – на этапе измельчения обжаренного зерна. Увеличение содержания растворимых и уменьшение содержания нерастворимых пищевых волокон при обжаривании было описано также для риса, сорго, овса, киноа, но не для ячменя (Medina Martinez et al., 2020; Miraji et al., 2021; Torbica et al., 2021). Предположительно, на начальном этапе обжарки остаточные молекулы воды накапливаются внутри клеточных стенок. Как только давление пара превышает предел прочности клеточных стенок, происходит их разрушение, что увеличивает доступность растворимых пищевых волокон для экстракции (Li et al., 2023). Можно предположить, что клеточные стенки линии iP прочнее, поэтому изменения в содержании клетчатки у неё происходят не на этапе обжаривания, а только после механического разрушения зерна. Кроме клетчатки, в зерне обеих линий при обжаривании наблюдалось увеличение содержания сахаров, что может быть обусловлено деполимеризацией крахмальных гранул и высвобождением глюкозы, обнаруживаемой при измерении содержания сахаров.

Содержание белка, фосфора, кальция и сырой золы изменялось только у линии iP7D, тогда как у iP содержание данных веществ в обработанном зерне не отличалось от их содержания в необработанном зерне. При этом содержание фосфора, белка, а сырой золы только на этапе обжаривания, у линии iP7D увеличивалось, а содержание кальция – уменьшалось. Влияние термообработки на содержание минеральных веществ в зерне неоднозначно. В ряде исследований было отмечено снижение содержания минеральных веществ в зерне после его обжаривания, предположительно, связанное с их осаждением на внутренней поверхности посуды, используемой для обжарки, либо с удалением перед обжариванием оболочек зерна, богатых этими веществами (Li et al., 2023). Однако в других работах показано повышение содержания минеральных веществ, в частности железа и кальция после термообработки, что может быть связано с разрушением фитатов, солей фитиновой кислоты, и высвобождением указанных компонентов (Dongmo et al., 2020; Mohamed Ahmed et al., 2020). Вероятно, наблюдаемое увеличение содержания фосфора и сырой золы так-

же связано с разрушением фитатов в ходе термообработки. В то же время, снижение содержания кальция может свидетельствовать о его реакции с компонентами смеси и выпадением в виде нерастворимых солей, что делает его недоступным для анализа. Снижение содержания сырой золы после измельчения может быть обусловлено осаждением ионов металлов на инструментах для измельчения.

В эксперименте наблюдалось увеличение содержания белка после обжаривания и измельчения зерна. Как было отмечено в ряде исследований, при термообработке происходит изменение пространственной структуры белка, которая позволяет ранее скрытым гидрофобным группам выйти на поверхность, делая их доступными для гликирования, агрегации или полимеризации субъединиц. В перечисленных реакциях может происходить увеличение молекулярной массы белка (Li et al., 2023). Однако, поскольку в настоящем исследовании содержание белка измеряли не прямым его выделением, а в пересчете на азот, то увеличение содержания белка не может быть объяснено образованием агрегатов с небелковыми компонентами смеси. Также оно не может быть объяснено концентрированием веществ вследствие потери влаги при термообработке, поскольку после проведения технологических операций все образцы были приведены к равновесной влажности.

Как видно из результатов проведенного анализа, изучаемые линии продемонстрировали различную чувствительность к термической обработке, обусловленную, вероятно, выявленными отличиями в биохимическом составе исходного зерна. В частности, большее содержание клетчатки в окрашенном антоцианами зерне может свидетельствовать о повышенной прочности клеточных стенок, для разрушения которых требуется больше энергии, чем для разрушения клеток неокрашенного зерна.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлены различия в биохимическом и минеральном составе зерна между почти-изогенными линиями пшеницы, отличающимися по антоциановой окраске. Линии различались по содержанию общей влаги, клетчатки, фосфора и сахара, но не по содержанию белка, кальция и сырой золы. Кроме того, показано, что исследованные линии неодинаково реагируют на термообработку. Большей чувствительностью к нагреванию характеризовалась неокрашенная линия: у нее, за исключением общей влаги и антоцианов, отмечено увеличение всех проанализированных показателей. Наблюдаемые отличия в реакции на термообработку могут быть обусловлены исходными различиями в составе компонентов у зерна линий, в частности, в содержании клетчатки. Благодаря использованию точной генетической модели почти-изогенных линий, обнаруженные различия можно связать с ранее выявленными генотипическими особенностями изучаемых линий. Это открывает

возможность для направленной селекции на улучшение качества не только зерна, но и конечного зернового продукта.

References/Литература

- Chen Y., Belwal T., Xu Y., Ma Q., Li D., Li L., Xiao H., Luo Z. Updated insights into anthocyanin stability behavior from bases to cases: why and why not anthocyanins lose during food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2023;63:8639-8671. DOI: 10.1080/10408398.2022.2063250
- Dongmo H., Tambo S.T., Teboukeu G.B., Mboukap A.N., Fotso B.S., Tekam Djuidje M.C., Klang J.M. Effect of process and variety on physico-chemical and rheological properties of two corn flour varieties (*Atp* and *Kassai*). *Journal of Agriculture and Food Research*. 2020;2:100075. DOI: 10.1016/j.jafr.2020.100075
- Francavilla A., Joye I.J. Anthocyanins in whole grain cereals and their potential effect on health. *Nutrients*. 2020;12:1-20. DOI: 10.3390/nut12102922
- 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. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:878221. DOI: 10.3389/fnut.2022.878221
- Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Khlestkina E.K. Marker-assisted development of bread wheat near-isogenic lines carrying various combinations of purple pericarp (*Pp*) alleles. *Euphytica*. 2015;203:469-476. DOI: 10.1007/s10681-014-1317-8
- Gordeeva E., Shoeva 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;12:2934. DOI: 10.3390/agronomy12122934
- Li D., Wang P., Luo Y., Zhao M., Chen F. Health benefits of anthocyanins and molecular mechanisms: Update from recent decade. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2017;57:1729-1741. DOI: 10.1080/10408398.2015.1030064
- Li L., Wang Q., Liu C., Hong J., Zheng X. Effect of oven roasting on major chemical components in cereals and its modulation on flour-based products quality. *Journal of Food Science*. 2023;88:2740-2757. DOI: 10.1111/1750-3841.16625
- Loskutov I.G., Khlestkina E.K. Wheat, barley, and oat breeding for health benefit components in grain. *Plants*. 2021;10:86. DOI: 10.3390/plants10010086
- Medina Martinez O.D., Lopes Toledo R.C., Vieira Queiroz V.A., Pirozi M.R., Duarte Martino H.S., Ribeiro de Barros F.A. Mixed sorghum and quinoa flour improves protein quality and increases antioxidant capacity *in vivo*. *LWT*. 2020;129:109597. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109597
- Miraji K.F., Linnemann A.R., Fogliano V., Laswai H.S., Capuano E. Dry-heat processing at different conditions impact the nutritional composition and *in vitro* starch and protein digestibility of immature rice-based products. *Food and Function*. 2021;12:7527-7545. DOI: 10.1039/d1fo01240a
- Mohamed Ahmed I.A., Al Juhaimi F.Y., Osman M.A., Al Maiman S.A., Hassan A.B., Alqah H.A.S., Babiker E.E., Ghafoor K. Effect of oven roasting treatment on the antioxidant activity, phenolic compounds, fatty acids, minerals, and protein profile of *Samh* (*Mesembryanthemum forsskalei* Hochst) seeds. *LWT*. 2020;131:109825. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.109825
- Raigar R.K., Mishra H.N. Study on the effect of pilot scale roasting conditions on the physicochemical and functional properties of maize flour (Cv. *Bio 22027*). *Journal of Food Processing and Preservation*. 2018;42:1-9. DOI: 10.1111/jfpp.13602
- Samtiya M., Aluko R.E., Dhewa T. Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2020;2:6. DOI: 10.1186/s43014-020-0020-5
- State Standard 31640-2012. Feed. Methods for determining dry matter content. Moscow: Standartinform; 2020a. [in Russian] (ГОСТ 31640-2012. Корма. Методы определения содержания сухого вещества. Москва: Стандартинформ; 2020a).

- State Standard 31675-2012. Feed. Methods for determining crude fiber content using intermediate filtration. Moscow: Standartinform; 2020b. [in Russian] (ГОСТ 31675-2012. Корма. Методы определения содержания сырой клетчатки с применением промежуточной фильтрации. Москва: Стандартинформ; 2020b).
- State Standard 13496.4-2019. Feed, compound feed, compound feed raw materials. Methods for determining nitrogen and crude protein content. Moscow: Standartinform; 2019a. [in Russian] (ГОСТ 13496.4-2019. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина. Москва: Стандартинформ; 2019a).
- State Standard 32904-2014. Feed, compound feed. Determination of calcium content by titrimetric method. Moscow: Standartinform; 2020c. [in Russian] (ГОСТ 32904-2014. Корма, комбикорма. Определение содержания кальция титриметрическим методом. Москва: Стандартинформ; 2020c).
- State Standard 26657-97. Feed, compound feed, compound feed raw materials. Method for determining phosphorus content. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification; 2015a. [in Russian] (ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания фосфора. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 2015a).
- State Standard 26176-2019. Feed, compound feed. Methods for determining soluble and easily hydrolyzable carbohydrates. Moscow: Standartinform; 2019b. [in Russian] (ГОСТ 26176-2019. Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов. Москва: Стандартинформ; 2019b).
- State Standard 26226-95. Feed, compound feed, compound feed raw materials. Methods for determining crude ash. Minsk: Interstate Council for Standardization, Metrology, and Certification; 2015b [in Russian] (ГОСТ 26226-95 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 2015b).
- Sumina A.V., Polonsky V.I., Shaldaeva T.M., Shulbaeva M.T. The content of antioxidants in the products of the Khakas national cuisine based on barley grain. *Bulletin of KrasSAU*. 2019;12:125-130. [in Russian] (Сумина А.В., Полонский В.И., Шалдаева Т.М., Шулбаева М.Т., Содержание антиоксидантов в продуктах хакасской национальной кухни на основе зерна ячменя. *Вестник КрасГАУ*. 2019;12:125-130). DOI: 10.36718/1819-4036-2019-12-125-130
- Tobolka A., Škorpilová T., Beňo F., Podskalská T., Rajchl A. Effect of various carbohydrates in aqueous solutions on color stability and degradation kinetics of selected anthocyanins during storage. *Foods*. 2024;13:3628. DOI: 10.3390/foods13223628
- Torbica A., Belović M., Popović L., Čakarević J. Heat and hydrothermal treatments of non-wheat flours. *Food Chemistry*. 2021;334:127523. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127523
- Wasserman L.A., Krivandin A.V., Shatalova O.V., Filatova A.G., Sergeev A.I., Vasil'ev V.G., Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Goldshtein V.G., Plashchina I.G. Structural and thermodynamic characteristics of starches from near-isogenic and substituted wheat lines. *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2025;19(1):91-103. DOI: 10.1134/S1990793124701574
- Wen Z., Juliana P., Dhugga H.S., Pacheco M., Martínez U.I., Aguilar A., Ibba M.I., Govindan V., Singh R.P., Dhugga K.S. Genome-wide association study of phytic acid in wheat grain unravels markers for improving biofortification. *Frontiers in Plant Science*. 2022;13:830147. DOI: 10.3389/fpls.2022.830147
- Zolotov Yu.A. (ed.). Fundamentals of analytical chemistry (Osnovy analiticheskoy khimii) 3rd edition revised and enlarged. Moscow: Higher School; 2004. Vol. 2. p.55-57. [in Russian] (Основы аналитической химии / под ред. Ю.А. Золотова. Изд-е 3-е, перераб. и доп. Москва: Высшая школа; 2004. Т. 2. С.55-57).

Информация об авторах

Алёна Владимировна Сумина, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры географии и геоэкологии, Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, 655000 Россия, Республика Хакасия, Абакан, ул. Ленина, 90, alenasumina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0466-6833>

Вадим Игоревич Полонский, доктор биологических наук, профессор, профессор-консультант, кафедра ландшафтной архитектуры и ботаники, Красноярский государственный аграрный университет, 660049 Россия, Красноярск, пр. Мира, 90, vadim.polonskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7183-0912>

Елена Ивановна Гордеева, кандидат биологических наук, научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, elgordeeva@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3166-7409>

Камилла Ардаковна Молобекова, аспирант, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, k.molobekova@alumni.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1340-6759>

Олеся Юрьевна Шоева, кандидат биологических наук, заведующая, сектор функциональной генетики злаков, Федеральный исследовательский центр Институт цитологии и генетики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 10, olesya_ter@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5289-8631>

Information about the authors

Alena V. Sumina, Cand. Sci. (Agriculture), Associate Professor, Department of Geography and Geoecology, N.F. Katanov Khakass State University, 90, Lenina Street, Abakan, Republic of Khakassia, 655000 Russia, alenasumina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0466-6833>

Vadim I. Polonskiy, Dr. Sci. (Biology), Professor, Professor-consultant, Department of Landscape Architecture and Botany, Krasnoyarsk State Agrarian University, 90, Mira Avenue, Krasnoyarsk, 660049 Russia, vadim.polonskiy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7183-0912>

Elena I. Gordeeva, Cand. Sci. (Biology), Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, elgordeeva@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3166-7409>

Camilla A. Molobekova, Graduate Student, Junior Researcher, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, k.molobekova@alumni.nsu.ru, <https://orcid.org/0009-0009-1340-6759>

Olesya Y. Shoeva, Cand. Sci. (Biology), Head, Sector of Functional Genetics of Cereals, Institute of Cytology and Genetics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Academician Lavrentyev Avenue, Novosibirsk, 630090 Russia, olesya_ter@bionet.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5289-8631>

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.11.2025; одобрена после рецензирования 15.12.2025; принята к публикации 23.12.2025.

The article was submitted on 27.11.2025; approved after reviewing on 15.12.2025; accepted for publication on 23.12.2025.