

Научная статья

УДК 664.661.3:543421/.424

DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-146-157

Применение ИК-Фурье спектроскопии для выявления и идентификации нетрадиционного растительного сырья в составе сложных пищевых систем на примере булочных изделий

Аида Яковлевна Тамахина^{✉1}, Лариса Зрамуковна Бориева²

Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

^{✉1}aida17032007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8958-7052>

²borieva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7436-1832>

Аннотация. Метод ИК-Фурье спектроскопии (FTIR) благодаря скорости, неразрушающему контролю и высокой точности широко применяется в пищевой промышленности, судебной экспертизе, фармацевтике, экологическом мониторинге. В отношении хлебобулочных изделий с добавлением нетрадиционного растительного сырья эффективность FTIR изучена слабо. Целью исследования стало изучение возможности использования ИК-Фурье спектроскопии для выявления и видовой идентификации растений в составе булочных изделий с добавлением водных настоев травы *Viola tricolor* L. (O₁), листьев *Vaccinium myrtillus* L. (O₂) и *Vaccinium vitis-idaea* L. (O₃). Концентрация фенольных веществ в настоях образцов, мг/дм³, составила: O₁ – 1,72; O₂ – 1,85; O₃ – 2,12. Замена воды для замеса теста водными настоями способствовала сокращению времени расстойки тестовых заготовок на 3–10 мин., улучшению состояния корки, мякиша, вкуса и аромата. Цвет мякиша за счет антоцианов варьировался от темно- и светло-серого до бежевого. В образцах O₂ и O₃ отмечено повышение формоустойчивости и относительной пластичности теста, снижение его относительной упругости. В ИК-спектрах исследованных образцов выявлены полосы поглощения, отражающие общий химический состав и имеющие примерно одинаковый набор полос поглощения. Специфичные для каждого вида полосы поглощения, обусловленные наличием флавоноидов, антоцианов, фенолкарбоновых кислот, выявлены в диапазонах 1750–1010 см⁻¹ и 3300–2500 см⁻¹. С наибольшей вероятностью идентифицировать видовую принадлежность по ИК-спектру можно в отношении *Vaccinium vitis-idaea*, что обусловлено, по-видимому, высоким содержанием конденсированных танинов. Таким образом, технология FTIR позволяет выявить наличие в хлебобулочных изделиях нетрадиционного растительного сырья, не обеспечивая приемлемую точность видовой идентификации. Результаты исследования позволяют рекомендовать метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного отражения для выявления нетрадиционного сырья растительного происхождения в составе хлебобулочных изделий, обнаружения фальсификации функциональных изделий и экспресс-диагностики их физико-химических параметров в процессе выпечки.

Ключевые слова: пищевая система, булочное изделие, ИК-Фурье спектроскопия, нетрадиционное растительное сырье, идентификация, полосы поглощения, фенольные соединения

Для цитирования: Тамахина А. Я., Бориева Л. З. Применение ИК-Фурье спектроскопии для выявления и идентификации нетрадиционного растительного сырья в составе сложных пищевых систем на примере булочных изделий // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета. 2025. № 3(49). С. 146–157. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-146-157

Original article

Application of FTIR spectroscopy for detection and identification of non-traditional plant raw materials in complex food systems using bakery products as an example

Aida Ya. Tamakhina^{✉1}, **Larisa Z. Borieva**²

Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik, Russia, 360030

^{✉1}aida17032007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8958-7052>²borieva@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0001-7436-1832>

Abstract. FT-IR spectroscopy is widely used in the food industry, forensics, pharmaceuticals, and environmental monitoring due to its speed, non-destructive testing, and high accuracy. The efficiency of FTIR has been poorly studied in relation to bakery products with additives of non-traditional plant materials. The aim of the study was to investigate the possibility of using FTIR spectroscopy to detect and identify the species of plants in bakery products with the addition of aqueous infusions of *Viola tricolor* L. herb (S_1), *Vaccinium myrtillus* L. leaves (S_2) and *Vaccinium vitis-idaea* L. (S_3). The concentration of phenolic substances in the sample infusions, mg/dm³, was: S_1 – 1.72; S_2 – 1.85; S_3 – 2.12. Replacing the water for kneading the dough with aqueous infusions helped to reduce the proofing time of the dough pieces by 3-10 min., improve the condition of the crust, crumb, taste and aroma. The color of the crumb due to anthocyanins varied from dark and light gray to beige. In samples S_2 and S_3 , an increase in the shape stability and relative plasticity of the dough and a decrease in its relative elasticity were noted. In the IR spectra of the studied samples, absorption bands were revealed that reflect the general chemical composition and have approximately the same set of absorption bands. Specific absorption bands for each species, due to the presence of flavonoids, anthocyanins, phenolic carboxylic acids, were revealed in the ranges of 1750–1010 cm⁻¹ and 3300–2500 cm⁻¹. With the highest probability, the species can be identified by the IR spectrum in relation to *Vaccinium vitis-idaea*, which is apparently due to the high content of condensed tannins. Thus, FTIR technology makes it possible to detect the presence of non-traditional plant materials in bakery products without ensuring acceptable accuracy of species identification. The results of the study allow us to recommend the method of IR Fourier spectroscopy of attenuated total reflectance for identifying non-traditional raw materials of plant origin in the composition of bakery products, detecting falsification of functional products and express diagnostics of their physicochemical parameters during the baking process.

Keywords: food system, bakery product, FT-IR spectroscopy, non-traditional plant raw material, identification, absorption bands, phenolic compounds

For citation: Tamakhina A.Ya., Borieva L.Z. Application of FT-IR spectroscopy for detection and identification of non-traditional raw plant materials in complex food systems using bakery products as an example. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;3(49):146–157. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-3-49-146-157

Введение. ИК-Фурье спектроскопия (FTIR) в последнее десятилетие получила широкое распространение во всем мире. Благодаря скорости, неразрушающему контролю и высокой точности этот метод широко применяется в пищевой промышленности, судебной экспертизе, фармацевтике, экологическом мониторинге. Достижения в области FTIR в сочетании с разработкой мощных методов многомерного анализа данных делают

эту технологию идеальной для быстрого скрининга и характеристики минорных компонентов, аутентификации и обнаружения фальсификации пищевых продуктов, выявления различных групп биологически активных веществ в объектах растительного и животного происхождения [1–6].

Технология FTIR имеет достаточно высокий потенциал для применения в хлебопекарной промышленности. Вследствие сложного

химического состава хлебобулочных изделий получаемые в ближней ИК-области спектра (БИК) перекрывающиеся резонансные полосы трудно отнести к конкретным химическим веществам [7]. В БИК для анализа хлебобулочных изделий наиболее информативным является диапазон λ от 1150 до 2500 нм [8]. В средней ИК-области FTIR перспективна для оценки загрязнения пшеничной мукой безглютеновых хлебобулочных изделий [9], идентификации сортов пшеницы по значениям влажности, белка, жира, золы, углеводов и твердости зерна [10], контроля качества хлеба с пектином и молочной сывороткой [11], обнаружения грибковых инфекций до появления визуальных признаков заражения [12], оценки содержания фитиновой кислоты в процессе выпечки хлеба [13].

ИК-Фурье спектроскопия успешно применяется для анализа вторичных структур и конформаций белков и полисахаридов хлебобулочных изделий на основе характерных полос поглощения определенных функциональных групп, содержащихся в этих биополимерах. FTIR-технология позволяет обнаружить изменения в молекулярных конформациях и полимерной структуре пшеничной клейковины и крахмала в готовом хлебе при добавлении пектина и фруктовых пищевых волокон, особенно во вторичной конформации белка (амиды I и II) [14]. Фурье-преобразование ИК-спектроскопии предложено для скрининга комплексообразования и взаимодействий между макромолекулами модельной системы хлеба, обогащенной инулином [15], изучения гидрофобных и водородных связей между компонентами хлеба, фруктовыми пищевыми волокнами и пектином [14].

Ограничениями применения ИК-Фурье спектроскопии в анализе органических веществ сложных пищевых систем, к которым относятся хлебобулочные изделия, являются вероятность перекрывания полос поглощения, смещение максимумов и изменение интенсивности полос поглощения из-за взаимного влияния компонентов смеси, образование кластеров, комплексов, взаимодействий между макромолекулами системы хлеба, обогащенной БАВ [16].

Актуальным трендом хлебопечения является введение в рецептурный состав нетрадиционного растительного сырья в виде порош-

ков, настоев, экстрактов и отваров для разработки новых хлебобулочных изделий с характеристиками функционального продукта питания. Фенольные соединения, обуславливающие антиоксидантную активность нетрадиционного растительного сырья, обладают большим структурным разнообразием, а также способностью к сложному взаимодействию с макромолекулами, составляющими хлебную матрицу [17]. Несмотря на широкое применение FTIR для анализа и идентификации сырья растительного происхождения [18–21] в отношении хлебобулочных изделий с добавлением растительного сырья с высоким содержанием фенольных веществ, эффективность данного метода изучена слабо.

Целью исследования стало изучение возможности использования ИК-Фурье спектроскопии для выявления и видовой идентификации растений в составе булочных изделий с добавлением водных настоев травы фиалки трехцветной, листьев черники обыкновенной и брусники обыкновенной.

Материалы, методы и объекты исследования. Объектом исследования стали образцы булочных изделий (булочка столичная): контроль (К, стандартная рецептура), опытные образцы с полной заменой воды для замеса теста водным настоем травы фиалки трехцветной (*Viola tricolor* L., O₁), листьев черники обыкновенной (*Vaccinium myrtillus* L., O₂) и брусники обыкновенной (*Vaccinium vitis-idaea* L., O₃). Для приготовления настоя измельченное растительное сырье заливали кипяченой горячей водой (80 °C) в соотношении 1:10, настаивали в течение 12 ч. при комнатной температуре, отфильтровывали [22]. Технологические параметры пищевых систем оценивали по продолжительности расстойки тестовых заготовок массой 100 г при температуре 35 °C, органолептическим (состояние поверхности корки, мякиша, аромат и вкус) и физико-химическим (формоустойчивость, относительная пластичность, относительная упругость) показателям готовых изделий.

Пробоподготовка к FTIR-анализу включала высушивание булочек при комнатной температуре и измельчение средних проб, включающих корку и мякиш по вариантам, в кофемолке. Исследование проводилось с использованием спектрофотометра модели Spectrum Two FT-IR с приставкой НПВО и

программного обеспечения Spectrum 10 (Perkin Elmer, США). Спектры получали с разрешением $0,4 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне волновых чисел $4000\text{--}450 \text{ см}^{-1}$. Интерпретацию спектров осуществляли по положению полос поглощения: $2500\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ – валентные колебания групп OH- , CH_2 и CH_3 ; $500\text{--}2000 \text{ см}^{-1}$ – валентные колебания C=O , C=C- , деформационные колебания метильных и метиленовых групп, OH- групп; $2000\text{--}2500 \text{ см}^{-1}$ – коле-

бания тройных связей [3]. При совпадении спектральной кривой исследуемого вещества со спектром контроля делали вывод об идентичности состава.

Результаты исследования. Основными действующими веществами травы *Viola tricolor*, листьев *Vaccinium myrtillus* и *Vaccinium vitis-idaea* являются фенольные соединения (табл. 1).

Таблица 1. Фенольные соединения нетрадиционного растительного сырья*
Table 1. Phenolic compounds of non-traditional plant materials*

Вид растительного сырья	Флавоноиды	Антоцианы	Фенолкарбоновые кислоты	Танины	Фенольные гликозиды
Трава <i>Viola tricolor</i>	Рутин, кверцетин, кверцетин-7-амнозид, астрагалин, витексин, виценин, виолантин, лютеолин, ориентин, изоориентин, лютеолин-7- глюкозид	Виоланин, дельфинидин, цианидин, гликозид дельфинидина, гликозид пеонидина	Кофейная, хлорогеновая, п-кумаровая, протокатеховая, феруловая	Гидролизуемые (галлотанины и эллаготанины)	–
Листья <i>Vaccinium myrtillus</i>	Кверцетин, катехин, кемпферол, ресвератрол, рутин, лютеолин	Цианидин, дельфинидин, петунидин, пеонидин, мальвидин, миртиллин	Хлорогеновая, феруловая, п-кумаровая, галловая, сиреневая, коричная, кофейная	Гидролизуемые (галлотанины и эллаготанины), конденсированные (комплекс катехина и эпикатехина)	–
Листья <i>Vaccinium vitis-idaea</i>	Гиперозид, кверцетин, астрагалин	Цианидин-3-глюкозид, цианидин-3-О-галактозид, цианидин-3-О-арабинозид	Хлорогеновая, феруловая, галловая, эллаговая, хинная, винная, урсоловая, бензойная, олеаноловая, р-кумаровая	Конденсированные (комплекс катехина и эпикатехина)	Арбутин

*Составлено авторами на основе источников [18, 22, 23].

Концентрация фенольных веществ в настоях образцов, мг/дм^3 , составила: O_1 – 1,72; O_2 – 1,85; O_3 – 2,12. Введение водных настоев ЛРС в рецептуру способствовало сокращению времени расстойки тестовых заготовок (K – 30 мин, O_1 – 26 мин, O_2 – 24 мин., O_3 – 20 мин.), улучшению состояния корки (безупречно гладкая, без пузырей, глянцевая), мякиша (очень мягкий, нежный, эластичный), вкуса и аромата. Цвет мякиша за счет антоцианов варьировался от темно-серого (O_1) до светло-серого (O_2) и бежевого (O_3).

Полная замена воды для замеса теста в рецептуре булочки столичной настоем листьев черники и брусники способствует улучшению реологических свойств теста (повышение формоустойчивости (K – 0,44, O_2 – 0,45, O_3 – 0,48) и относительной пластичности (K – 38,2%, O_2 – 40,9, O_3 – 41,3%), снижению относительной упругости (K – 61,6%, O_2 – 59,2%, O_3 – 59,0%). В образце O_1 , несмотря на высокие сенсорные характеристики, формоустойчивость (0,39), относительная пластичность (34,5%) и относительная упругость (58,3%) уступали контролю и образцам O_2 и O_3 .

У всех образцов в ИК-спектрах имеются области полос поглощения, сходные по положению, но различающиеся своей интенсивностью (рис. 1).

Основной широкий пик, локализованный около $3350\text{--}3300\text{ см}^{-1}$, указывает на валентные колебания меж- или внутримолекулярных связей О–Н. Все образцы имели почти схожие спектры для основных пиков, соответствующих волновым числам в области функциональных групп ($4000\text{--}1300\text{ см}^{-1}$) и области отпечатков пальцев ($1000\text{--}450\text{ см}^{-1}$). Узкие острые, но небольшие пики с центрами при 2924 и 2854 см^{-1} в основном обусловлены симметричными валентными ко-

лебаниями связей С–Н алкильных групп – $\text{CH}_2/\text{--CH}_3$. Эти пики указывают на присутствие связанных липидов [24]. Узкий пик с центром при 1745 см^{-1} соответствует присутствию валентных колебаний C=O . Пики, связанные с амидными группами белка, находятся в области $1700\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ – два пика около 1646 и 1539 см^{-1} . Первый соответствует валентному колебанию для C=O амида-I, в то время как последний пик обусловлен растяжением C--N в сочетании с изгибом N--H амида-II. Волновой диапазон от 1200 до 800 см^{-1} соответствует присутствию полисахаридов в образцах.

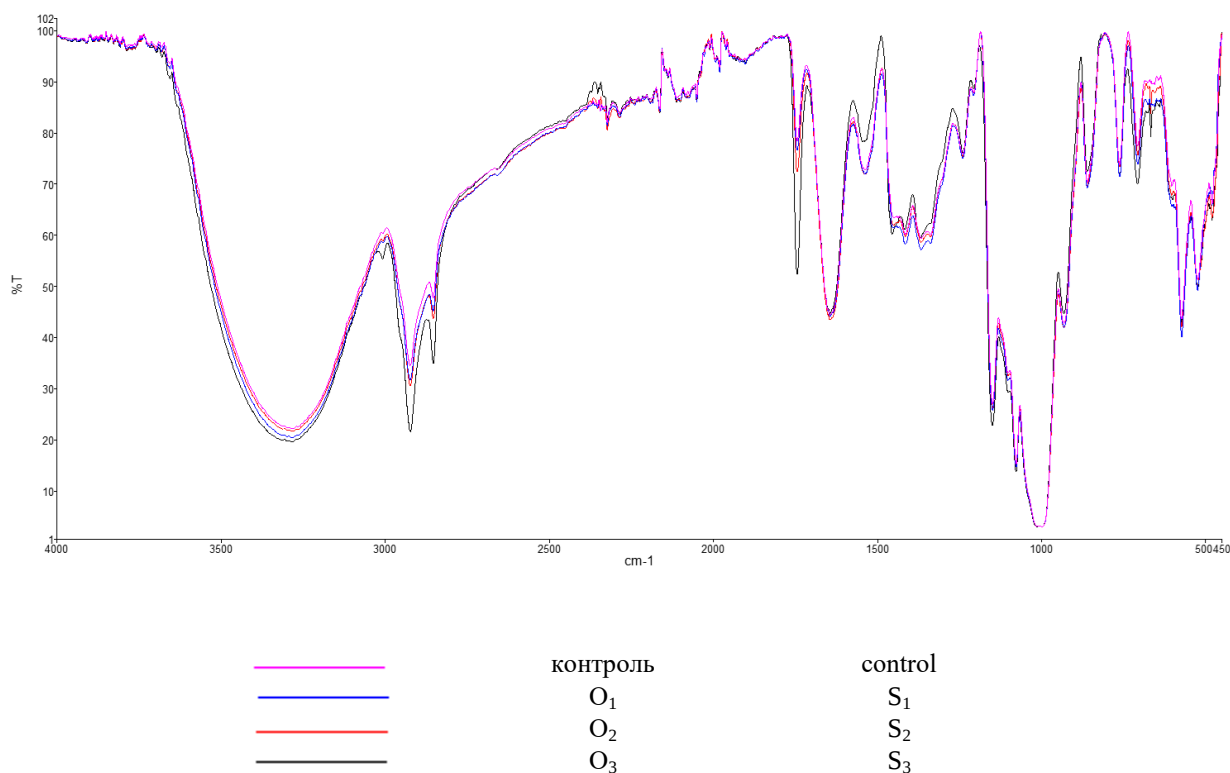


Рисунок 1. Сравнение рисунка ИК-спектров опытных вариантов с контролем
Figure 1. Comparison of the IR spectra of the experimental variants with the control

Во всех образцах был отмечен плечевой пик меньшей интенсивности при 1077 см^{-1} , обусловленный деформационными колебаниями С–О–Н гликозидных связей. Другое плечо при 1049 см^{-1} обусловлено растяжением связи С–Н крахмала [24]. Полосы поглощения Р–Н, Р–OR, эфиров–Н, фосфиноксида, сульфона, сульфонилхлорида, фосфорной кислоты (растительные белки с фосфатными связями) наблюдаются в диапазоне частот $1000\text{--}720\text{ см}^{-1}$.

В спектре образца O_3 отмечены небольшие, но значимые изменения. Пик 1456 см^{-1} связан с деформационными колебаниями связей С–Н белков. Интенсивный пик при 1014 см^{-1} обусловлен деформационными колебаниями связей С–О и крутильными колебаниями связей CH_2 в группах $\text{--CH}_2\text{OH}$ [24]. Наличие 3-х пиков в диапазоне $1280\text{--}1010\text{ см}^{-1}$ указывает на возможные изменения в конфигурации крахмала и других высокомолекулярных фракций муки.

В ИК-спектрах обнаружены полосы поглощения, отражающие различие химического состава контроля и опытных образцов: O_1 – в диапазоне частот 2200–2050 см^{-1} , O_2 – в диапазоне частот 2960–2850, O_3 – в диапазоне частот 2200–2050 и 1556–1512, 1280–1010, 1000–900 см^{-1} . Несмотря на некоторые отличия в рисунке и интенсивности полос поглощения, величине площади под спектральной кривой поглощения, к контролю особенно близки спектры образцов O_1 и O_2 (рис. 2, табл. 2).

В спектрах контрольного и опытных вариантов отмечаются валентные и деформационные колебания гидроксильных групп в молекулах флавоноидов (1368 см^{-1} и 1049 см^{-1}), карбоксильных групп в молекулах фенолкарбоновых кислот (1745 см^{-1} – все образцы, 1545 см^{-1} ; 1239 см^{-1} – образец O_3). В области «отпечатков пальцев» (1300–900 см^{-1}), куда попадают полосы поглощения, отвечающие колебаниям групп C–C, C–O, C–N, а также деформационные колебания, отмечается различие полос поглощения опытного варианта O_3 со спектром контроля.

В отношении сложной системы хлебобулочных изделий влияние фенольных соединений ЛРС на свойства теста объясняется нековалентными фенольно-глютеновыми взаимодействиями в результате образования водородных связей. Различное влияние фенольных соединений фиалки, черники и брусники на микроструктуру хлеба обусловлено главным образом взаимодействием полифенолов с белками глютена и полисахаридами углеводов. Танины в настоях листьев черники и брусники способствуют агрегации или полимеризации белков клейковины, компенсируя уменьшение количества дисульфидных связей, предотвращая потерю микроструктуры матрицы и увеличивая прочность теста. Конденсированные танины демонстрируют более выраженное связывание с белками, чем гидролизуемые, главным образом из-за их структурных различий. Конденсированные танины имеют вытянутую и гибкую структуру, а гидролизуемые – глобулярную и плотную конформацию, что ограничивает взаимодействие с белками. Следовательно, конденсированные танины в большей степени повышают прочность и вязкость клейковины по сравнению с гидролизуемыми танинами. Низкомолекулярные фенольные соединения, такие как фе-

нолкарбоновые кислоты, ослабляют глютенную матрицу, и следовательно, структуру выпеченного продукта, в результате чего снижаются устойчивость к смешиванию и объем продукта [17].

Взаимодействие полифенолов с углеводами обусловлено образованием слабых водородных связей между гидроксильными группами протоантоцианидинов и атомами кислорода гликозидных связей полисахаридов, ковалентных связей между фенольными кислотами и полисахаридами [25].

Взаимодействие растительных полифенолов с белками и углеводами хлебобулочных изделий способствует повышению биодоступности полифенолов в организме человека [25, 26] и играет важную роль в формировании функциональных свойств пищевых систем при использовании в их составе нетрадиционного растительного сырья с высоким содержанием фенольных соединений.

Заключение. Изучена возможность применения метода ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения для экспресс-анализа функциональных компонентов нетрадиционного растительного сырья в сложных пищевых системах на примере булочного изделия. При интерпретации ИК-спектров для идентификации полифенолов наиболее информативными являются области 1750–1010 см^{-1} и 3300–2500 см^{-1} . В ИК-спектрах исследованных образцов выявлены полосы поглощения, отражающие общий химический состав и имеющие примерно одинаковый набор полос поглощения. Наличие полос поглощения, специфичных для каждого вида растительного сырья, подтверждает наличие таких макрокомпонентов, как флавоноиды, антоцианы (миртиллин), фенолкарбоновые кислоты. Среди исследуемых вариантов с наибольшей вероятностью идентифицировать видовую принадлежность нетрадиционного растительного сырья по ИК-спектру можно только в отношении брусники обыкновенной, что, по-видимому, обусловлено высоким содержанием конденсированных танинов и низким – фенолкарбоновых кислот. Таким образом, технология FTIR позволяет выявить наличие в хлебобулочных изделиях растительного сырья с высоким содержанием фенольных соединений, не обеспечивая приемлемую точность видовой идентификации.

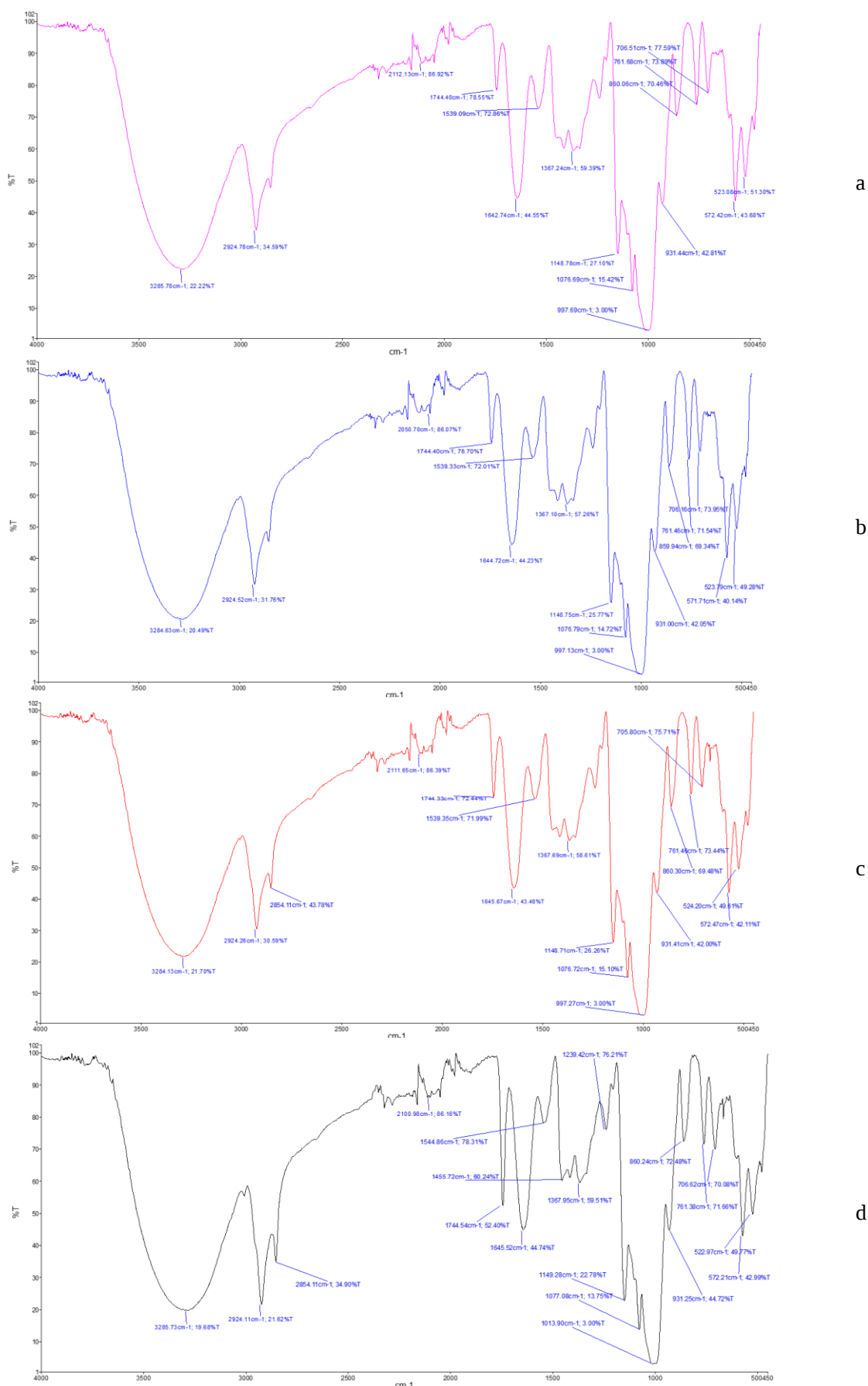


Рисунок 2. Полосы поглощения в ИК-спектрах булочного изделия: *a* – контроль; *b* – O_1 ; *c* – O_2 ; *d* – O_3
Figure 2. Absorption bands in the IR spectra of bakery products: *a* – control; *b* – S_1 ; *c* – S_2 ; *d* – S_3

Таблица 2. Характеристические частоты поглощения и интенсивность пиков
(w – слабая, a – средняя, s – сильная) в ИК-спектрах булочных изделий
Table 2. Characteristic absorption frequencies and peak intensities
(w – weak, a – medium, s – strong) in the IR spectra of bakery products

Диапазон частот, см ⁻¹	Образцы				Фенольные соединения	
	контроль	O ₁	O ₂	O ₃	функциональная группа	представители
3300–3200	3286s	3285s	3284s	3286s	C ₆ H ₅ -ОН	Флавоноиды, миртиллин
2960–2500	2925a –	2924s –	2924s 2854a	2924s 2854s	C-CH ₃ C-CH ₂	Флавоноиды, миртиллин
2200–2050	2112w –	– 2051w	2112w –	– 2101s	C≡C	–
1750–1730	1744a	1744a	1744a	1745a	-C-O-	Фенолкарбоновые кислоты
1680–1620	1643a	1644a	1646a	1646a	-HC=CH- COO-	Флавоноиды
1556–1512	1539a	1539a	1539a	1545a	-C-O-	Фенолкарбоновые кислоты
1460–1300	– 1367w	– 1367a	– 1368a	1456w 1368a	C-CH ₃ C-CH ₂	Флавоноиды
1280–1010	– 1149w 1077w –	– 1149a 1077a –	– 1149a 1077a –	1239a 1149a 1077a 1014w	-C-O- C-OH	Фенолкарбоновые кислоты Флавоноиды
1000–900	998s 931w	997a 931a	997a 931a	– 931a	C=O -C=C-	– –
880–720	860a 762a	860a 761a	860a 761a	860a 761a		
720–600	706a	706a	706a	706a		
590–450	572a 523a	572a 524a	572a 524a	572a 523a		

Результаты исследования позволяют рекомендовать метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного отражения для выявления нетрадиционного сырья растительного происхождения в составе хлебобулочных из-

делий, обнаружения фальсификации функциональных изделий и экспресс-диагностики их физико-химических параметров в процессе выпечки.

Список литературы

1. Голубцова Ю. В. Оценка качества и подлинности плодово-ягодного сырья методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения // Техника и технология пищевых производств. 2017. Т. 45. № 2. С. 126–132. EDN: ZCOQJX
2. Колосова О. А., Тринеева О. В. Изучение возможности применения ИК-спектроскопии для идентификации сырья валериан сомнительной и волжской // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2022. Т. 11. № 3. С. 162–172. DOI: 10.33380/2305-2066-2022-11-3-162-172. EDN: CREEWK
3. Ahmad A., Ayub H. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Technique for Food Analysis and Authentication // In: Pathare P. B., Rahman M. S. (eds). Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables. Springer, Singapore. 2022. Pp. 103–142. DOI: 10.1007/978-981-19-5422-1_6
4. Guntarti A., Ahda M., Sunengsih N. Identification of lard on grilled beef sausage product and steamed beef sausage product using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy with chemometric combination // Slovak Journal of Food Sciences. 2019. Vol. 13. No. 1. Pp. 767–772. DOI: 10.5219/1162

5. Rodriguez-Saona L.E., Allendorf M.E. Use of FTIR for rapid authentication and detection of adulteration of food // *Annual Review of Food Science and Technology*. 2011. Vol. 2. Pp. 467–483. DOI: 10.1146/annurev-food-022510-133750.
6. Selvaraj K., Sankarganesh A., Sajan Francis P., Suraj B. Utilization of ATR-FTIR Spectroscopy Multivariate Chemometric Analysis in the Examine of Food Quality Edible Sesame Oils // *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8. Iss. 4S2. Pp. 748–754. DOI: 10.35940/ijrte.D1139.1284S219
7. Адаптация метода инфракрасной спектроскопии (БИК) для определения массовой доли белка и влаги в хлебобулочных изделиях / М. Ю. Кукин, Н. С. Лаврентьева, О. И. Парахина [и др.] // *Хлебопродукты*. 2023. №8. С. 32–36. DOI: 10.32462/0235-2508-2023-32-8-32-36. EDN: CXUTYS
8. Разработка градуировочных моделей в спектральном диапазоне от 1400 до 2500 нм для определения массовой доли жира, сахара и влаги в хлебобулочных изделиях БИК-методом / М. Ю. Кукин, М. Н. Костюченко, М. А. Нутчина, О. И. Парахина // *Вестник Международной академии холода*. 2022. № 4. С. 45–51. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-45-51. EDN: ZQGOZT
9. Adedeji A., Okeke A., Rady A. Utilization of FTIR and Machine Learning for Evaluating Gluten-Free Bread Contaminated with Wheat Flour // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 11. P. 8742. DOI: 10.3390/su15118742
10. Amir R.M., Anjum F.M., Khan M.I. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for the identification of wheat varieties / R.M. Amir, F.M. Anjum, M.I. Khan [et al.] // *Journal of Food Science and Technology*, 2013. Vol. 50. P. 1018-1023. DOI: 10.1007/s13197-011-0424-y
11. Изготовление хлеба из разных сортов муки с использованием пектина и молочной сыворотки и исследование их качественных показателей, ИК-Фурье спектроскопия полученных образцов / А. Г. Беляев, Э. А. Пьяникова, А. Е. Ковалева, О. А. Бывалец // *Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания*. 2018. № 3. С. 24–32. EDN: NAXJYG
12. Abu-Aqil G., Adawi S., Huleihel M. Early and Swift Identification of Fungal-Infection Using Infrared Spectroscopy // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2025. Vol. 325. P. 125101. DOI: 10.1016/j.saa.2024.125101
13. Dave G., Modi H. FT-IR method for estimation of phytic acid content during bread-making process // *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2018. Vol. 12. Pp. 2202–2208. DOI: 10.1007/s11694-018-9836-y
14. Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols / A.S. Sivam, D. Sun-Waterhouse, C.O. Perera, G.I.N Waterhouse // *Food Research International*. 2013. Vol. 50. Iss. 2. Pp. 574–585. DOI: 10.1016/j.foodres.2011.03.039
15. Pourfarzad A., Ahmadian Z., Habibi-Najafi M.B. Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study // *Heliyon*. 2018. Vol. 4. No. 12. P. e01017. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018
16. Сапон Е. С., Лугин В. Г. Применение ИК-Фурье спектроскопии для количественного анализа в фармацевтической промышленности // *Вестник фармации*. 2017. № 1(75). С. 82–92. EDN: YNCXVB
17. Czajkowska-González Y.A., Alvarez-Parrill E., del Rocío Martínez-Ruiz N. [et al.]. Addition of phenolic compounds to bread: antioxidant benefits and impact on food structure and sensory characteristics // *Food Production, Processing and Nutrition*. 2021. Vol. 3. No. 25. Pp. 1–12. DOI: 10.1186/s43014-021-00068-8
18. Применение ИК-спектроскопии в анализе лекарственного растительного сырья / О. В. Тринеева, М. А. Рудая, А. А. Гудкова, А. И. Сливкин // *Вестник Воронежского государственного университета*. Серия: Химия. Биология. Фармация. 2018. № 4. С. 187–194. EDN: YRWJNB
19. Изучение возможности применения ИК-спектроскопии для идентификации сорта плодов облепихи крушиновидной (*Hippophaes rhamnoides* L.) / О. В. Тринеева, М. А. Рудая, Е. Ф. Сафонова, А. И. Сливкин // *Химия растительного сырья*. 2019. № 1. С. 301–308. DOI: 10.14258/jcprm.2019014210. EDN: ZACFON
20. Тамахина А. Я. Экспресс-диагностика подлинности растительного сырья сем. Boraginaceae методом ИК-Фурье спектроскопии // *Известия Горского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 58-4. С. 99–107. DOI: 10.54258/20701047_2021_58_4_99. EDN: DQBMNM.
21. Лекарственные препараты на основе плюща: ИК-Фурье спектроскопический анализ / Л. А. Яковичин, П. И. Бажан, В. Д. Ратников, В. И. Гришковец // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского*. Биология. Химия. 2019. Т. 5 (71). № 3. С. 259–267. EDN: EIBFKV
22. Тамахина А. Я., Бориева Л. З. Формирование показателей качества булочного изделия при добавлении настоя фиалки собачьей (*Viola canina* L.) // *Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова*. 2025. № 2 (48). С. 132–140. DOI: 10.55196/2411-3492-2025-2-48-132-140. EDN: WFHYDY

23. Атлас ареалов и ресурсов лекарственных растений СССР. Москва: ГУГК, 1980. 340 с. EDN: WLNRYR
24. Structural and nutritional portrayal of rye-supplemented bread using Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy / A. Ikram, F. Saeed, M.U. Arshad [et al.] // *Food Sciences and Nutrition*. 2021. Vol. 9. No. 11. Pp. 6314–6321. DOI: 10.1002/fsn3.2592
25. Фаткуллин Р. И., Потороко И. Ю., Калинина И. В. Теоретические аспекты взаимодействия растительных полифенолов с макромолекулами в функциональных пищевых системах // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Пищевые и биотехнологии*. 2021. Т. 9. № 1. С. 82–90. DOI: 10.14529/food210109. EDN: MKCGFF
26. Bioavailability of procyanidin dimmers and trimers and food matrix effect in vitro and in vivo models / A. Serra, A. Macià, M.P. Romero, [et al.] // *British Journal of Nutrition*, 2010. Vol. 103. No. 7. Pp. 944–952. DOI: 10.1017/s0007114509992741

References

1. Golubtsova Yu.V. Evaluation of quality and authenticity of fruit raw material using FTIR spectroscopy of frustrated total internal reflection. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2017;45(2):126–132. (In Russ.). EDN: ZCOQJX
2. Kolosova OA, Trineeva OV. Studying the possibility of application IR spectroscopy for raw material identification *Valeriana wolgensis* Kazak. and *Valeriana dudia* L. *Drug development & registration*. 2022;11(3):162–172. (In Russ.). DOI: 10.33380/2305-2066-2022-11-3-162-172. EDN: CREEWK
3. Ahmad A., Ayub H. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Technique for Food Analysis and Authentication. In: *Pathare PB, Rahman MS (eds). Nondestructive Quality Assessment Techniques for Fresh Fruits and Vegetables*. Springer, Singapore. 2022. 103–142. DOI: 10.1007/978-981-19-5422-1_6
4. Guntarti A., Ahda M., Sunengsih N. Identification of lard on grilled beef sausage product and steamed beef sausage product using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy with chemometric combination. *Slovak Journal of Food Sciences*. 2019;13(1):767–772. DOI: 10.5219/1162
5. Rodriguez-Saona L.E., Allendorf M.E. Use of FTIR for rapid authentication and detection of adulteration of food. *Annual Review of Food Science and Technology*. 2011;2:467–483. DOI: 10.1146/annurev-food-022510-133750.
6. Selvaraj K., Sankarganesh A., Sajan Francis P., Suraj B. Utilization of ATR-FTIR Spectroscopy Multivariate Chemometric Analysis in the Examine of Food Quality Edible Sesame Oils. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019;8(4S2):748–754. DOI: 10.35940/ijrte.D1139.1284S219
7. Kukin M.Y., Lavrenteva N.S., Parakhina O.I. [et al.]. Adaptation of the infrared spectroscopy method (NIR) for determining the mass fraction of protein and moisture in bakery products. *Khleboprodukty*. 2023;(8):32–36. (In Russ.). DOI: 10.32462/0235-2508-2023-32-8-32-36. EDN: CXUTYS
8. Kukin M.Y., Kostyuchenko M.N., Nutchina M.A., Parakhina O.I. Development of calibration models in the spectral range from 1400 to 2500 nm to determine the mass fraction of fat, sugar and moisture in bakery products by the NIR method. *Journal international academy of refrigeration*. 2022;(4):45–51. (In Russ.). DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-4-45-51. EDN: ZQGOZT
9. Adedeji A., Okeke A., Rady A. Utilization of FTIR and Machine Learning for Evaluating Gluten-Free Bread Contaminated with Wheat Flour. *Sustainability*. 2023;15(11):8742. DOI: 10.3390/su15118742
10. Amir R.M., Anjum F.M., Khan M.I. [et al.]. Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for the identification of wheat varieties. *Journal of Food Science and Technology*. 2013;(50):1018–1023. DOI: 10.1007/s13197-011-0424-y
11. Belyaev A.G., Pyanikova E.A., Kovaleva A.E., Byvalets O.A. Making bread from different grades of flour using pectin and whey and the study of their quality indicators, IR-Fourier spectroscopy of the samples obtained. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvaiushchei promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniia*. 2018;(3):24–32. (In Russ.). EDN: NAXJYG
12. Abu-Aqil G, Adawi S, Huleihel M. Early and Swift Identification of Fungal-Infection Using Infrared Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2025;325:125101. DOI: 10.1016/j.saa.2024.125101
13. Dave G., Modi H. FT-IR method for estimation of phytic acid content during bread-making process. *Journal of Food Measurement and Characterization*. September 2018;12:2202–2208. DOI: 10.1007/s11694-018-9836-y

14. Sivam A.S., Sun-Waterhouse D., Perera C.O., Waterhouse G.I.N. Application of FT-IR and Raman spectroscopy for the study of biopolymers in breads fortified with fibre and polyphenols. *Food Research International*. 2013;50(2):574–585. DOI: 50. 10.1016/j.foodres.2011.03.039
15. Pourfarzad A., Ahmadian Z., Habibi-Najafi M.B. Interactions between polyols and wheat biopolymers in a bread model system fortified with inulin: A Fourier transform infrared study. *Heliyon*. 2018;4(12):e01017. DOI: 10.1016/j.heliyon.2018
16. Sapon AS, Luhin VH. FTIR-spectroscopy in quantitative pharmaceutical analysis. *Vestnik farmatcii*. 2017;1(75):82–92. (In Russ.). EDN: YNCXVB
17. Czajkowska–González Y.A., Alvarez–Parrill E., del Rocío Martínez–Ruiz N. [et al.]. Addition of phenolic compounds to bread: antioxidant benefits and impact on food structure and sensory characteristics. *Food Production, Processing and Nutrition*. 2021;3(25):1–12. DOI: 10.1186/s43014-021-00068-8
18. Trineeva O.V., Rudaya M.A., Gudkova A.A., Slivkin A.I. Application of IR-spectroscopy in the analysis of vegetable plant raw material. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2018;(4):187–194. (In Russ.). EDN: YRWJNB
19. Trineeva O.V., Rudaya M.A., Safonova E.F., Slivkin A.I. Study of the possibility of using IR-spectroscopy for the identification of a variety of sea buckthorn fruit (*Hippophaes rhamnoides* L.). *Khimija Rastitel'nogo Syr'ja*. 2019;(1):301–308. (In Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2019014210. EDN: ZACFOH
20. Tamakhina A/Ya. Express diagnostics of the authenticity of plant raw materials of the Boraginaceae family by FTIR spectroscopy. *Proceedings of Gorsky State Agrarian University*. 2021;58(4):97–107. (In Russ.). DOI: 10.54258/20701047_2021_58_4_99
21. Yakovishin L.A., Bazhan P.I., Ratnikov V.D., Grishkovets V.I. Ivy-containing drugs: FT-IR spectroscopy analysis. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*. 2019;5-71(3):259–267. (In Russ.). EDN: EIBFKV
22. Tamakhina AYa, Borieva LZ. Formation of quality indicators of bakery products with the addition of dog violet (*Viola canina* L.) infusion. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov*. 2025;2(48):132–140. (In Russ.). DOI: 10.55196/2411-3492-2025-2-48-132-140
23. *Atlas arealov i resursov lekarstvennykh rastenij SSSR* [Atlas of areas and resources of medicinal plants of the USSR]. Moscow: GUGK, 1980. 340 p. (In Russ.). EDN: WLNRYR
24. Ikram A., Saeed F., Arshad M.U. [et al.]. Structural and nutritional portrayal of rye-supplemented bread using Fourier transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy. *Food Sciences and Nutrition*. September 2021;9(11):6314–6321. DOI: 10.1002/fsn3.2592
25. Fatkullin RI, Potoroko IYu, Kalinina IV. Theoretical aspects of the interaction of plant polyphenols with macromolecules in functional food systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*. 2021;9(1):82–90. (In Russ.). DOI: 10.14529/food210109. EDN: MKCGFF
26. Serra A, Macià A, Romero M.P. [et al.]. Bioavailability of procyanidin dimmers and trimers and food matrix effect in vitro and in vivo models. *British Journal of Nutrition*. 2010;103(7):944–952. DOI: 10.1017/s0007114509992741

Сведения об авторах

Тамахина Аида Яковлевна – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры садоводства и лесного дела, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN код: 4714-5835

Бориева Лариса Зрамуковна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии продуктов из растительного сырья, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 6734-9872

Information about the authors

Aida Ya. Tamakhina – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Commodity research, tourism and law, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4714 5835

Larisa Z. Borieva – Candidate of Technical Sciences, an associate professor of the Department of Plant Products Technology, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 6734-9872

Авторский вклад. *Тамахина А. Я.* – методика и методология исследования, обобщение результатов исследования, написание исходного текста, итоговые выводы; *Бориева Л. З.* – приготовление образцов булочных изделий, определение показателей качества.

Author's contribution. *Tamakhina A.Ya.* – research methodology and methods, generalization of research results, writing of the original text, final conclusions; *Borieva L.Z.* – preparation of bakery product samples, determination of quality indicators.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 22.08.2025;
одобрена после рецензирования 08.09.2025;
принята к публикации 15.09.2025.*

*The article was submitted 22.08.2025;
approved after reviewing 08.09.2025;
accepted for publication 15.09.2025.*