

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336>



Поступила 23.05.2026

Поступила после рецензирования 15.06.2026

Принята в печать 17.06.2026

© Купаева Н. В., Чернуха И. М., Трубина М. В., Нестерова М. Д., Кузина М. П., 2026

<https://www.fsjour.com/jour>

Научная статья

Открытый доступ

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ФЕНОЛЬНЫХ АНТИОКСИДАНТОВ ИЗ ПШЕНИЧНЫХ ОТРУБЕЙ

Купаева Н. В.^{1*}, Чернуха И. М.¹, Трубина М. В.¹, Нестерова М. Д.¹, Кузина М. П.¹

Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АННОТАЦИЯ

фенольные соединения, растительные антиоксиданты, вторичные продукты переработки, механизмы HAT и SET, функциональные ингредиенты

Пшеничные отруби (ПО) являются перспективным источником связанных фенольных соединений (ФС), обладающих антиоксидантными свойствами. Однако значительная часть ФС ассоциирована с полисахаридной матрицей клеточной стенки и характеризуется ограниченной биодоступностью. Целью работы являлась оптимизация условий ферментативной экстракции антиоксидантов (АО) из пшеничных отрубей с использованием комплекса α -амилазы, β -глюканазы и ксиланазы. На первом этапе исследовали влияние концентрации α -амилазы и β -глюканазы в диапазоне от 0,001 % до 1 % при фиксированной концентрации ксиланазы 2 %. На втором этапе оценивали влияние продолжительности экстракции в диапазоне от 1 до 9 ч. Антиоксидантный потенциал (АОП) экстрактов определяли путем измерения общей антиоксидантной емкости (ОАЕ) методами FRAP, DPPH и ORAC, а также общего количества фенольных соединений (ОКФС) и флавоноидов (ОКФ). Установлено, что ферментативная обработка способствовала увеличению ОАЕ и содержания фенольных соединений по сравнению с контрольным образцом без добавления ферментов. Повышение концентрации ферментов от 0,001 % до 1 % сопровождалось увеличением ОАЕ_{FRAP} на 56,7 % ($p < 0,05$), ОАЕ_{ORAC} — более чем в 2 раза ($p < 0,05$), а содержание фенольных соединений возрастало до $13,32 \pm 0,23$ мкмоль-экв. Г/г отрубей. Увеличение продолжительности экстракции приводило к дальнейшему росту АОП экстрактов, при этом максимальные значения ОАЕ_{ORAC} и ОКФС были достигнуты при 7–8 ч обработки и составляли $5,31 \pm 0,18$ мкмоль-экв. Q/г и $14,19 \pm 0,18$ мкмоль-экв. Г/г отрубей ($p < 0,05$), соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности ферментативной обработки пшеничных отрубей для получения экстрактов с повышенным антиоксидантным потенциалом, которые могут рассматриваться в качестве источников природных антиоксидантов и функциональных ингредиентов для пищевой промышленности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проводилось в рамках государственного задания ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН FGUS-2026-0003.

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность за предоставление образцов отделу безопасности и качества зерна и зернопродукции Всероссийскому научно-исследовательскому институту зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

Received 23.05.2026

Accepted in revised 15.06.2026

Accepted for publication 17.06.2026

© Kupaeva N. V., Chernukha I. M., Trubina M. V., Nesterova M. D., Kuzina M. P., 2026

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Original scientific article

Open access

OPTIMIZATION OF ENZYMATIC EXTRACTION CONDITIONS FOR PHENOLIC ANTIOXIDANTS FROM WHEAT BRAN

Nadezhda V. Kupaeva^{1*}, Irina M. Chernukha¹, Maria V. Trubina¹, Maria D. Nesterova¹, Marina P. Kuzina¹

V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

KEYWORDS:

phenolic compounds, plant antioxidants, secondary raw materials, HAT and SET mechanisms, functional ingredients

ABSTRACT

Wheat bran (WB) is a promising source of bound phenolic compounds (PC) with antioxidant properties. However, a significant portion of PC is bound to the cell wall polysaccharide matrix and is characterized by limited bioavailability. The aim of this study was to optimize the conditions for the enzymatic extraction of antioxidants (AO) from wheat bran using a complex of α -amylase, β -glucanase, and xylanase. In the first stage, the effect of α -amylase and β -glucanase concentrations ranging from 0.001 % to 1 % was investigated at a fixed xylanase concentration of 2 %. In the second stage, the effect of extraction duration in the range from 1 to 9 hours was evaluated. The antioxidant potential (AOP) of the extracts was determined by measuring total antioxidant capacity (TAC) using FRAP, DPPH, and ORAC methods, as well as the total phenolic compounds (TPC) and total flavonoid compounds (TFC). Enzymatic treatment was found to increase TAC and phenolic compound content compared to the control sample obtained without added enzymes. Increasing enzyme concentration from 0.001 % to 1 % was accompanied by a 56.7 % ($p < 0.05$) increase in TAC_{FRAP} and more than twofold ($p < 0.05$) increase in TAC_{ORAC}, while the content of phenolic compounds increased to 13.32 ± 0.23 μ mol-eq. G/g of bran. Increasing extraction duration led to a further increase in the AOP of the extracts, with the maximum values of TAC_{ORAC} and TPC reached upon 7–8 hours of treatment and amounted to 5.31 ± 0.18 μ mol-eq. Q/g and 14.19 ± 0.18 μ mol-eq. G/g of bran ($p < 0.05$), respectively. The results obtained indicate the potential of enzymatic treatment of wheat bran for obtaining extracts with increased antioxidant potential, which can be considered sources of natural antioxidants and functional ingredients for the food industry.

FUNDING: The article was published as part of the research topic No. FGUS-2026-0003 of the state assignment of the V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of RAS.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors express their gratitude to the Department of Grain and Grain Products Safety and Quality of the All-Russian Research Institute of Grain and Grain Products Processing — a branch of the V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems of the Russian Academy of Sciences, for providing the wheat bran samples used in this study.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Купаева, Н.В., Чернуха И. М., Трубина М. В., Нестерова М. Д., Кузина М. П. (2026). Оптимизация условий ферментативной экстракции фенольных антиоксидантов из пшеничных отрубей. *Пищевые системы*, 9(2), 329–336. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336>

FOR CITATION: Kupaeva, N.V., Chernukha, I.M., Trubina, M.V., Nesterova, M.D., Kuzina, M.P. (2026). Optimization of enzymatic extraction conditions for phenolic antioxidants from wheat bran. *Food Systems*, 9(2), 329–336. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2026-9-2-329-336>

1. Введение

В настоящее время природные антиоксиданты (АО) растительного происхождения рассматриваются как перспективный функциональный ингредиент для пищевой промышленности благодаря их способности предотвращать окислительное повреждение биомолекул [1–5]. Антиоксиданты используют как в качестве функциональных ингредиентов при разработке продуктов с биологической активностью [6–8], так и в качестве антиокислителей для продления сроков годности и сохранности пищевой ценности продуктов питания [1–3].

В последние годы особое внимание уделяется поиску новых источников растительных АО [2–5], что связано с их биодоступностью [5], разнообразию, комплексности воздействия, многофункциональности и безопасности для организма [2–4] по сравнению с синтетическими аналогами. Перспективным направлением является использование вторичных продуктов переработки растительного сырья, что позволяет одновременно решать задачи ресурсосбережения и получения биологически активных соединений (БАС) с высокой добавленной стоимостью. Ежегодно в ходе деятельности аграрно-промышленного сектора производится более 630 млн тонн побочных продуктов, из которых 220–230 млн тонн приходится на отходы растительного происхождения [9]. Одним из перспективных вторичных продуктов являются пшеничные отруби (ПО), образующиеся при переработке зерна. Известно, что выход отрубей при помоле пшеницы составляет 13–19 % от массы перерабатываемого зерна в зависимости от способа помола [10]. По данным Росстата, в 2023 г. в России было произведено 9,1 млн т пшеничной и пшенично-ржаной муки [11]; с учетом выхода муки при переработке зерна и доли отрубей в массе зерновки потенциальный объем образования ПО можно оценить на уровне 1,6–2,3 млн т в год.

Пшеничные отруби представляют собой наружные зерновые слои, включающие плодовые и семенные оболочки, а также алейроновый слой. ПО характеризуются богатым химическим составом и содержат около 40–50 % пищевых волокон (целлюлозы, ксиланов и лигнина), 16 % белковых соединений, минералов (магний, фосфор, железо и др.), витаминов С, Е и группы В [12,13]. Однако наибольший интерес вызывает многообразие фенольных соединений (ФС), среди которых доминирует феруловая кислота (до 70 % от общего количества ФС) [14], а также лигнаны, алкилрезорцинолы, ванильная, кофейная и п-кумаровая кислоты, флавоноиды и другие соединения, обладающие антиоксидантными свойствами [15]. Так, арабиноксиланы и ксилоолигосахариды, связанные с феруловой кислотой, проявляют иммуномодулирующие [16] и пребиотические свойства [17,18]. Более того, ПО проявляют антиоксидантные свойства, обеспечивая защиту клеток от СР и окислительного стресса [19], а также пролонгированное противовоспалительное воздействие [20,21]. В работе Kobayashi et al [22] была показана способность экстрактов пшеничных отрубей к стимуляции синтеза коллагена и подавлению активности эластазы, гиалуронидазы и коллагеназы, что может быть использовано в косметической промышленности для создания функциональных ингредиентов.

Известно, что антиоксидантные свойства ПО в значительной степени определяются содержанием ФС и особенностями их локализации в растительной матрице. Значительная часть ФС отрубей находится в связанном состоянии и ассоциирована с полисахаридами клеточной стенки, преимущественно с арабиноксиланами, посредством сложноэфирных и ковалентных связей [23,24]. Пшеничные отруби содержат от 35 % до 50 % некрахмальных полисахаридов, при этом 60–70 % этого объема занимают арабиноксиланы, присоединяющие фенольные соединения в боковые цепи и удерживающие их в связанном состоянии [25]. Такое структурное сопряжение снижает биодоступность ФС и ограничивает проявление их биологических свойств. В связи с этим для эффективного использования антиоксидантного потенциала (АОП) пшеничных отрубей необходимо высвобождение связанных ФС и перевод их в доступную форму, что требует подбора методов экстракции и оптимизации условий процесса.

Для извлечения АО из растительного сырья применяют различные методы экстракции, включая мацерацию, ультразвуковую (УЗ), микроволновую, ферментативную и др. Выбранный способ экстракции оказывает существенное влияние как на количественный и качественный состав экстракта, так и на его антиоксидантный потенциал [26]. В ряде исследований показано, что ферментативная обработка ПО является одним из наиболее эффективных подходов к высвобождению связанных ФС за счет разрушения полисахаридной матрицы клеточных стенок [27,28]. Использование ферментативных препаратов, содержащих ксиланазу, β -глюканазу

и α -амилазу, обеспечивает гидролиз арабиноксиланов, β -глюканов и крахмальных компонентов, повышая доступность ФС и способствуя увеличению АОП экстрактов [29]. В работе Ye et al. [30] использование ксиланазы при экстракции ПО способствовало увеличению общего содержания ФС на 34,5 %, однако не привело к росту других параметров АОП. В исследовании Bautista-Expósito et al. [31] среди опробованных 13 ферментных комплексов наиболее высокие выход ФС и показатели АОП были характерны для экстракта, полученного с использованием ферментного препарата, включающего β -глюканазу, целлюлазу, α -амилазу, ксиланазу и пентозаназу, который способствовал эффективному разрушению полисахаридной матрицы ПО и высвобождению ФС. Ксиланазы способствуют гидролизу арабиноксиланов клеточных стенок [32], β -глюканазы — расщеплению β -глюканов и деструкции полисахаридных структур [33], что приводит к высвобождению связанных фенольных соединений [29]; α -амилаза — расщеплению крахмальных компонентов (снижение вязкости) [32]. В исследовании Ferri et al. было показано, что эффективность ферментативной экстракции определяется не только составом ферментного комплекса, но и соотношением ферментов, температурой и продолжительностью процесса [34]. Однако данные о влиянии указанных параметров на выход ФС и показатели АОП экстрактов пшеничных отрубей остаются ограниченными и в ряде случаев противоречивыми. Кроме того, недостаточно изучено влияние комбинированного применения ферментных препаратов на эффективность разрушения полисахаридной матрицы и высвобождение связанных АО.

Таким образом, целью данной работы являлась оптимизация условий ферментативной экстракции антиоксидантов из пшеничных отрубей для получения экстрактов, обладающих высоким антиоксидантным потенциалом.

2. Объекты и методы

Объектом исследования являлись пшеничные отруби из зерна 1 класса, собранного в 2023 году в Тульской области, Россия. Хранение образцов осуществлялось при температуре 4 ± 2 °C в плотно закрытой емкости. Образцы для исследования были предоставлены Отделом безопасности и качества зерна и зернопродукции Всероссийского научно-исследовательского института зерна и продуктов его переработки — филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН.

2.1. Реактивы

При проведении экспериментальных работ были использованы реактивы:

- ксиланазы (ферментативная активность: 10000 ед/г), β -глюканазы (ферментативная активность: 10000 ед/мл) — Биопрепарат (Россия);
- α -амилаза из *Aspergillus oryzae* (ферментативная активность: 30000 ед/г, ≥ 95 %) — Sigma (Switzerland);
- 2,2-дифенил-1-пикрилгидразил (DPPH, ≥ 90 %) — Santa Cruz Biotechnology (USA);
- 2,4,6-Три(2-пиридил)-1,3,5-пиридин (TPPZ, чистота ≥ 96 %) — BLD-pharm (China);
- железа хлорид (III) (≥ 97 %), Фолин-Чокальтеу, натрия карбонат ($\geq 99,5$ %), натрия ацетат безводный (≥ 99 %) — PanReac AppliChem (Spain);
- кверцетин (≥ 95 %, India), флуоресцеина натрия ($\geq 97,5$ %, USA), галловая кислота (≥ 98 %, China), 2,2'-азобис (2-дигидрохлорид метилпропионамида (AAPH, чистота ≥ 97 %, USA) — Sigma-aldrich;
- гексагидрат хлорида алюминия (Pharmapur) фирма ScharLab (Spain);
- глюкоза — AppliChem GmbH-AN ITW Company (Germany);
- фенол (≥ 99 %) — Диаэм (Россия);
- серная кислота (≥ 98 %) — Acros Organics (Belgium).

2.2. Подбор условий ферментативной экстракции пшеничных отрубей

Подбор условий ферментативной экстракции отрубей пшеничных проводили в 2 этапа: варьирование концентрации α -амилазы из *Aspergillus oryzae* (активность 30000 ед/г) и β -глюканазы (активность 10000 ед/мл) в диапазоне от 0,001 % до 1 % от массы отрубей с десятикратным шагом и определение оптимального времени экстракции (1–9 ч, с шагом в один час).

Вне зависимости от этапа подбора условий экстракция имела общий алгоритм: ПО смешивали с дистиллированной водой в соотношении 1:5 (г/мл) и добавляли ферменты (% от массы ПО). Смесь гомогенизировали с использованием ручного гомогенизатора S10

(Stegler, Китай) при 8000 об/мин в течение 2 мин и инкубировали при $60 \pm 2^\circ\text{C}$ и постоянном перемешивании при 500 об/мин на шейкере Immunochem-2200 (High Technology Inc., США). Экстракцию проводили без дополнительной корректировки pH. Температура процесса была выбрана с учетом диапазона активности используемых ферментов и необходимости минимизации термической деградации ФС. Полученную смесь разделяли с помощью центрифуги (LISTON C2204, Россия) в течение 10 мин при 3600 об/мин, отбирали надосадочную жидкость и хранили при минус 40°C . Перед проведением исследований образцы размораживали и повторно центрифугировали при 10000 об/мин в течение 10 мин при 4°C .

Подбор концентрации ферментов для экстракции пшеничных отрубей осуществляли путем варьирования концентрации α -амилазы и β -глюканазы в диапазоне концентраций от 0,001 % до 1 % от массы отрубей с десятикратным шагом. Концентрация ксиланазы составляла 2 % от массы ПО. Параметры были выбраны на основании литературных данных и технологически целесообразных концентраций ферментных препаратов. В контрольный образец не добавляли ферменты. Длительность инкубации составляла 3 часа при условиях, описанных выше. Обозначения образцов с разной концентрацией ферментов представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Обозначения образцов при подборе концентрации ферментов для экстракции

Table 1. Designations of the samples upon selection of an enzyme concentration for extraction

№ образца	Концентрация ферментов
Контроль	без ферментов
1	2 % ксиланазы; 0,001 % α -амилазы; 0,001 % β -глюканазы
2	2 % ксиланазы; 0,01 % α -амилазы; 0,01 % β -глюканазы
3	2 % ксиланазы; 0,1 % α -амилазы; 0,1 % β -глюканазы
4	2 % ксиланазы; 1 % α -амилазы; 1 % β -глюканазы

Для каждого образца определяли параметры АОП: общую антиоксидантную емкость (ОАЕ) методами FRAP, ORAC и DPPH для учета вклада антиоксидантов, действующих по разным механизмам, измеряли общее количество фенольных соединений (ОКФС) и флавоноидов (ОКФ).

Продолжительность экстракции варьировали в диапазоне от 1 до 9 ч с шагом 1 час для оценки динамики высвобождения АО и определения оптимального времени процесса. Концентрации ферментов составляли 2 % ксиланазы, 1 % α -амилазы; % β -глюканазы. Экстракцию проводили в условиях, описанных выше. В полученных образцах определяли аналогичные параметры АОП.

2.3. Методы определения параметров антиоксидантного потенциала

Общую антиоксидантную емкость методом свободного радикала DPPH (ОАЕ_{DPPH}) определяли на спектрофотометре СФ-2000 (Спектр, Россия) в соответствии с методикой [35]. Стоковый 1 мМ этанольный раствор радикала DPPH готовили в посуде из темного стекла и настаивали в темноте при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 12 ч. Рабочий 100 мкМ раствор DPPH с оптической плотностью не менее 1,0 оптической единицы готовили непосредственно перед измерением. Для определения ОАЕ_{DPPH} в стеклянные пробирки вносили 1,52 мл рабочего раствора DPPH и 80 мкл образца, в качестве холостой пробы использовали 96 % этиловый спирт. Для построения калибровочного графика использовали кверцетин (Q) в концентрациях 100–250 мкМ. Полученную реакционную смесь встряхивали и инкубировали в темноте при $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Измерения оптической плотности проводили при длине волны 517 нм. Значения ОАЕ_{DPPH} рассчитывали по калибровочной кривой кверцетина ($R^2 > 0,99$) с использованием уравнения 1 и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

$$\text{ОАЕ}_{\text{DPPH}} = \frac{D_k - D_0}{D_k} \times 100\% - 4,6904 \quad (1)$$

0,3081

где D_0 — оптическая плотность образца; D_k — оптическая плотность контрольной пробы; $-4,6904$ (b) и $0,3091$ (a) — коэффициенты из линейного уравнения калибровочного графика.

Определение ОАЕ методом Ferric Reducing Antioxidant Power (ОАЕ_{FRAP}) проводили на спектрофотометре СФ-2000 в соответствии с методикой [35]. Реактив FRAP готовили путём смешивания 0,3 М ацетатного буфера (pH 3,6), 10 мМ раствора ТРТЗ, растворённого в 40 мМ соляной кислоте, и водного раствора хлорида железа (III)

в соотношении 10:1:1, соответственно. Для определения ОАЕ_{FRAP} в стеклянные пробирки вносили 1,45 мл реактива FRAP и 50 мкл образца / дистиллированной воды (холостая проба). Полученную реакционную смесь встряхивали и инкубировали в темноте при $37 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Измерения проводили при длине волны 594 нм. Значения ОАЕ_{FRAP} были рассчитаны по калибровочной кривой кверцетина (140–300 мкМ, $R^2 > 0,99$) и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

Определение ОАЕ методом Oxygen Radical Absorbance Capacity (ОАЕ_{ORAC}) проводили на флуорометре-люминометре Fluoroskan Ascent FL (TermoLabsystems, Finland) с использованием черных 96-луночных планшетов в соответствии с методикой [36]. В рабочие лунки планшета вносили по 30 мкл образца или раствора кверцетина (1–14 мкМ) для построения градуировочных графиков, а в качестве холостой пробы вносили 5 мМ фосфатный буфер (pH 7,4). Далее в каждую лунку добавляли 200 мкл 0,5 мкМ флуоресцеина натрия. Планшет закрывали защитной пленкой и инкубировали при $37 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. По истечении инкубации в лунки вносили 30 мкл 153 мкМ ААРН и измеряли интенсивность флуоресценции. Измерение ОАЕ_{ORAC} проводили при $37 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 60 мин (интервал считывания 5 мин) при длинах волн возбуждения и эмиссии 485 нм и 535 нм, соответственно. Значение ОАЕ_{ORAC} были рассчитаны с использованием калибровочной кривой кверцетина (1–14 мкМ, $R^2 > 0,99$) и выражали в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

Общее количество фенольных соединений в экстрактах измеряли на спектрофотометре СФ-2000 методом Фолина-Чокальтеу в соответствии с методикой [37]. Для определения ОКФС в стеклянные пробирки вносили 125 мкл образца или дистиллированной воды (холостая проба), 125 мкл реактива Фолина-Чокальтеу и 1 мл 7,5 % раствора Na_2CO_3 . Полученную реакционную смесь инкубировали при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 20 мин, затем измеряли оптическую плотность при 765 нм. Значения ОКФС были рассчитаны по калибровочной кривой галловой кислоты (G) ($R^2 > 0,99$) и выражали в мкмоль-экв. G/г отрубей.

Общее количество флавоноидов в экстрактах отрубей измеряли на спектрофотометре СФ-2000 (Спектр, Россия) в соответствии с методикой [38]. Для определения ОКФ в стеклянные пробирки вносили 125 мкл образца, 375 мкл 96 % этилового спирта, 25 мкл 3 % AlCl_3 , 25 мкл 1М CH_3COONa , и 700 мкл дистиллированной воды. Для холостой пробы вместо хлорида алюминия добавляли дистиллированную воду. Полученную реакционную смесь инкубировали при температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Оптическую плотность измеряли при 445 нм. Значения ОКФ были рассчитаны по калибровочной кривой кверцетина (50–500 мкМ, $R^2 > 0,99$) и выражены в мкмоль-экв. Q/г отрубей.

2.4. Статистический анализ

Все измерения выполняли в четырех повторах. Статистический анализ экспериментальных данных проводили с использованием программы STATISTICA 10, результаты представляли в виде среднего значения и стандартного отклонения «Mean $\pm$ SD». Для определения достоверности различий средних величин использовали дисперсионный анализ ANOVA с применением критерия Тьюки, для зависимых переменных использовали критерий Фридмана. Вероятность 0,05 была выбрана в качестве значимого уровня. Для построения графиков использовали программное обеспечение GraphPad Prism 8.0.2.

3. Результаты и обсуждение

Результаты измерения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных методом ферментативной экстракции с разными концентрациями ферментов представлены в Таблице 2 и на Рисунке 1.

Варьирование концентрации ферментов оказывало выраженное влияние на параметры АОП экстрактов пшеничных отрубей. Для всех опытных образцов значения ОКФС и ОАЕ в независимости от метода были выше чем аналогичные показатели контрольного образца, полученного без добавления ферментов ($p < 0,05$), что подтверждает эффективность ферментативной деструкции полисахаридной матрицы ПО и высвобождение связанных АО.

Увеличение концентрации α -амилазы и β -глюканазы от 0,001 % до 1 % сопровождалось статистически значимым практически дозозависимым повышением ОАЕ_{FRAP} и ОАЕ_{ORAC}, в то время как значения ОАЕ_{DPPH} менялись значительно слабее. Наиболее выраженные изменения наблюдались для ОАЕ_{ORAC}, величина которой возрастала с $2,81 \pm 0,18$ до $3,86 \pm 0,17$ мкмоль-экв. Q/г отрубей, что свидетельствует о возрастании способности экстрактов к нейтрализации пероксидных радикалов.

Таблица 2. Результаты определения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных с использованием разной концентрации ферментов

Table 2. Results of the determination of the AOP parameters of the wheat bran extracts obtained using different concentrations of enzymes

№ образца	ОАЕ, мкмоль-экв. Q/г отрубей			ОКФС, мкмоль-экв. G/г отрубей	ОКФ, мкмоль-экв. Q/г отрубей
	ОАЕ _{FRAP}	ОАЕ _{DPPH}	ОАЕ _{ORAC}		
Контроль	0,85 ± 0,01 ^{a, A}	0,31 ± 0,01 ^{a, B}	2,32 ± 0,22 ^{a, C}	8,09 ± 0,15 ^a	0,05 ± 0,00 ^a
1	1,64 ± 0,03 ^{b, A}	0,62 ± 0,01 ^{b, B}	2,81 ± 0,18 ^{b, C}	11,39 ± 0,12 ^b	0,06 ± 0,01 ^a
2	1,92 ± 0,02 ^{c, A}	0,59 ± 0,01 ^{c, B}	2,78 ± 0,13 ^{b, c, C}	10,43 ± 0,15 ^c	нпо
3	2,28 ± 0,02 ^{d, A}	0,76 ± 0,01 ^{d, B}	3,22 ± 0,11 ^{d, C}	11,01 ± 0,01 ^d	нпо
4	2,57 ± 0,04 ^{e, A}	0,76 ± 0,01 ^{d, B}	3,86 ± 0,17 ^{e, C}	13,32 ± 0,23 ^e	нпо
p-value (контроль-4)	0,003	0,004	0,004	0,003	—
p-value (1-4)	0,007	0,011	0,011	0,018	—

Примечание. Каждое значение выражено как среднее значение ± стандартное отклонение ($n = 4$). нпо — ниже предела обнаружения. Средние значения, обозначенные разными строчными буквами (a, b, c, d, e) в столбце, существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). Средние значения, обозначенные разными заглавными буквами в строке (A, B, C), существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). p-value — достоверная разница, критерий Фридмана, ($p < 0,05$).

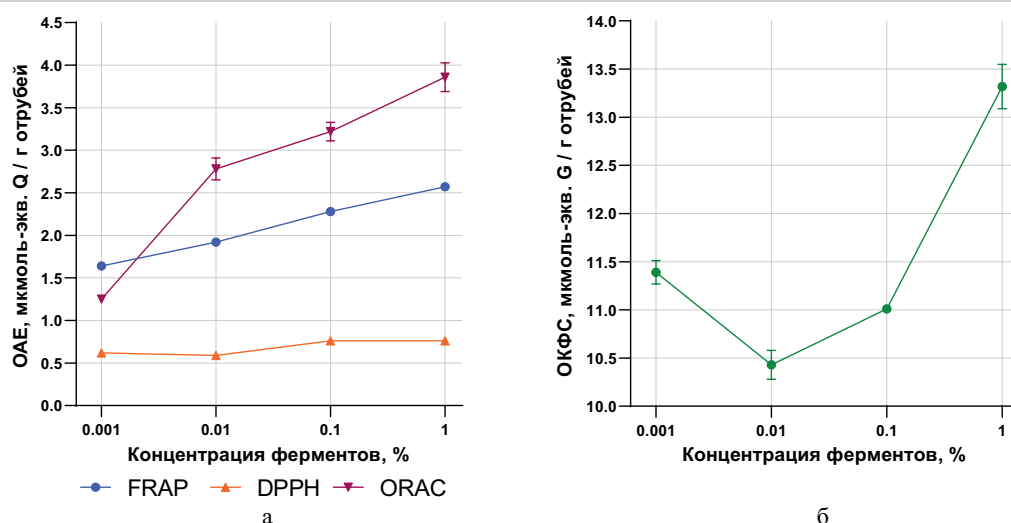


Рисунок 1. Зависимость параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей от концентрации ферментов: где а — ОАЕ, определенная методами FRAP, DPPH и ORAC; б — общее количество фенольных соединений. По оси X представлена концентрация α -амилазы и β -глюканазы, %, в логарифмической шкале

Figure 1. Dependence of the AOP parameters of the wheat bran extracts on the enzyme concentration: а — TAC determined by the FRAP, DPPH and ORAC methods; б — total phenolic compounds. The x-axis represents the concentration of α -amylase and β -glucanase (%) on the logarithmic scale

Аналогичная тенденция была характерна для ОАЕ_{FRAP}: показатель увеличивался от $1,64 \pm 0,03$ до $2,57 \pm 0,04$ мкмоль-экв. Q/г отрубей. При этом значения ОАЕ_{DPPH} изменялись менее выражено и находились в диапазоне 0,59–0,76 мкмоль-экв. Q/г отрубей, что ниже ОАЕ_{FRAP} и ОАЕ_{ORAC} более чем на 50% ($p < 0,05$). Максимальное увеличение значений ОАЕ при варьировании концентрации ферментов от 0,001% до 1% составило: для ОАЕ_{DPPH} 22,6% ($p = 0,0112$), ОАЕ_{FRAP} 56,7% ($p = 0,0074$), ОАЕ_{ORAC} 208,8% ($p = 0,0112$). Полученные данные указывают на изменение состава экстрактов при увеличении концентрации ферментов и преимущественное накопление соединений, проявляющих антиоксидантные свойства по механизмам переноса атома водорода (НАТ) и переноса электрона (SET).

Изменение общего количества фенольных соединений носило нелинейный характер (Рисунок 1б) и характеризовалось резким снижением с последующим ростом, однако все значения были выше показателя контрольного образца ($p < 0,05$). Использование ферментов в концентрациях 0,01% и 0,1% приводило к снижению ОКФС на 8,4% ($p < 0,05$) и 3,3% ($p < 0,05$), соответственно, в сравнении с образцом № 1 (0,001% ферментов). Минимальное значение ОКФС было отмечено при концентрации ферментов 0,01% и составило $10,43 \pm 0,15$ мкмоль-экв. G/г отрубей. Максимальное значение ОКФС наблюдалось для экстракта, полученного при использовании 1% α -амилазы и β -глюканазы и составляло $13,32 \pm 0,23$ мкмоль-экв. G/г отрубей, что было выше контроля на 64,6% ($p < 0,05$).

Общее количество флавоноидов в исследуемых образцах находилось ниже предела обнаружения за исключением контрольного образца и опытного, полученного при концентрации ферментов 0,001% (образец 1). Полученные значения находились на нижней границе рабочего диапазона используемого метода. Снижение определяемого содержания флавоноидов при увеличении концентрации ферментов

может быть связано с изменением состава фенольной фракции в процессе ферментативного гидролиза, а также возможным взаимодействием флавоноидов с ферментами. В литературе описана способность флавоноидов связываться с α -амилазой и α -глюкозидазой посредством водородных связей и гидрофобных взаимодействий, что может влиять на их доступность для аналитического определения [39].

Стоит отметить несоответствие между динамикой ОКФС и показателями ОАЕ, особенно при низких концентрациях ферментов, что свидетельствует о вкладе в АОП экстрактов не только свободных ФС. Так, при минимальной концентрации ферментов (0,001%) в сравнении с контрольным образцом наблюдалось существенное увеличение ОАЕ_{DPPH} и ОАЕ_{FRAP} на 100% ($p < 0,05$) и 93% ($p < 0,05$), соответственно, при менее выраженном росте ОАЕ_{ORAC} (21%, $p < 0,05$). Вероятно, на начальных этапах ферментативного гидролиза происходило преимущественное высвобождение водорастворимых фрагментов полисахаридов и белково-полисахаридных комплексов, обладающих собственным АОП. В литературе сообщается, что полисахариды пшеничных отрубей способны проявлять антиоксидантные свойства в особенности в нейтрализации радикалов DPPH и ABTS, а также гидроксильных и супероксидных радикалов, что связывают с наличием гидроксильных групп и ассоциированных фенольных компонентов [40].

Кроме того, следует учитывать ограничения метода Фолина-Чокальтеу, который не является строго специфичным только к ФС. В работе Berker et al. [41] сообщалось, что некоторые восстановители, такие как аминокислоты, могут вносить вклад в сигнал реактива Фолина-Чокальтеу, что приводит к завышению результата. Так, относительно высокие значения ОКФС при минимальной концентрации ферментов могли быть частично обусловлены присутствием не фенольных восстановителей в экстракте.

При дальнейшем увеличении концентрации ферментов до 0,1% и 1% наблюдалось более выраженное повышение OAE_{ORAC} на 16% и 20% ($p < 0,05$), соответственно, на фоне повторного роста ОКФС на 5,6% и на 21% ($p < 0,05$), соответственно. Данное наблюдение может свидетельствовать об усилении деструкции клеточной стенки и высвобождении связанных фенольных соединений, прежде всего производных феруловой кислоты, ассоциированных с арабиноксиланами пшеничных отрубей. Согласно литературным данным, связанные ФС пшеничных отрубей обладают более высоким АОП по сравнению со свободными фракциями, особенно в реакциях нейтрализации пероксильных радикалов [42]. Вероятно, именно накопление таких соединений обусловило наиболее выраженный рост показателя OAE_{ORAC} при максимальной концентрации ферментов.

Таким образом, были определены концентрации ферментов (1% α -амилазы и β -глюканазы в сочетании с 2% ксиланазы), обеспечивающие получение экстракта ПО, характеризующегося максимальными значениями ОКФС и OAE, определенными методами FRAP,

ORAC и DPPH. Полученные данные позволяют предположить, что увеличение концентрации α -амилазы и β -глюканазы обеспечивало более эффективное высвобождение связанных фенольных соединений, прежде всего производных феруловой кислоты, ассоциированных с арабиноксиланами клеточной стенки.

Дальнейший подбор условий экстрагирования АО из пшеничных отрубей включал варьирование продолжительности экстракции от 1 до 9 ч. Результаты определения параметров АОП экстрактов, полученных при разной длительности экстракции представлены в Таблице 3 и на Рисунке 2. Увеличение продолжительности ферментативной экстракции от 1 до 9 ч оказывало выраженное влияние на параметры АОП экстрактов пшеничных отрубей. Для большинства исследуемых показателей наблюдалась тенденция к увеличению значений по мере роста времени инкубации, однако характер изменений зависел от используемого метода оценки АОП.

Наиболее равномерное увеличение значений было характерно для OAE_{FRAP} , где показатель плавно возрастал при увеличении времени

Таблица 3. Результаты определения параметров АОП экстрактов пшеничных отрубей, полученных при разной длительности экстракции

Table 3. Results of the determination of the AOP parameters of the wheat bran extracts obtained upon different duration of extraction

Время, часы	OAE, мкмоль-экв. Q/г отрубей			ОКФС, мкмоль-экв. G/г отрубей	ОКФ, мкмоль-экв. Q/г отрубей
	OAE_{FRAP}	OAE_{DPPH}	OAE_{ORAC}		
1	$2,39 \pm 0,01^{a,A}$	$0,80 \pm 0,02^{a,B}$	$3,84 \pm 0,24^{a,C}$	$11,06 \pm 0,17^a$	нпо
2	$2,62 \pm 0,04^{b,A}$	$0,85 \pm 0,01^{b,B}$	$3,77 \pm 0,07^{a,C}$	$11,83 \pm 0,14^b$	нпо
3	$2,74 \pm 0,02^{c,A}$	$1,00 \pm 0,01^{c,B}$	$3,86 \pm 0,17^{a,C}$	$13,40 \pm 0,18^c$	нпо
4	$2,79 \pm 0,03^{c,d,A}$	$1,02 \pm 0,01^{c,B}$	$3,72 \pm 0,18^{a,C}$	$13,97 \pm 0,18^d$	нпо
5	$2,84 \pm 0,04^{d,A}$	$1,01 \pm 0,001^{c,B}$	$3,46 \pm 0,21^{a,C}$	$12,96 \pm 0,13^e$	нпо
6	$2,77 \pm 0,03^{c,d,A}$	$1,00 \pm 0,01^{c,B}$	$3,52 \pm 0,31^{a,C}$	$13,24 \pm 0,23^{c,e}$	нпо
7	$2,83 \pm 0,05^{d,A}$	$1,01 \pm 0,001^{c,B}$	$4,59 \pm 0,25^{b,C}$	$13,80 \pm 0,12^{c,d}$	нпо
8	$3,10 \pm 0,04^{e,A}$	$1,05 \pm 0,01^{d,B}$	$5,32 \pm 0,09^{c,C}$	$14,19 \pm 0,18^d$	нпо
9	$3,06 \pm 0,03^{e,A}$	$1,05 \pm 0,01^{d,B}$	$5,34 \pm 0,24^{c,C}$	$14,14 \pm 0,14^d$	нпо
p-value (1–9)	0,0001	0,0002	0,0008	0,0001	—
p-value (1–8)	0,0003	0,0005	0,0029	0,0003	—
p-value (1–7)	0,0008	0,0015	0,0148	0,0006	—
p-value (1–6)	0,0015	0,0028	0,1103	0,0015	—
p-value (1–5)	0,0030	0,0039	0,0935	0,0030	—
p-value (1–4)	0,0074	0,0074	0,8254	0,0074	—
p-value (1–3)	0,0183	0,0183	1,0	0,0183	—

Примечание. Каждое значение выражено как среднее значение $\pm$ стандартное отклонение ($n = 4$). нпо — ниже предела обнаружения. Средние значения, обозначенные разными строчными буквами (a, b, c, d, e) в столбце, существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). Средние значения, обозначенные разными заглавными буквами в строке (A, B, C), существенно различались ANOVA, критерий Тьюки ($p < 0,05$). p-value — достоверная разница, критерий Фридмана, ($p < 0,05$).

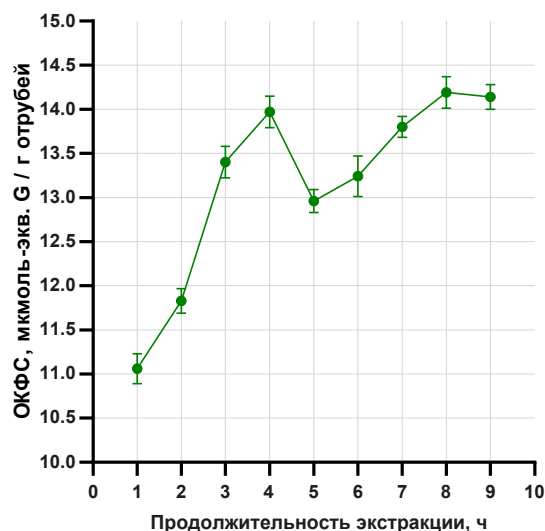
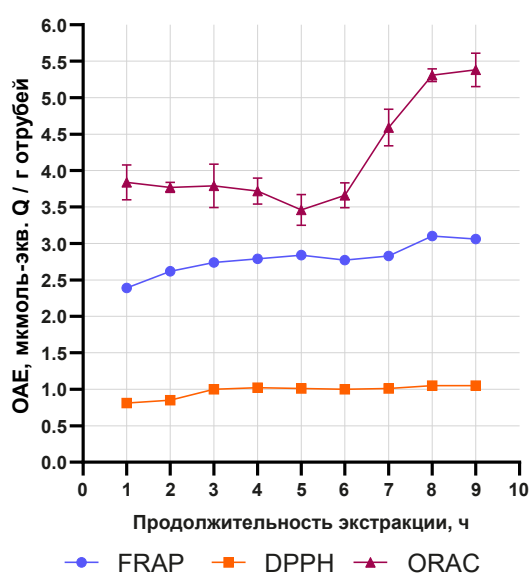


Рисунок 2. Зависимость показателей АОП экстрактов пшеничных отрубей от продолжительности ферментативной экстракции, где: а — OAE, определенная методами FRAP, DPPH и ORAC, б — общее количество фенольных соединений
Figure 2. Dependence of the AOP parameters of the wheat bran extracts on the duration of enzymatic extraction: а — TAC determined by the FRAP, DPPH and ORAC methods; б — total phenolic compounds

экстракции с 1 до 8 ч от $2,39 \pm 0,01$ до $3,10 \pm 0,04$ мкмоль-экв. Q/г отрубей ($p < 0,05$), после чего дальнейшее увеличение времени процесса до 9 ч не приводило к статистически значимым изменениям. При этом в период от 3 до 7 ч включительно максимальное увеличение OAE_{FRAP} составило всего 3,28% ($p < 0,05$). Полученные данные свидетельствуют о постепенном накоплении в экстрактах соединений с выраженными восстановительными свойствами.

Общая антиоксидантная емкость по методу ORAC характеризовалась наиболее выраженными изменениями в зависимости от времени экстракции и имело две фазы. В течение первых 6 ч значения OAE_{ORAC} изменялись незначительно и находились в диапазоне 3,46–3,86 мкмоль-экв. Q/г отрубей ($p > 0,05$). Однако с 7 ч наблюдался резкий рост показателя более чем на 20% при 7 ч экстракции ($p < 0,05$) и на 38% при 8 ч ($p < 0,05$), при этом при увеличении времени до 9 ч OAE_{ORAC} соответствовала значению при 8 ч ($p > 0,05$). В связи с тем, что метод ORAC отражает способность АО нейтрализовать пероксильные радикалы, можно сделать предположение, что выявленный эффект связан с накоплением продуктов более глубокой ферментативной деструкции полисахаридной матрицы и высвобождением связанных фенольных кислот, прежде всего феруловой кислоты.

В случае OAE_{DPNH} характер изменений был менее выраженным. Показатель увеличивался к 3 ч на 15% ($p < 0,05$) в сравнении с 1 ч, а затем был практически неизменным до 7 ч экстракции включительно ($p > 0,05$). Максимальное значение OAE_{DPNH} отмечалось при 8 ч, что превышало показатель 3 ч экстракции всего на 5,0% ($p < 0,05$) и не отличалось от 9 ч ($p > 0,05$). Вероятно, соединения, способные эффективно взаимодействовать с азотсодержащим радикалом DPPH, высвобождаются на ранних стадиях гидролиза, тогда как дальнейшая ферментативная деструкция преимущественно приводит к накоплению соединений с иным механизмом антиоксидантного действия. Полученные закономерности согласуются с наблюдениями, описанными в работе Bautista-Expósito et al. [31] авторами было показано, что увеличение времени ферментативного гидролиза ПО приводило к росту показателей ORAC и FRAP, тогда как на рост значений ABTS и DPPH влияла температура, а не длительность процесса.

Изменения ОКФС подтвердили эффективность увеличения времени ферментативной обработки. В первые 4 часа наблюдался рост ОКФС на 26,3% ($p < 0,05$) от $11,06 \pm 0,17$ до $13,97 \pm 0,31$ мкмоль-экв. G/г отрубей с последующим снижением показателя на 7,2% ($p < 0,05$) при 5 ч. После чего вновь отмечалось постепенное увеличение значений. Интересно, что величина ОКФС при 4 ч и 7 ч инкубации не имели статистической разницы ($p > 0,05$). Максимальные значения ОКФС были характерны для образцов, полученных после 8 ч и 9 ч экстракции ($14,19 \pm 0,18$ и $14,14 \pm 0,14$ мкмоль-экв. G/г отрубей, соответственно) при этом различия между ними отсутствовали ($p > 0,05$). Аналогичные закономерности были описаны в работе Rani et al. [43], где увеличение продолжительности ферментативной обработки сопровождалось ростом выхода фенольных соединений до достижения

максимума, после чего дальнейшее увеличение времени экстракции не приводило к дополнительному росту показателя.

Следует отметить, что снижение ОКФС при 5 ч инкубации сопровождалось уменьшением OAE_{ORAC}, тогда как последующее увеличение продолжительности процесса приводило к одновременному росту обоих показателей с достижением максимальных значений при 8 ч. Вероятно, выявленная динамика связана с промежуточными стадиями ферментативного гидролиза, сопровождающимися частичной трансформацией или нестабильностью отдельных ФС. При дальнейшем увеличении продолжительности обработки происходило более полное разрушение сложноэфирных связей между фенольными кислотами и арабиноксианами клеточной стенки, что обеспечивало дополнительное высвобождение связанных фенольных соединений. Подобные закономерности согласуются с литературными данными о постепенном высвобождении связанных фенольных кислот в процессе ферментативного гидролиза пшеничных отрубей [34].

Так как концентрация α -амилазы и β -глюканазы составила 1%, значения ОКФС также находились ниже предела обнаружения используемого метода и не изменялись при увеличении времени экстракции.

Совокупность полученных результатов показывает, что увеличение продолжительности ферментативной экстракции способствует постепенному высвобождению связанных антиоксидантов и росту АОП экстрактов. При этом различные методы оценки OAE демонстрировали неодинаковую динамику изменений, что подтверждает сложный многокомпонентный состав экстрактов и различие механизмов антиоксидантного действия отдельных групп соединений. Наиболее перспективной продолжительностью процесса можно считать 7–8 ч, при которой наблюдались максимальные значения OAE_{ORAC} и ОКФС, тогда как дальнейшее увеличение времени экстракции не приводило к статистически значимому улучшению исследуемых показателей.

4. Выводы

В ходе работы было исследовано влияние концентрации ферментов и продолжительности экстракции на параметры антиоксидантного потенциала экстрактов пшеничных отрубей. Установлено, что ферментативная обработка с использованием комплекса α -амилазы, β -глюканазы и ксиланазы способствует увеличению общей антиоксидантной емкости и содержания фенольных соединений в экстрактах. Повышение концентрации ферментов и продолжительности экстракции сопровождалось ростом показателей OAE_{FRAP} и OAE_{ORAC}, что может свидетельствовать о постепенном высвобождении связанных фенольных соединений, ассоциированных с полисахаридной матрицей пшеничных отрубей. Наиболее эффективными условиями процесса являлись использование 1% α -амилазы и β -глюканазы в сочетании с 2% ксиланазы при продолжительности экстракции 7–8 ч, обеспечивающие максимальные значения OAE_{ORAC} и общего количества фенольных соединений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / REFERENCES

- Carocho, M., Morales, P., Ferreira, I.C.F.R. (2018). Antioxidants: Reviewing the chemistry, food applications, legislation and role as preservatives. *Trends in Food Science and Technology*, 71, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.008>
- Gutiérrez-del-Río, I., López-Ibáñez, S., Magadán-Corpas, P., Fernández-Calleja, L., Pérez-Valero, Á., Tuñón-Granda, M. et al. (2021). Terpenoids and polyphenols as natural antioxidant agents in food preservation. *Antioxidants*, 10(8), Article 1264. <https://doi.org/10.3390/antiox10081264>
- Bensid, A., El Abed, N., Houicher, A., Regenstein, J.M., Özogul, F. (2022). Antioxidant and antimicrobial preservatives: Properties, mechanism of action and applications in food — A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(11), 2985–3001. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1862046>
- Lourenço, S.C., Moldão-Martins, M., Alves, V.D. (2019). Antioxidants of natural plant origins: From sources to food industry applications. *Molecules*, 24(22), Article 4132. <https://doi.org/10.3390/molecules24224132>
- Usoro, E. (2024). Comparative Analysis of natural vs. synthetic antioxidants in Nigeria. *Journal of Chemistry*, 3(3), 27–37. <https://doi.org/10.47672/jchem.2515>
- Shori, A.B. (2022). Storage quality and antioxidant properties of yogurt fortified with polyphenol extract from nutmeg, black pepper, and white pepper. *Electronic Journal of Biotechnology*, 57, 24–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2022.03.003>
- Rashwan, A.K., Osman, A.I., Chen, W. (2023). Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 21, 1907–1931. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01588-0>
- Rahaman, Md. M., Hossain, R., Herrera-Bravo, J., Islam, M.T., Atolani, O., Adeyemi, O.S. et al. (2023). Natural antioxidants from some fruits, seeds, foods, natural products, and associated health benefits: An update. *Food Science and Nutrition*, 11, 1657–1670. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3217>
- Агапкина, А.М., Махотина, И.А. (2021). Переработка сельскохозяйственных отходов: рынок органических удобрений и производство органических пищевых продуктов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 3, 212–225. [Agar-
- kin, A.M., Makhotina, I.A. (2021). Agricultural waste processing: Organic fertilizer market and organic food production. *Storage and Processing of Farm Products*, 3, 212–225. (In Russian) <https://doi.org/10.36107/spfp.2021.221>
- Onipe, O.O., Jideani, A.I.O., Beswa, D. (2015). Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *International Journal of Food Science and Technology*, 50(12), 2509–2518. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12935>
- Федеральная служба государственной статистики. (2024). Динамика промышленного производства в 2023 году. [Federal State Statistics Service. (2024). Dynamics of industrial production in 2023 (In Russian)] Retrieved from https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/10_31-01-2024.html Accessed June 01, 2026.
- Li, C., Stump, M., Wu, W., Li, Y. (2023). Exploring the chemical composition, antioxidant potential, and bread quality effects of the nutritional powerhouse: Wheat bran — A mini-review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, Article 100898. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100898>
- Chen, Z., Mense, A.L., Brewer, L.R., Shi, Y.-C. (2024). Wheat bran layers: Composition, structure, fractionation, and potential uses in foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64, 6636–6659. <https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2171962>
- Лукьянчикова, Н.Л., Скрябин, В.А., Табанюхов, К.А. (2020). Особенности состава отрубей пшеницы и ржи и их роль в профилактике хронических заболеваний человека. *Инновации и продовольственная безопасность*, 4(30), 41–58. [Lukyanichikova, N.L., Skryabin, V.A., Tabanyukhov, K.A. (2020). Peculiarities of the composition of wheat and rye bran and their role in the prevention of chronic diseases of human review. *Innovations and Food Safety*, 4(30), 41–58. (In Russian)] <https://doi.org/10.31677/2072-6724-2020-30-4-41-58>
- Martín-García, B., Gómez-Caravaca, A.M., Marconi, E., Verardo, V. (2021). Distribution of free and bound phenolic compounds, and alkylresorcinols in wheat aleurone enriched fractions. *Food Research International*, 140, Article 109816. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109816>

16. Yao, W., Gong, Y., Li, L., Hu, X., You, L. (2022). The effects of dietary fibers from rice bran and wheat bran on gut microbiota: An overview. *X Food Chemistry*: X, 13, Article 100252. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100252>
17. Leschonski, K.P., Mortensen, M.S., Hansen, L.B.S., Krogh, K.B.R.M., Kabel, M.A., Laursen, M.F. (2024). Structure-dependent stimulation of gut bacteria by arabinosyloligosaccharides (AXOS): A review. *Gut Microbes*, 16(1), Article 2430419. <https://doi.org/10.1080/19490976.2024.2430419>
18. Broekaert, W.F., Courtin, C.M., Verbeke, K., Van de Wiele, T., Verstraete, W., Delcour, J.A. (2011). Prebiotic and other health-related effects of cereal-derived arabinosyloligosaccharides, arabinosyloligosaccharides, and xylooligosaccharides. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 51(2), 178–194. <https://doi.org/10.1080/10408390903044768>
19. Huang, W., Tian, F., Wang, H., Wu, S., Jin, W., Shen, W. et al (2023). Comparative assessment of extraction, composition, and *in vitro* antioxidative properties of wheat bran polyphenols. *LWT- Food Science and Technology*, 180, Article 114706. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114706>
20. Wen, X., Peng, H., Zhang, H., He, Y., Guo, F., Bi, X. et al (2024). Wheat bran polyphenols ameliorate DSS-induced ulcerative colitis in mice by suppressing MAPK/NF- κ B inflammasome pathways and regulating intestinal microbiota. *Foods*, 13(2), Article 225. <https://doi.org/10.3390/foods13020225>
21. Kang, H., Lee, M.-G., Lee, J.-K., Choi, Y.-H., Choi, Y.-S. (2016). Enzymatically-processed wheat bran enhances macrophage activity and has *in vivo* anti-inflammatory effects in mice. *Nutrients*, 8(4), Article 188. <https://doi.org/10.3390/nu8040188>
22. Kobayashi, K., Suzuudula, M., Bender, R., Li, C., Li, Y., Sun, X.S. et al. (2025). Functional properties and potential applications of wheat bran extracts in food and cosmetics: A review of antioxidant, enzyme-inhibitory, and anti-aging benefits. *Foods*, 14(3), Article 515. <https://doi.org/10.3390/foods14030515>
23. Wu, S., Shen, D., Wang, R., Li, Q., Mo, R., Zheng, Y. et al (2021). Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel. *Food Chemistry*, 350(11), Article 129217. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129217>
24. Shahidi, F., Yeo, J. (2016). Insoluble-bound phenolics in food. *Molecules*, 21(9), Article 1216. <https://doi.org/10.3390/molecules21091216>
25. Bilal, M., Li, D., Xie, C., Yang, R., Gu, Z., Jiang, D. et al (2025). Recent advances of wheat bran arabinosyloligosaccharides as the functional dough additive. *Food Chemistry*, 463(Pt 1), Article 141146. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141146>
26. Xu, D.-P., Li, Y., Meng, X., Zhou, T., Zhou, Y., Zheng, J. et al (2017). Natural antioxidants in foods and medicinal plants: Extraction, assessment and resources. *International Journal of Molecular Sciences*, 18, Article 96. <https://doi.org/10.3390/ijms18010096>
27. Cavallero, A., Sbrana, C., Fabbri, L.P., Vidotto, F., Pucci, L., Gigante, V. et al. (2025). Comparison of microwave, ultrasound, and ultrasound-microwave assisted extraction on bioactive compounds, antioxidant activities and antimicrobial properties of hemp seed (*Cannabis sativa* L.) and wheat bran extracts. *Food Bioscience*, 69(1), Article 106918. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106918>
28. Kupaeva, N., Trubina, M., Nesterova, M. (2025). Effects of extraction, purification, and drying on the antioxidant capacity of wheat bran extracts. *Bioactive Compounds in Health and Disease*, 8(10), 398–409. <https://doi.org/10.31989/bchd.v8i10.1813>
29. Bei, Q., Chen, G., Lu, F., Wu, S., Wu, Z. (2018). Enzymatic action mechanism of phenolic mobilization in oats (*Avena sativa* L.) during solid-state fermentation with *Monascus anka*. *Food Chemistry*, 245, 297–304. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.10.086>
30. Ye, G., Wu, Y., Wang, L., Tan, B., Shen, W., Li, X. et al (2021). Comparison of six modification methods on the chemical composition, functional properties and antioxidant capacity of wheat bran. *LWT*, 149, Article 111996. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111996>
31. Bautista-Expósito, S., Tomé-Sánchez, I., Martín-Diana, A.B., Frias, J., Peñas, E., Rico, D. et al (2020). Enzyme selection and hydrolysis under optimal conditions improved phenolic acid solubility, and antioxidant and anti-inflammatory activities of wheat bran. *Antioxidants*, 9(10), Article 984. <https://doi.org/10.3390/antiox9100984>
32. Samoilenko, V.A., Sazonova, O.I., Ivanova, A.A., Vetrova, A.A. (2025). Industrial biotechnology today: Overview of main products. *Biologia et Biotechnologia*, 2 3–38. <https://doi.org/10.61847/pbcras.bbt.2025.2.1>
33. Jin, X., Wang, J.-K., Wang, Q. (2023). Microbial β -glucanases: Production, properties, and engineering. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 39(4), Article 106. <https://doi.org/10.1007/s11274-023-03550-2>
34. Ferri, M., Happel, A., Zanolli, G., Bertolini, M., Chiesa, S., Commisso, M. et al. (2020). Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran. *New Biotechnology*, 56, 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.10.010>
35. Купаева, Н.В., Ильина, М.А., Светличная, М.В., Зубарев, Ю.Н. (2022). Исследование антиоксидантного потенциала овсяных напитков, обогащенных растительными компонентами. *Пищевые системы*, 5(2), 157–163. [Купаева, Н.В., Ильина, М.А., Светличная, М.В., Зубарев, Ю.Н. (2022). Study of the antioxidant potential of oat drinks enriched with plant components. *Food Systems*, 5(2), 157–163. (In Russian)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2022-5-2-157-163>
36. Chernukha, I., Kupaeva, N., Kotenkova, E., Khvostov, D. (2022). Differences in antioxidant potential of allium cepa husk of red, yellow, and white varieties. *Antioxidants*, 11(7), Article 1243. <https://doi.org/10.3390/antiox11071243>
37. Вершинин, В.И., Белова, Е.В. (2019). Определение суммарного содержания фенольных антиоксидантов в модельных смесях по методу Фолина-Чокальтеу и по методу FRAP. *Аналитика и контроль*, 23(3) 6 314–322. [Vershinin, V.I., Belova, E. V. (2019). Determination of the total phenol antioxidants content in the model mixtures using the Folin-Ciocalteu assay and the FRAP assay. *Analytics and Control*, 23(3), 314–322. (In Russian)] <https://doi.org/10.15826/analitika.2019.23.3.008>
38. Chang, C.-C., Yang, M.-H., Wen, H.-M., Chern, J.-C. (2020). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*, 10(3), 178–182. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.2748>
39. Zhu, J., Chen, C., Zhang, B., Huang, Q. (2020). The inhibitory effects of flavonoids on α -amylase and α -glucosidase. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(2), 695–708. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1548428>
40. Shang, X.-L., Liu, C.-Y., Dong, H.-Y., Peng, H.-H., Zhu, Z.-Y. (2021). Extraction, purification, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides from Wheat Bran. *Journal of Molecular Structure*, 1233, Article 130096. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130096>
41. Berker, K.I., Olgun, F.A.O., Ozyurt, D., Demirata, B., Apak, R. (2013). Modified folin — ciocalteu antioxidant capacity assay for measuring lipophilic antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(20), 4783–4791. <https://doi.org/10.1021/jf400249k>
42. Kim, M., Yoon, W.-J., Kim, S. (2016). Phytochemical compositions of immature wheat bran, and its antioxidant capacity, cell growth inhibition, and apoptosis induction through tumor suppressor gene. *Molecules*, 21(10), Article 1292. <https://doi.org/10.3390/molecules21101292>
43. Rani, A., Arfat, Y., Aziz, R.S., Ali, L., Ahmed, H., Asim, S. et al (2021). Enzymatically assisted extraction of antioxidant and anti-mutagenic compounds from radish (*Raphanus sativus*). *Environmental Technology and Innovation*, 23, Article 101620. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101620>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Купаева Надежда Владимировна — кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: NVkupaeva@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1066-5589 * автор для контактов	Nadezhda V. Kupaeva, Candidate of Technical Sciences, Junior Researcher, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: NVkupaeva@yandex.ru ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1066-5589 * corresponding author
Чернуха Ирина Михайловна — доктор технических наук, профессор, академик РАН, главный научный сотрудник, Руководитель Отдела координации инициативных и международных проектов, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927	Irina M. Chernukha, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Principal Research Fellow, Head of the Department for Coordination of Initiative and International Projects, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: imcher@inbox.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4298-0927
Трубина Мария Владимировна — лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: marusia.trubina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2513-633X	Maria V. Trubina, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: marusia.trubina@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0001-2513-633X
Нестерова Мария Дмитриевна — старший лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: m.nesterova@fnfps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7750-3368	Maria D. Nesterova, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.nesterova@fnfps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0000-7750-3368

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Кузина Марина Петровна — старший лаборант, Экспериментальная клиника-лаборатория биологически активных веществ животного происхождения, Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова 109316, Москва, ул. Талалихина 26 E-mail: m.kuzina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7826-7097	Marina P. Kuzina, Senior Laboratory Assistant, Experimental Clinic-Research Laboratory of Biologically Active Substances of an Animal Origin, V. M. Gorbato Federal Research Center for Food Systems 26, Talalikhin str., 109316, Moscow, Russia E-mail: m.kuzina@fncps.ru ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7826-7097
Критерии авторства	Contribution
Купаева Н.В. — концепция и дизайн исследования; постановка цели и задач; статистическая обработка данных; анализ и интерпретация результатов; редактирование и доработка рукописи; научное руководство. Чернуха И. М. — редактирование и доработка рукописи; научное руководство; административное сопровождение проекта; привлечение финансирования. Трубина М. В. — обзор литературы; проведение экспериментов; анализ и интерпретация результатов; подготовка первоначального варианта рукописи. Нестерова М. Д. — обзор литературы; проведение экспериментов; подготовка первоначального варианта рукописи. Кузина М. П. — обзор литературы; статистическая обработка данных; проведение экспериментов; анализ и интерпретация результатов; визуализация данных; подготовка первоначального варианта рукописи.	Nadezhda V. Kupaeva — conceptualization and study design; formulation of research objectives; statistical analysis; data analysis and interpretation; manuscript review and editing; supervision. Irina M. Chernukha — manuscript review and editing; supervision; project administration; funding acquisition. Maria V. Trubina — literature review; experimental investigation; data analysis and interpretation; preparation of the original draft. Maria D. Nesterova — literature review; experimental investigation; preparation of the original draft. Marina P. Kuzina — literature review; statistical analysis; experimental investigation; data analysis and interpretation; data visualization; preparation of the original draft.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.