

УДК 633.14: 631.52

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ПИГМЕНТИРОВАННОГО ЗЕРНА ЯЧМЕНЯ И ПШЕНИЦЫ НА ЕГО АНТИОКСИДАНТНУЮ АКТИВНОСТЬ

© *А.В. Сумина^{1*}, В.И. Полонский², Е.И. Гордеева³, К.А. Молобекова³, О.Ю. Шоева³*

¹ Хакасский государственный университет им. Н.Ф. Катанова, ул. Ленина, 90, Абакан, 655000, Россия, alenasumina@list.ru

² Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, 660049, Россия

³ Институт цитологии и генетики СО РАН, пр. ак. Лаврентьева, 10, Новосибирск, 630090, Россия

Цель настоящего исследования – анализ влияния термообработки пигментированного зерна почти изогенных линий пшеницы и ячменя на содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность хакасского национального продукта талгана, при изготовлении которого зерно подвергается обжарке и перемалыванию. Работа была проведена с использованием почти изогенных линий пшеницы iP и ячменя PLP, BA, BLP, отличающихся от контрольных непигментированных линий iP7D и Bowman соответственно, наличием антоциановых или меланиновых пигментов в зерне. Показано, что пигментированное зерно пшеницы и ячменя содержало на 13–63% больше фенольных соединений по сравнению с зерном контрольных линий. При этом линия ячменя BLP, накапливающая меланины в зерне, характеризовалась наибольшим содержанием фенольных соединений (3.04 мг/г), а неокрашенная линия пшеницы iP7D – наименьшим (1.58 мг/г). Была выявлена сильная положительная корреляция между содержанием свободных фенольных соединений и антиоксидантной активностью метанольных экстрактов муки из зерна ($r_s = 0.879$, $p < 0.05$). В приготовленном из тестируемого почти талгане происходило увеличение содержания фенольных соединений на 8–43% по сравнению с исходными образцами. При этом пигментированное зерно характеризовались более высоким содержанием фенольных соединений (пшеница – 2.55 мг/г; ячмень – 2.55–3.48 мг/г) по сравнению с зерном контрольных линий (пшеница – 2.03 мг/г; ячмень – 2.38 мг/г). Значение антиоксидантной активности экстрактов талгана было либо достоверно выше (Bowman, iP7D, iP), либо имело тенденцию роста (PLP, BA, BLP) по сравнению с необработанным зерном, при этом наблюдалась сильная положительная корреляционная связь между содержанием свободных фенольных соединений и антиоксидантной активностью экстрактов талгана ($r_s = 0.896$, $p < 0.05$). Полученные результаты продемонстрировали, что пигментированное зерно пшеницы и ячменя является перспективным сырьем для производства функционального продукта здорового питания – национального хакасского талгана.

Ключевые слова: функциональный продукт, антоцианы, зерно, тепловое воздействие, меланины, антиоксидантная активность, фенолы.

Для цитирования: Сумина А.В., Полонский В.И., Гордеева Е.И., Молобекова К.А., Шоева О.Ю. Влияние термообработки пигментированного зерна ячменя и пшеницы на его антиоксидантную активность // Химия растительного сырья. 2026. №1. С. 257–265. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117240>.

Введение

В связи с реализацией национальных программ по сохранению здоровья населения сегодня во многих странах особую актуальность приобретает создание функциональных продуктов питания, благотворно влияющих на человека. В этом ключе большую ценность представляют продукты, приготовленные на основе ежедневно употребляемых в пищу зерновых культур – пшеницы и ячменя. Одним из важных показателей зерна этих видов является суммарное содержание в нем антиоксидантов. В этой связи особый интерес представляют продукты на основе пигментированного зерна пшеницы и ячменя [1]. Синяя, фиолетовая и черная окраска зерна указанных культур связана с образованием в различных его слоях антоциановых и меланиновых соединений. Обладая высоким антиоксидантным потенциалом и биологической активностью, эти химические вещества защищают клетки от повреждения свободными радикалами и предотвращают

* Автор, с которым следует вести переписку.

развитие многих заболеваний человека [2, 3]. Благодаря своим положительным свойствам цветное зерно перспективно использовать в качестве уникального ингредиента для производства функциональных продуктов питания с добавленной стоимостью [1, 4, 5].

Как известно, изготовление пищевого зернового продукта невозможно без использования различных технологических процессов, при этом наиболее часто используемыми являются термические методы обработки, например, обжаривание. При этом в зерне происходит ряд физических и химических превращений, связанных с желатинизацией крахмала, денатурацией белка, взаимодействием компонентов и реакциями потемнения. Перечисленные изменения сопровождаются улучшением органолептических свойств, повышением доступности питательных веществ, инактивацией термолабильных токсичных соединений и ферментов ингибиторов [6]. Однако термическая обработка может по-разному влиять на содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность зернового продукта [7, 8]. С одной стороны, некоторые термолабильные фенолы способны разрушаться при тепловом воздействии, что приводит к снижению антиоксидантной активности [9]. С другой стороны, термическая обработка может сопровождаться высвобождением связанных фенольных соединений и повышением их степени экстрагируемости за счет разрушения клеточной структуры и разрыхления зерновой матрицы, что приводит к увеличению общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной способности продукта [8].

По всей вероятности, пигментированное зерно, характеризуясь повышенной антиоксидантной способностью, предполагает более высокий потенциал использования его в качестве сырья для производства функционального продукта здорового питания. К сожалению, информация об изменении содержания антиоксидантов в пигментированном зерне и его антиоксидантной активности под влиянием теплового воздействия в процессе его переработки в научной литературе практически отсутствует.

Цель настоящего исследования – анализ влияния термообработки пигментированного зерна почти изогенных линий пшеницы и ячменя на содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность хакасского национального продукта талгана, при изготовлении которого зерно подвергается обжарке и перемалыванию.

Экспериментальная часть

В качестве объекта исследования служили четыре образца ячменя из коллекции NordGen (Alnarp, Sweden) и два образца пшеницы из коллекции ГенАгро (Новосибирск, Россия) (табл. 1, рис. 1).

Образцы ячменя представляют собой почти изогенные и рекомбинантную линии с различной окраской зерна, созданные на основе неокрашенного пленчатого сорта Bowman (NGB22812, BW) [10], который в работе принят в качестве контроля. Окраска фиолетовозерной пленчатой BW648 (NGB22213, PLP) и голубозерной голозерной BW418 (NGB20651, BA) линий обусловлена присутствием антоцианов в перикарпе и в алейроновом слое соответственно [11]. При этом чешуи колосков у обеих линий не окрашены. Окраска зерна пленчатой черной зерной линии BW062 (NGB20470, BLP) связана с синтезом меланина и в перикарпе, и в чешуях колоска [12].

Образцы пшеницы, используемые в работе, также являются почти изогенными линиями с различной окраской зерновок, созданными на основе красной зерной сорта Саратовская 29. Линия *i:S29Pp-A1Pp-D1pp3^P* (iP7D) характеризуется красным зерном, не содержащем антоцианов, тогда как ее сестринская линия *i:S29Pp-A1Pp-D1Pp3^P* (iP) имеет фиолетовую окраску зерновки, обусловленную наличием антоцианов в перикарпе [13, 14].

Таблица 1. Характеристика образцов ячменя и пшеницы, использованных в исследовании

Культура	Название образца	Объект	Цвет зерна	Масса 1000 зерен, г	Средний размер зерновки, мм	
					длина	ширина
Ячмень	Bowman (BW)	Сорт	Желтый	51.7	7.9	3.4
	PLP	Линия	Фиолетовый	52.4	8.1	3.9
	BA	Линия	Голубой	45.2	7.5	3.6
	BLP	Линия	Черный	45.8	7.8	3.4
Пшеница	iP7D	Линия	Красный	44.7	7.1	3.3
	iP	Линия	Фиолетовый	43.1	6.3	3.1

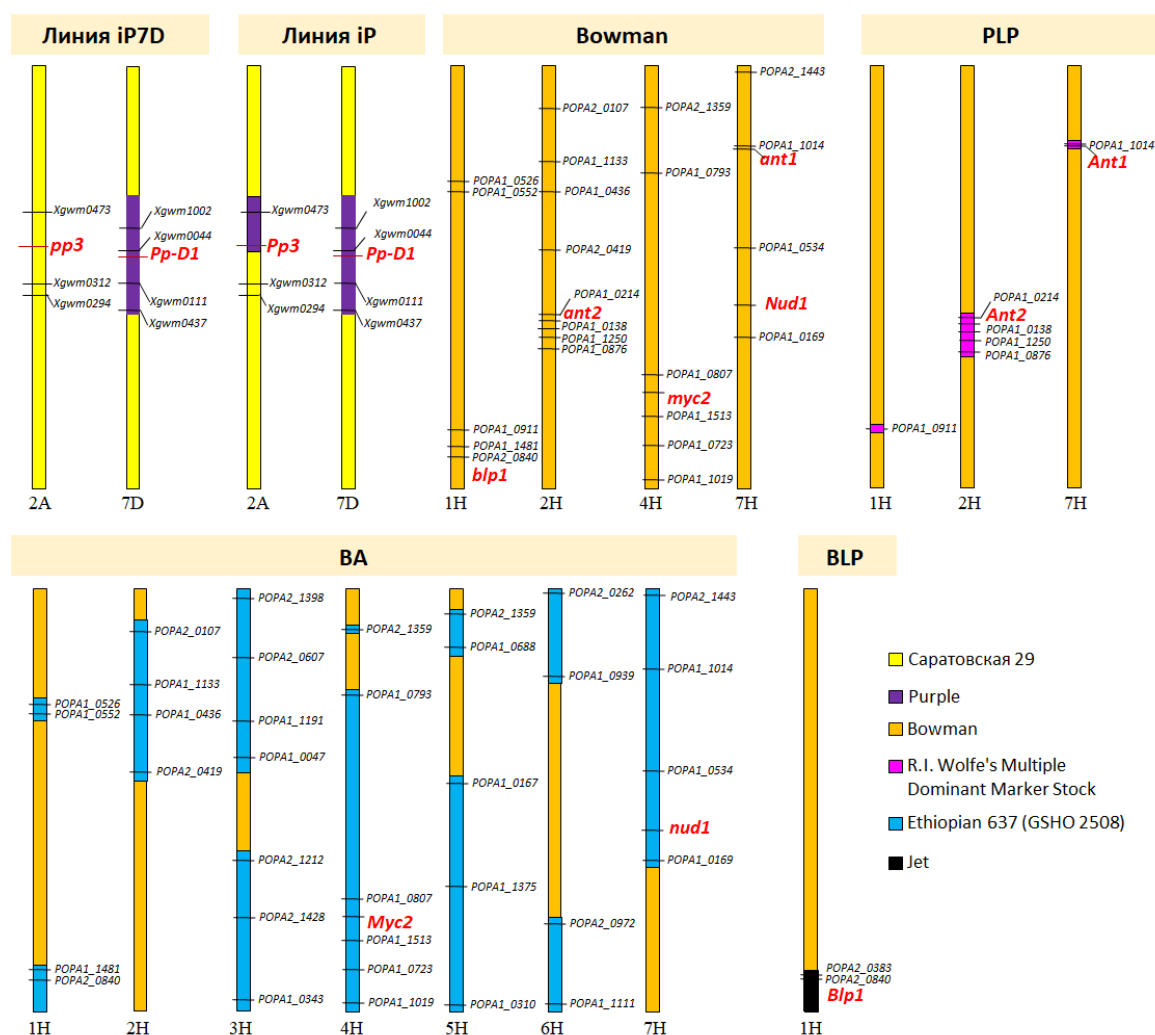


Рис. 1. Схематическое изображение хромосом родительских сортов и почти изогенных и рекомбинантной линий ячменя и пшеницы, используемых в работе. Разным цветом обозначены участки привнесенных в геномы родительских сортов от доноров несущих генов, определяющих фенотипические отличия между линиями: гены *Ant1*, *Ant2* и *Pp-D1*, *Pp3* контролируют синтез антоцианов в перикарпе зерна ячменя и пшеницы соответственно; ген *Myc2* контролирует синтез антоцианов в алейроновом слое зерна ячменя; ген *Blp1* контролирует синтез меланинов в чешуях колоса и в перикарпе зерна; ген *Nud1* в доминантном состоянии контролирует у ячменя пленчатость, в рецессивном – голозерность. Положение рекомбинантных участков относительно ДНК-маркеров отмечено согласно [10, 14]. Линия ВА является рекомбинантной, остальные линии – почти изогенные, для последних показаны лишь те хромосомы, в которых были выявлены рекомбинантные участки от доноров

Зерно ячменя и пшеницы подвергали обработке по технологии получения хакасского национального зернового продукта талгана. Для этого его обжаривали в течение 10 мин при температуре 150 °С, далее охлаждали и измельчали до размера частиц 0.25–0.7 мм [5].

Для анализа содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности (АОА) в зерне образцов пшеницы и ячменя использовали муку, полученную из зерна растений, выращенных осенью 2022 года в гидропонной теплице ИЦиГ СО РАН (Новосибирск). Антиоксидантную активность и общее содержание свободных фенольных соединений измеряли с помощью 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (DPPH) и реактива Фолина-Чокальтеу (AppliChem GmbH, Darmstadt, Germany) соответственно, по методикам, описанным в [15]. Антиоксидантную активность (АОА) выражали в процентах, отражающих изменение оптической плотности раствора DPPH через 30 мин после добавления метанольного экстракта зерна. Содержание фенольных соединений в зерне выражали в мг эквивалентов феруловой кислоты (ЭФК) на

грамм муки. Общая влага зерна была определена с помощью методики, заключающейся в высушивании навески при температуре 103 ± 2 °С до постоянной массы.

Статистический анализ полученных измерений проводился 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. Тесноту связи между содержанием фенолов и АОА в зерне оценивали с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена.

Результаты и обсуждение

Содержание фенольных соединений в зерне злаков варьирует в зависимости от генотипа, цвета зерна, его типа (пленчатое или голозерное, в случае ячменя) и условий произрастания [16, 17].

В представленном исследовании, используя в качестве точных генетических моделей почти изогенные линии, которые отличаются от неокрашенных образцов локусами, контролирующими накопление пигментов в зерновках (рис. 1), было показано, что зерно всех пигментированных линий ячменя и пшеницы по содержанию фенольных соединений существенно отличалось от соответствующих непигментированных контрольных образцов, в том числе после тепловой обработки (табл. 2).

Наибольшее содержание фенольных соединений наблюдалось в зерне черnozерной линии ВLP, превышавшее на 63% этот показатель неокрашенного образца ВW ($p < 0.05$). Наименьшее содержание среди окрашенных образцов продемонстрировала голубозерная линия ВА, но и у нее содержание фенольных соединений в зерне было на 18% выше, чем таковое у контрольной линии ($p < 0.05$).

Отметим, что зерно пшеницы по сравнению с ячменем характеризовалось меньшим содержанием фенольных соединений. Содержащая антоцианы линия пшеницы iP имела на 13% больше фенольных соединений в зерне, чем контрольная iP7D ($p < 0.05$).

Значения АОА экстрактов зерна ячменя были повышены у голубозерной ВА и черnozерной ВLP линий по сравнению с контрольной линией. Наибольшим уровнем АОА характеризовалось зерно черnozерной линии ВLP, у которой этот показатель превысил на 71% таковой сорта ВW ($p < 0.05$). Хотя средние величины АОА экстрактов зерна фиолетовозерных линий ячменя и пшеницы были выше по сравнению с соответствующими значениями, зафиксированными для контрольных линий, статистически значимых отличий между ними выявлено не было.

Как видно из данных, представленных в таблице 3, между содержанием фенольных соединений в зерне и АОА экстрактов зерна суммарно у обеих культур была выявлена существенная положительная корреляционная связь ($r_s = 0.879$, $p < 0.05$).

Как и следовало ожидать, зерно, содержащее меланин линии ВLP, до и после обжарки характеризовалось самой темной окраской, тогда как зерно остальных линий после обжарки приобретало коричневый оттенок. Талган по внешнему виду был темнее необжаренного перемолотого зерна (рис. 2).

После термообработки зерна у всех исследованных образцов регистрировался рост содержания фенольных соединений от 8% (у линии PLP) до 43% (iP) ($p < 0.05$). При этом различий в содержании влаги в зерне между исходными образцами и образцами, подвергнутыми термообработке, выявлено не было (табл. 2).

Таблица 2. Влияние термической обработки зерна образцов ячменя и пшеницы на содержание фенолов и его антиоксидантную активность

Название образца	Исходное зерно			Зерно после термообработки		
	содержание фенолов, мг/г ЭФК	величина АОА, %	содержание влаги, %	содержание фенолов, мг/г ЭФК	величина АОА, %	содержание влаги, %
ВW	1.86±0.06*	15.9±2.1**	8.53±0.12	2.38±0.06*	23.1±1.4**	8.52±0.29
PLP	2.35±0.04*#	20.2±1.2	8.64±0.20	2.55±0.06*	21.5±0.4	8.51±0.09
ВА	2.19±0.10*#	25.7±1.8#	8.78±0.21	2.66±0.03*#	28.1±0.5#	8.64±0.20
ВLP	3.04±0.10*#	27.1±1.8#	8.45±0.17	3.48±0.12*#	33.7±5.8	8.48±0.16
iP7D	1.58±0.04*	11.5±1.8**	8.43±0.23	2.03±0.03*	14.2±0.3**	8.45±0.37
iP	1.78±0.02*#&	12.8±0.6**	8.95±0.10&	2.55±0.11*#&	18.3±4.0**	8.86±0.10&

Примечание: отмечены достоверные отличия при $p < 0.05$ в содержании фенолов (*), величине АОА (**) и содержании влаги (***) между исходным зерном и зерном после термообработки, а также между окрашенными линиями ячменя (#), пшеницы (&) и соответствующими неокрашенными контрольными линиями.

Таблица 3. Корреляционная связь между исследуемыми функциональными показателями образцов зерна ячменя и пшеницы

Объект	Связь между содержанием фенолов и АОА в зерне		Связь между показателями у исходного и обработанного зерна	
	исходном	обработанном	фенол-фенол	АОА-АОА
Ячмени	0.764	0.913	0.958*	0.847
Ячмени + пшеницы	0.879*	0.896*	0.936*	0.935*

Примечание: *коэффициент корреляции имеет статистически значимое значение при $p < 0.05$.

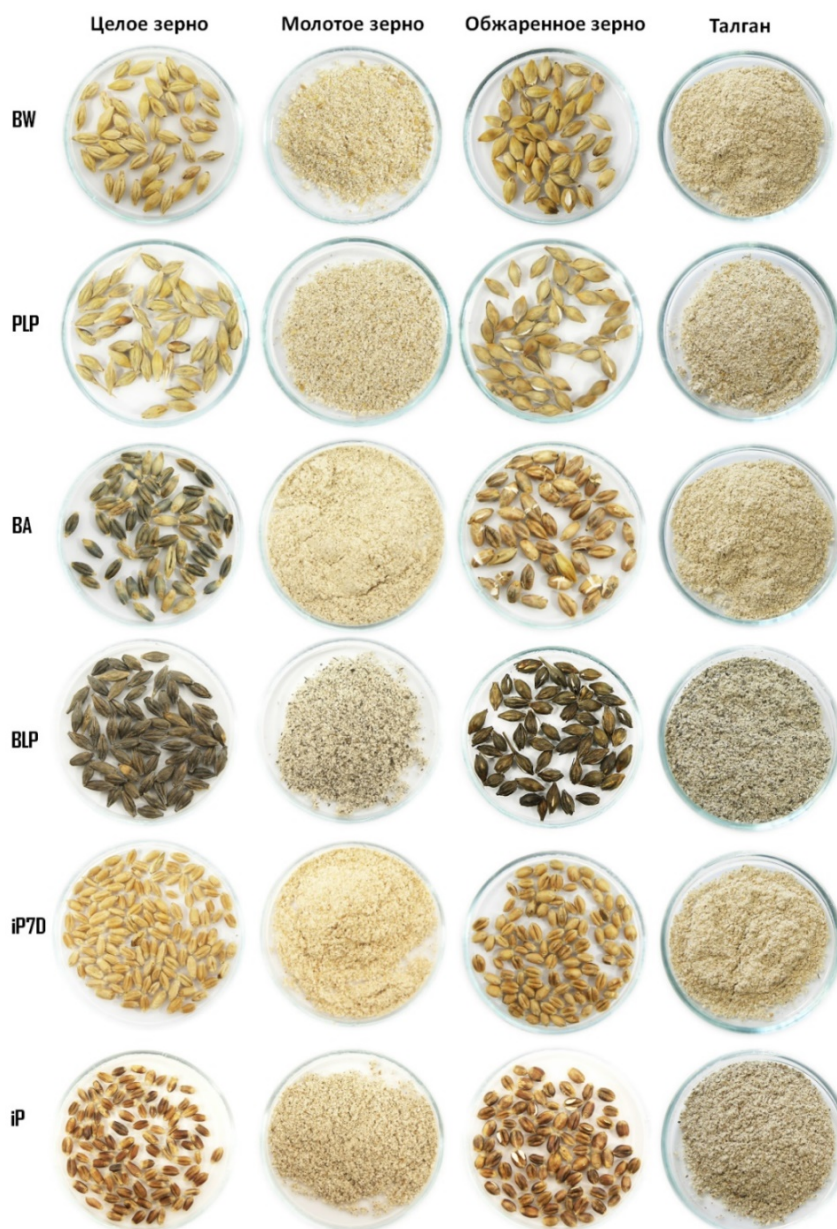


Рис. 2. Целое и молотое спелое зерно, а также обжаренное зерно и талган, полученные из линий ячменя (BW, PLP, BA, BLP) и пшеницы (iP7D, iP), используемых в работе

Наблюдаемое увеличение содержания фенольных соединений после термообработки, по-видимому, не связано с их концентрированием вследствие потери влаги, а может быть объяснено высвобождением связанных фенольных кислот путем разрушения клеточных компонентов и клеточных стенок [18], а также с отщеплением конъюгированного фенольного фрагмента во время термической обработки, за которым следуют реакции полимеризации, окисления и образования фенольных соединений, отличных от тех, которые содержатся в исходном зерне. Кроме того, обжаривание может изменить соотношение между различными фенольными соединениями вследствие их термической деструкции [19].

Анализ АОА экстрактов талгана после термообработки показал существенное увеличение этого параметра лишь в продукте, полученном из неокрашенного образца BW – на 45.3% относительно исходного зерна, – тогда как в талгане из пигментированных образцов ячменя величина АОА достоверно не превышала аналогичный показатель необработанного зерна. В случае пшеницы талган и из окрашенного iP, и неокрашенного iP7D образцов характеризовался статистически значимым увеличением уровня АОА на 43.0 и 23.5% соответственно. Между содержанием фенольных соединений в талгане и АОА экстрактов талгана была выявлена достоверная положительная корреляция ($r_s = 0.896$, $p < 0.05$), кроме этого сильная положительная связь была выявлена между содержанием фенольных соединений в исходном и обжаренном зерне и величиной АОА, которая в случае суммарного учета обеих культур была статистически доказана ($r_s = 0.936$, $r_s = 0.935$, $p < 0.05$) (табл. 3).

При сравнении содержания фенольных соединений в талгане, изготовленном из зерна окрашенных и неокрашенных контрольных линий, большее содержание фенольных соединений было выявлено в талгане, изготовленном из окрашенного зерна. Наибольшее содержание фенольных соединений было выявлено в конечном продукте, изготовленном из зерна черnozерной линии BLP, превысившее на 47% таковое в талгане, полученном из зерна контрольной линии BW ($p < 0.05$). Отметим, что содержание фенольных соединений в талгане, изготовленном из зерна голубозерной линии BA и фиолетовозерной линии PLP, было выше на 12% ($p < 0.05$) и 7% соответственно, чем у талгана из зерна контрольной линии BW.

Содержание фенольных соединений в талгане из зерна фиолетовозерной линии пшеницы iP превышало содержание фенольных соединений в талгане, изготовленном из зерна контрольной линии пшеницы iP7D на 26% ($p < 0.05$).

Значения АОА экстрактов талгана, полученного из зерна голубозерной BA и черnozерной BLP линий были выше по сравнению с неокрашенным контролем на 22% ($p < 0.05$) и 46% соответственно, однако статистически существенные отличия относительно контроля удалось зафиксировать лишь для линии BA. Талган из зерна фиолетовозерной линии пшеницы iP аналогично характеризовался повышенным уровнем по сравнению с талганом, изготовленным из зерна контрольной линии iP7D, однако выявленные отличия статистически не были доказаны.

Как было показано ранее, условия термообработки пигментированного зерна могут по-разному влиять на значение АОА конечного зернового продукта. Так, при обжарке на сковороде и в микроволновой печи желтой, фиолетовой и черной пшеницы было найдено, что все способы обжарки повышали индекс потемнения, водопоглощающую и маслопоглощающую способности. Однако в обжаренных образцах наблюдалось снижение плотности, общего содержания фенолов, флавоноидов и антоцианов, а также антиоксидантной активности [7].

При обжаривании зерна пигментированного и непигментированного риса в различных температурных условиях (100, 150 и 200 °C) и продолжительности (10 и 20 мин) было найдено, что содержание антоцианов в пигментированном рисе увеличилось на 15% при воздействии температуры 100 °C в течение 20 мин, но резко снизилось при более высокой температуре и большей экспозиции. Оптимальная температура и длительность обжарки для получения максимального эффекта увеличения содержания антоцианов и общего содержания фенолов характеризовалась значением 100 °C для пигментированного и 200 °C для непигментированного риса в течение 20 мин [20].

Другие авторы оценивали влияние температуры (100, 115, 130 °C) и продолжительности (10, 15, 20 мин) термообработки зерна на содержание антоцианов, общее количество фенолов и антиоксидантную способность пигментированной кукурузы [21]. Результаты показали, что термическая обработка такого зерна при температуре 115 °C в течение 10 мин значительно повысила содержание в нем антоцианов, но при более высоких температурах или длительном воздействии их содержание снижалось.

Тестирование условий термообработки при изготовлении талгана из пигментированного зерна ячменя позволит подобрать оптимальные режимы с целью повышения уровня АОА в конечном зерновом продукте, изготовленном из зерна такого типа.

Заключение

Используя модели почти изогенных и рекомбинантной линий ячменя и пшеницы, отличающихся накоплением пигментов в зерне, была оценена перспектива применения пигментированного зерна для изготовления национального хакасского зернового продукта талгана. Установлено, что в результате теплового

воздействия на зерно ячменя и пшеницы происходит увеличение как содержания в нем фенолов, так и величины антиоксидантной активности, что указывает на существование тесной связи между рассмотренными функциональными показателями. На основе полученных экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что пигментированное зерно ячменя и пшеницы является перспективным сырьем для производства функционального продукта здорового питания – талгана с повышенным уровнем фенольных соединений и антиоксидантной активностью.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-16-20101) и Министерства науки и инновационной политики Новосибирской области (№ 30-2025-000848).

Работа Молобековой К.А. поддержана бюджетным проектом FWNR-2025-0020.

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Francavilla A., Joye I.J. Anthocyanins in whole grain cereals and their potential effect on health // *Nutrients*. 2020. Vol. 12. 2922. <https://doi.org/10.3390/nu12102922>.
2. 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. Vol. 57. Pp. 1729–1741. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1030064>.
3. Yang X., Tang C., Zhao Q., Jia Y., Qin Y., Zhang J. Melanin: a promising source of functional food ingredient // *Journal of Functional Foods*. 2023. Vol. 105. 105574. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105574>.
4. Usenko N.I., Khlestkina E.K., Asavasanti S., Gordeeva E.I., Yudina R.S., Otmakhova Y.S. Possibilities of enriching food products with anthocyanins by using new forms of cereals // *Foods and Raw Materials*. 2018. Vol. 6. Pp. 128–135. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-128-135>.
5. Сумина А.В., Полонский В.И., Шалдаева Т.М., Шульбаева М.Т. Содержание антиоксидантов в продуктах хакасской национальной кухни на основе зерна ячменя // *Вестник КрасГАУ*. 2019. Т. 12. С. 125–130.
6. Wang B., Nie C., Li T., Zhao J., Fan M., Li Y., Qian H., Wang L. Effect of Boiling and Roasting on Phenolic Components and Their Bioaccessibilities of Highland Barley // *Food Research International*. 2022. Vol. 162. 112137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112137>.
7. Dhua S., Kheto A., Singh Sharanagat V., Singh L., Kumar K., Nema P.K. Quality characteristics of sand, pan and microwave roasted pigmented wheat (*Triticum Aestivum*) // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 365. 130372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130372>.
8. Drawbridge P.C., Apea-Bah F., Silveira Hornung P., Beta T. Bioaccessibility of phenolic acids in canadian hullless barley varieties // *Food Chemistry*. 2021. Vol. 358. 129905. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129905>.
9. Sharma P., Goudar G., Longvah T., Gour Vinod. S., Kothari S.L., Wani I.A. Fate of polyphenols and antioxidant activity of barley during processing // *Food Reviews International*. 2022. Vol. 38. Pp. 163–198. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1725036>.
10. Druka A., Franckowiak J., Lundqvist U., Bonar N., Alexander J., Houston K., Radovic S., Shahinnia F., Vendramin V., Morgante M., Stein N., Waugh R. Genetic dissection of barley morphology and development // *Plant Physiology*. 2011. Vol. 155, no. 2. Pp. 617–627. <https://doi.org/10.1104/pp.110.166249>.
11. Glagoleva A., Kukoeva T., Mursalimov S., Khlestkina E., Shoeva O. Effects of combining the genes controlling anthocyanin and melanin synthesis in the barley grain on pigment accumulation and plant development // *Agronomy*. 2022. Vol. 12. 112. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010112>.
12. Shoeva O.Y., Mursalimov S.R., Gracheva N.V., Glagoleva A.Y., Börner A., Khlestkina E.K. Melanin formation in barley grain occurs within plastids of pericarp and husk cells // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 179. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56982-y>.
13. Arbuzova V.S., Maystrenko O.I., Popova O.M. Development of near-isogenic lines of the common wheat cultivar ‘Saratovskaya 29’ // *Cereal Research Communications*. 1998. Vol. 26. Pp. 39–46. <https://doi.org/10.1007/BF03543466>.
14. 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. Vol. 203. Pp. 469–476. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1317-8>.
15. Kukoeva T.V., Molobekova C.A., Totsky I.V., Vasiliev G.V., Pronozin A.Y., Afonnikov D.A., Khlestkina E.K., Shoeva O.Y. Enrichment of grain anthocyanin content through marker-assisted breeding for *Ant1*, *Ant2* or *HvMyc2* genes in barley (*Hordeum vulgare* L.) // *Agronomy*. 2024. Vol. 14. 1231. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061231>.

16. Abdel-Aal E.-S.M., Choo T.-M., Dhillon S., Rabalski I. Free and bound phenolic acids and total phenolics in black, blue, and yellow barley and their contribution to free radical scavenging capacity // *Cereal Chemistry Journal*. 2012. Vol. 89. Pp. 198–204. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-10-11-0116>.
17. Полонский В.И., Сумина А.В., Шалдаева Т.М. Суммарное содержание природных антиоксидантов в зерне ячменя в различных условиях выращивания // *Вестник КрасГАУ*. 2017. Т. 12. С. 21–28.
18. Shawky E., Bassam S.M., Marzouk H.S., Ghareeb D.A., El Sohafy S.M. Exploring the dynamics of bioactive metabolites changes in barley grains (*Hordeum vulgare* L.) during roasting: insights from UPLC-QqQ-MS/MS analysis combined to chemometrics // *Food Research International*. 2024. Vol. 178. 113961. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113961>.
19. Ragaei S., Seetharaman K., Abdel-Aal E.-S.M. The impact of milling and thermal processing on phenolic compounds in cereal grains // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2014. Vol. 54. Pp. 837–849. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.610906>.
20. Yamuangmorn S., Sreethong T., Saenchai C., Rerkasem B., Prom-u-thai C.T. Effects of roasting conditions on anthocyanin, total phenolic content, and antioxidant capacity in pigmented and non-pigmented rice varieties // *International Food Research Journal*. 2021. Vol. 28, no. 1. Pp. 73–82. <https://doi.org/10.47836/ifrj.28.1.07>.
21. Minh N.P. Influence of thermal treatment on anthocyanin, total phenolic content and antioxidant capacity of pigmented maize (*Zea mays* L.) // *Plant Science Today*. 2021. Vol. 8. Pp. 1075–1078. <https://doi.org/10.14719/pst.2021.8.4.1294>.

Поступила в редакцию 2 июня 2025 г.

После переработки 8 июля 2025 г.

Принята к публикации 13 августа 2025 г.

Sumina A.V.^{1*}, *Polonskiy V.I.*², *Gordeeva E.I.*³, *Molobekova K.A.*³, *Shoeva O.Yu.*³ THE EFFECT OF HEAT TREATMENT OF PIGMENTED BARLEY AND WHEAT GRAINS ON ITS ANTIOXIDANT ACTIVITY

¹ N.F. Katanov Khakass State University, st. Lenina, 90, Abakan, 655000, Russia, alenasumina@list.ru

² Krasnoyarsk State Agrarian University, ave. Mira, 90, Krasnoyarsk, 660049, Russia

³ Institute of Cytology and Genetics SB RAS, ave. Lavrentjeva, 10, Novosibirsk, 630090, Russia

The purpose of this study is to analyze the effect of heat treatment of pigmented grain of near isogenic wheat and barley lines on the content of phenolic compounds and the antioxidant activity of the Khakass national product talgan, in the manufacture of which the grain is roasted and ground. The work was carried out using near isogenic wheat lines iP and barley PLP, BA, BLP, which differ from the control unpigmented lines iP7D and Bowman, respectively, by the presence of anthocyanin or melanin pigments in the grain. It was shown that pigmented wheat and barley grains contained 13–63% more phenolic compounds compared to the grain of the control lines. At the same time, the BLP barley line, which accumulates melanins in grain, was characterized by the highest content of phenolic compounds (3.04 mg/g), and the iP7D wheat line was characterized by the lowest (1.58 mg/g).

A strong positive correlation was found between the content of free phenolic compounds and the antioxidant activity of methanol extracts of grain ($r_s = 0.879$, $p < 0.05$). The talgan prepared from the tested grain showed an increase in the content of phenolic compounds by 8–43% compared to the initial grain. At the same time, pigmented grains were characterized by a higher content of phenolic compounds (wheat: 2.55 mg/g; barley: 2.55–3.48 mg/g) compared with grains of control lines (wheat: 2.03 mg/g; barley: 2.38 mg/g).

The value of the antioxidant activity of talgan extracts was either significantly higher (Bowman, iP7D, iP) or tended to increase (PLP, BA, BLP) compared with unprocessed grain, while there was a strong positive correlation between the content of free phenolic compounds and the antioxidant activity of talgan extracts ($r_s = 0.896$, $p < 0.05$). Thus, the results demonstrated that pigmented wheat and barley grains are promising raw materials for the production of a functional healthy food product, the national Khakass talgan.

Keywords: functional product, anthocyanins, grain, thermal effect, melanins, antioxidant activity, phenols.

For citing: Sumina A.V., Polonskiy V.I., Gordeeva E.I., Molobekova K.A., Shoeva O.Yu. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2026, no. 1, pp. 257–265. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20260117240>.

References

1. Francavilla A., Joye I.J. *Nutrients*, 2020, vol. 12, 2922. <https://doi.org/10.3390/nu12102922>.
2. Li D., Wang P., Luo Y., Zhao M., Chen F. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2017, vol. 57, pp. 1729–1741. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1030064>.
3. Yang X., Tang C., Zhao Q., Jia Y., Qin Y., Zhang J. *Journal of Functional Foods*, 2023, vol. 105, 105574. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2023.105574>.

* Corresponding author.

4. Usenko N.I., Khlestkina E.K., Asavasanti S., Gordeeva E.I., Yudina R.S., Otmakhova Y.S. *Foods and Raw Materials*, 2018, vol. 6, pp. 128–135. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2018-1-128-135>.
5. Sumina A.V., Polonskiy V.I., Shaldayeva T.M., Shulbayeva M.T. *Vestnik KrasGAU*, 2019, vol. 12, pp. 125–130. (in Russ.).
6. Wang B., Nie C., Li T., Zhao J., Fan M., Li Y., Qian H., Wang L. *Food Research International*, 2022, vol. 162, 112137. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112137>.
7. Dhua S., Kheto A., Singh Sharanagat V., Singh L., Kumar K., Nema P.K. *Food Chemistry*, 2021, vol. 365, 130372. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130372>.
8. Drawbridge P.C., Apea-Bah F., Silveira Hornung P., Beta T. *Food Chemistry*, 2021, vol. 358, 129905. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129905>.
9. Sharma P., Goudar G., Longvah T., Gour Vinod. S., Kothari S.L., Wani I.A. *Food Reviews International*, 2022, vol. 38, pp. 163–198. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1725036>.
10. Druka A., Franckowiak J., Lundqvist U., Bonar N., Alexander J., Houston K., Radovic S., Shahinnia F., Vendramin V., Morgante M., Stein N., Waugh R. *Plant Physiology*, 2011, vol. 155, no. 2, pp. 617–627. <https://doi.org/10.1104/pp.110.166249>.
11. Glagoleva A., Kukoeva T., Mursalimov S., Khlestkina E., Shoeva O. *Agronomy*, 2022, vol. 12, 112. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010112>.
12. Shoeva O.Y., Mursalimov S.R., Gracheva N.V., Glagoleva A.Y., Börner A., Khlestkina E.K. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 179. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-56982-y>.
13. Arbuzova V.S., Maystrenko O.I., Popova O.M. *Cereal Research Communications*, 1998, vol. 26, pp. 39–46. <https://doi.org/10.1007/BF03543466>.
14. Gordeeva E.I., Shoeva O.Y., Khlestkina E.K. *Euphytica*, 2015, vol. 203, pp. 469–476. <https://doi.org/10.1007/s10681-014-1317-8>.
15. Kukoeva T.V., Molobekova C.A., Totsky I.V., Vasiliev G.V., Pronozin A.Y., Afonnikov D.A., Khlestkina E.K., Shoeva O.Y. *Agronomy*, 2024, vol. 14, 1231. <https://doi.org/10.3390/agronomy14061231>.
16. Abdel-Aal E.-S.M., Choo T.-M., Dhillon S., Rabalski I. *Cereal Chemistry Journal*, 2012, vol. 89, pp. 198–204. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-10-11-0116>.
17. Polonskiy V.I., Sumina A.V., Shaldayeva T.M. *Vestnik KrasGAU*, 2017, vol. 12, pp. 21–28. (in Russ.).
18. Shawky E., Bassam S.M., Marzouk H.S., Ghareeb D.A., El Sohafy S.M. *Food Research International*, 2024, vol. 178, 113961. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.113961>.
19. Ragaei S., Seetharaman K., Abdel-Aal E.-S.M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, vol. 54, pp. 837–849. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.610906>.
20. Yauangmorn S., Sreethong T., Saenchai C., Rerkasem B., Prom-u-thai C.T. *International Food Research Journal*, 2021, vol. 28, no. 1, pp. 73–82. <https://doi.org/10.47836/ijfj.28.1.07>.
21. Minh N.P. *Plant Science Today*, 2021, vol. 8, pp. 1075–1078. <https://doi.org/10.14719/pst.2021.8.4.1294>.

Received June 2, 2025

Revised July 8, 2025

Accepted August 13, 2025

Сведения об авторах

Сумина Алена Владимировна – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры химии и геоэкологии, alenasumina@list.ru

Полонский Вадим Игоревич – доктор биологических наук, профессор, профессор кафедры ландшафтной архитектуры и ботаники, vadim.polonskiy@mail.ru

Гордеева Елена Ивановна – кандидат биологических наук, научный сотрудник, elgordeeva@bionet.nsc.ru

Молобекова Камилла Ардаковна – инженер, K.Molobekova@bionet.nsc.ru

Шоева Олеся Юрьевна – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, olesya_ter@bionet.nsc.ru

Information about authors

Sumina Alena Vladimirovna – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Chemistry and Geoecology, alenasumina@list.ru

Polonskiy Vadim Igorevich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Professor in the Department of Landscape Architecture and Botany, vadim.polonskiy@mail.ru

Gordeeva Elena Ivanovna – Candidate of Biological Sciences, Researcher, elgordeeva@bionet.nsc.ru

Molobekova Kamilla Ardakovna – Engineer, K.Molobekova@bionet.nsc.ru

Shoeva Olesya Yuryevna – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, olesya_ter@bionet.nsc.ru