Статья поступила в редакцию: 20.06.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 613.2+664+519.2

Разработка и математическое обоснование состава функциональной композитной крупы с повышенной биодоступностью железа

Камалова Фируза Рахматовна
докторант
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
E-mail: kamalovafiruza884@mail.com
Хаитов Рауф Арифович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Атамуратова Тамара Ивановна
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара
Рахмонов Кахрамон Санокулович
канд. техн. наук, доц.
Бухарский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Бухара

Development and mathematical substantiation of the composition of functional composite cereals with increased iron bioavailability

Kamalova Firuza
Researcher-applicant
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Khaitov Rauf
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Atamuratova Tamara
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara
Rakhmonov Kakhramon
candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Bukhara State Technical University
Uzbekistan, Bukhara

Библиографическое описание: Разработка и математическое обоснование состава функциональной композитной крупы с повышенной биодоступностью железа // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Камалова Ф.Р. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23555

Аннотация

В статье представлены результаты разработки функциональной композитной крупы антианемической направленности на основе зернового, бобового и фитосырья. Цель исследования заключалась в научном обосновании рецептурной композиции, обеспечивающей повышенное содержание железа, улучшенный аминокислотный профиль и более высокую потенциальную биодоступность негемового железа. В качестве сырья использованы цельносмолотая пшеничная крупа, нутовая мука, порошок листьев крапивы, порошок плодов облепихи и пшеничные отруби. Методология включала определение белка, железа, фитатов и аскорбиновой кислоты стандартными аналитическими методами, расчёт аминокислотного скора, органолептическую оценку и оптимизацию рецептуры методом поверхностей отклика. Для оценки биодоступности железа использовали расчётно-экспериментальный подход с учётом диализируемой фракции после статической in vitro модели пищеварения. Получены регрессионные зависимости, описывающие влияние доли нутовой муки, крапивы и облепихи на биодоступность железа и аминокислотную сбалансированность. Установлено, что оптимальное соотношение компонентов составляет: пшеничная крупа – 40,0 %, нутовая мука – 40,0 %, крапива – 7,0 %, облепиха – 5,0 %, отруби – 8,0 %. Композиция характеризуется содержанием железа 10,5±0,3 мг/100 г, белка 17,8±0,6 %, прогнозируемой биодоступностью железа 8,8±0,4 % и аминокислотным скором по лизину 94,2±1,8 %.

Abstract

The article presents the development of a functional composite cereal with anti-anemic orientation based on grain, legume and plant raw materials. The purpose of the study was to scientifically substantiate a formulation that provides increased iron content, improved amino acid profile and higher potential bioavailability of non-heme iron. Whole-ground wheat cereal, chickpea flour, nettle leaf powder, sea buckthorn fruit powder and wheat bran were used as the main components. The methodology included determination of protein, iron, phytates and ascorbic acid by standard analytical methods, calculation of amino acid score, sensory evaluation and formulation optimization using response surface methodology. Iron bioavailability was estimated by a calculation-experimental approach taking into account the dialyzable fraction after static in vitro digestion. Regression equations were obtained describing the influence of chickpea flour, nettle and sea buckthorn on iron bioavailability and amino acid balance. The optimal component ratio was established as follows: whole-ground wheat cereal – 40.0 %, chickpea flour – 40.0 %, nettle – 7.0 %, sea buckthorn – 5.0 %, wheat bran – 8.0 %. The developed composition provides iron content of 10.5±0.3 mg/100 g, protein content of 17.8±0.6 %, predicted iron bioavailability of 8.8±0.4 % and lysine amino acid score of 94.2±1.8 %.

Ключевые слова: функциональные продукты питания, железодефицитная анемия, биодоступность железа, нут, крапива, облепиха, фитаты, аскорбиновая кислота, математическое моделирование, поверхности отклика.

Keywords: functional food products, iron deficiency anemia, iron bioavailability, chickpea, nettle, sea buckthorn, phytates, ascorbic acid, mathematical modeling, response surface methodology.

Введение

Дефицит железа остаётся одной из наиболее распространённых форм алиментарных нарушений питания населения. Наиболее уязвимыми группами являются женщины репродуктивного возраста, дети, подростки и лица с несбалансированным рационом. Профилактика железодефицитных состояний требует не только увеличения общего поступления железа с пищей, но и повышения его фактической доступности для абсорбции.

Железо растительного происхождения находится преимущественно в негемовой форме, биодоступность которой существенно зависит от состава пищевой матрицы. Зерновые и бобовые продукты являются важными источниками белка, пищевых волокон и минеральных веществ, однако содержащиеся в них фитаты способны образовывать нерастворимые комплексы с ионами железа, цинка и кальция, снижая их усвоение. Поэтому при проектировании функциональных круп целесообразно учитывать не только валовое содержание железа, но и соотношение промоторов и ингибиторов его абсорбции.

Перспективным технологическим решением является комбинирование зерновых компонентов с бобовым сырьём и фитодобавками. Нутовая мука позволяет повысить содержание белка и компенсировать дефицит лизина, характерный для пшеничных продуктов. Порошок листьев крапивы может рассматриваться как растительный источник железа, магния, кальция, хлорофиллсодержащих и фенольных соединений. Облепиха, содержащая органические кислоты и аскорбиновую кислоту, способна повышать растворимость негемового железа и частично нивелировать ингибирующее действие фитатов.

Целью настоящего исследования являлось научное обоснование состава функциональной композитной крупы для профилактики железодефицитных состояний и оптимизация рецептурной композиции с применением методов математического моделирования.

Объекты и методы исследования

В качестве объектов исследования использовали цельносмолотую пшеничную крупу, нутовую муку крупнодисперсного помола, порошок листьев крапивы двудомной (Urtica dioica L.), порошок плодов или жмыха облепихи (Hippophae rhamnoides L.) и пшеничные отруби. Выбор компонентов осуществляли с учётом их химического состава, технологической совместимости и физиологической роли в формировании антианемической направленности продукта.

Подготовку сырья проводили по единой схеме: инспекция, удаление посторонних примесей, сушение при температуре не выше 50 °С до массовой доли влаги 8 – 10 %, измельчение и просеивание. Для обеспечения воспроизводимости рецептурных опытов все компоненты нормировали по влажности и смешивали в лабораторном смесителе в течение 8 – 10 мин.

Массовую долю белка определяли по методу Кьельдаля с пересчётом общего азота на белок по коэффициенту 6,25. Содержание железа определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии после сухого озоления образцов в соответствии с принципами AOAC 999.11; результаты выражали в мг/100 г сухого продукта. Содержание

фитиновой кислоты определяли колориметрическим методом по фосфатному комплексу после кислотной экстракции, а содержание аскорбиновой кислоты – титриметрическим методом с 2,6-дихлорфенолиндофенолом. Анализы выполняли не менее чем в трёх параллельных повторностях.

Потенциальную биодоступность железа оценивали как сочетание расчётного коэффициента доступности и доли диализируемого железа после статического in vitro моделирования желудочно-кишечного пищеварения. Модель включала последовательные фазы имитации желудочного и кишечного переваривания с контролем pH, ферментативной активности и времени экспозиции. Такой подход позволил учитывать влияние органических кислот, фитатов и белково-углеводной матрицы продукта на растворимость железа.

Органолептическую оценку опытных образцов проводили по пятибалльной шкале с учётом внешнего вида, цвета, запаха, вкуса, выраженности травянистого привкуса, консистенции и общей приемлемости. Дегустационная комиссия состояла из семи подготовленных экспертов. Образцы с выраженной терпкостью или травянистым послевкусием считали технологически ограниченными даже при высоких расчётных значениях биодоступности железа.

Оптимизацию рецептуры осуществляли методом поверхностей отклика (Response Surface Methodology, RSM). В качестве независимых факторов выбраны: z1 – содержание нутовой муки (30,0 – 50,0 %), z2 – содержание порошка крапивы (5,0 – 10,0 %), z3 – содержание порошка облепихи (3,0 – 7,0 %). Критериями оптимизации являлись: Y1 – биодоступность железа (%), Y2 – аминокислотный скор по лизину (%), Y3 – органолептическая оценка (балл).

Общую целевую функцию задавали в виде: $F(x)=\Sigma\omega i \cdot Ki \rightarrow max$, где ωi - коэффициент весомости показателя (биологическая ценность – 0,5; усвояемость железа – 0,4; органолептическая приемлемость – 0,1), Ki - нормированный показатель качества. Модельные ограничения задавали следующим образом: содержание железа Feобщ ≥10 мг/ 100 г; аминокислотный скор по лизину AKClys ≥90 %; органолептическая оценка не ниже 4,0 балла; суммарная доля компонентов равна 100 %.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием дисперсионного и регрессионного анализа. Достоверность различий оценивали при уровне значимости $p \leq 0,05$. Результаты представляют как среднее значение ± стандартное отклонение. Адекватность регрессионных моделей оценивали по коэффициенту детерминации R^2 и анализу остаточных отклонений.

Результаты и обсуждение

Эффективность усвоения негемового железа определяется балансом между ингибирующими и активирующими факторами пищевой матрицы. Наиболее значимыми ингибиторами являются фитаты, а среди активаторов особую роль играют аскорбиновая и другие органические кислоты. Поэтому при разработке композиции учитывали не только содержание железа в отдельных компонентах, но и их взаимное влияние на растворимость микроэлемента.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены соответствующие регрессионные модели, описывающие влияние рецептурных факторов на целевые показатели качества. Формулы приведены без технических символов и случайных знаков, что устраняет ранее отмеченную редакционную ошибку.

по биодоступности железа:

$$Y1 = 6{,}85 + 0{,}21z1 + 0{,}54z2 + 0{,}83z3 + 0{,}12z1z2 + 0{,}48z2z3 – 0{,}031z2^2 – 0{,}027z3^2$$

по аминокислотному скору лизина:

$$Y2 = 74{,}8 + 0{,}92z1 + 0{,}41z2 + 0{,}25z3 + 0{,}36z1z2 – 0{,}17z2z3 – 0{,}012z1^2$$

по органолептической оценке:

$$Y3 = 4{,}62 + 0{,}04z1 – 0{,}08z2 – 0{,}06z3 – 0{,}015z2z3$$

Полученные коэффициенты детерминации составили соответственно R^2=0,94 для Y1, R^2=0,92 для Y2 и R^2=0,89 для Y3, что свидетельствует об удовлетворительной адекватности разработанных моделей для прогнозирования качества продукта в исследованной области факторов.

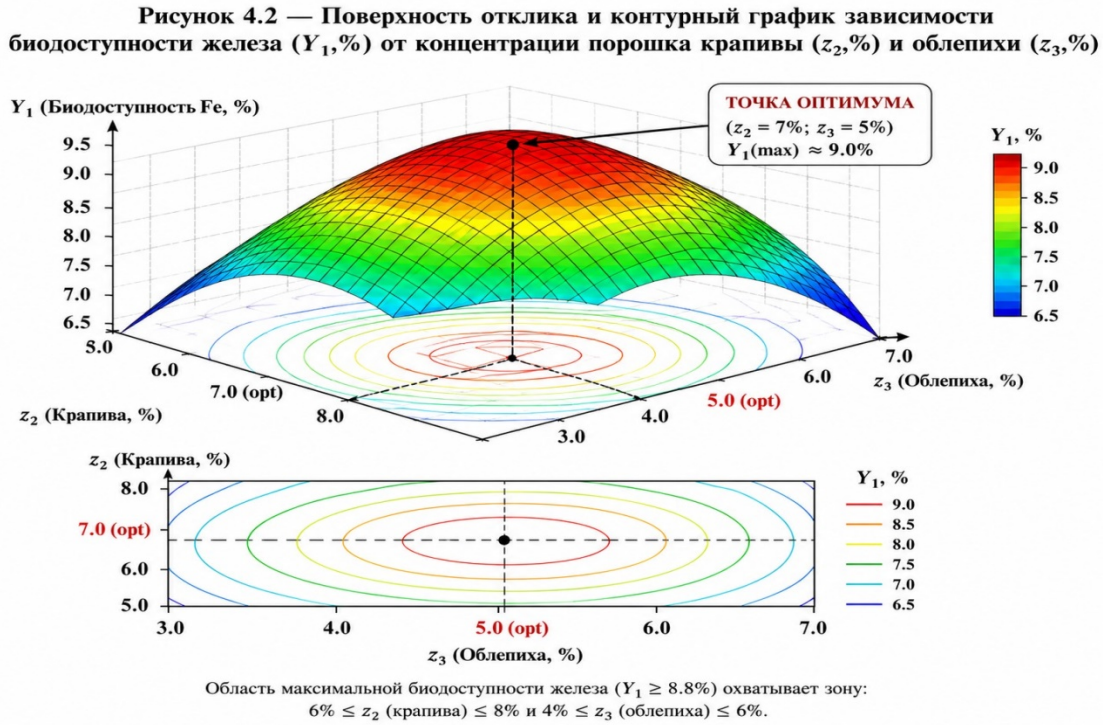


Рисунок 1. Поверхность отклика и контурный график зависимости биодоступности железа (Y1) от концентрации порошка крапивы (z2, %) и облепихи (z3, %)

Анализ поверхности отклика свидетельствует о наличии выраженного синергетического взаимодействия между порошком крапивы и порошком облепихи. Увеличение доли облепихи сопровождалось более интенсивным ростом показателя Y1 по сравнению с аналогичным изменением содержания крапивы, что связано с действием аскорбиновой и органических кислот на растворимость железа.

Контурный анализ показал, что зона максимальной биодоступности железа (Y1 ≥ 8,8 %) располагается в диапазоне: крапива – 6,0 – 8,0 %, облепиха – 4,0 – 6,0 %. Точка глобального оптимума зафиксирована при z2=7,0 % и z3=5,0 %. Дальнейшее увеличение концентрации

фитодобавок приводило к эффекту насыщения, при котором прирост биодоступности железа становился статистически незначимым (p>0,05), тогда как органолептический риск возрастал.

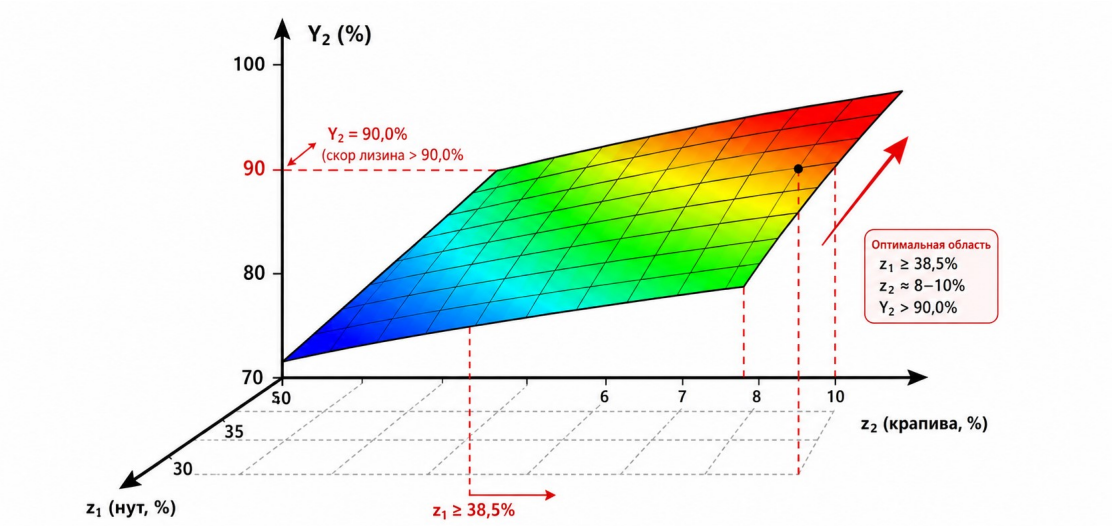


Рисунок 2. Поверхность отклика зависимости аминокислотного скора по лизину (%) от содержания нутовой муки (z_1) и крапивы (z_2) при фиксированной доле облепихи

Уравнение регрессии по аминокислотному скору (лизин):

$$Y_2 = 74{,}8 + 0{,}92z_1 + 0{,}41z_2 + 0{,}25z_3 + 0{,}36z_1z_2 - 0{,}17z_2z_3 - 0{,}012{z_1}^2$$

Рисунок 2. Поверхность отклика зависимости аминокислотного скора по лизину (%) от содержания нутовой муки (z1) и крапивы (z2) при фиксированной доле облепихи

Поверхность отклика Y2, характеризующая аминокислотный скор лизина, имеет вид практически линейной восходящей плоскости с выраженным положительным градиентом в направлении увеличения доли нутовой муки. Это подтверждает доминирующее влияние нутового компонента на биологическую ценность белкового комплекса.

Согласно построенной модели, достижение аминокислотного скора выше 90,0 % возможно при использовании не менее 38,5 % нутовой муки в сочетании с 7,0 – 10,0 % порошка крапивы. При совмещении областей допустимых значений установлена зона компромиссного оптимума, удовлетворяющая одновременно требованиям по биодоступности железа, аминокислотному составу и органолептической приемлемости.

Таблица 1. Оптимизированный состав функциональной крупы

Компонент	Массовая доля компонента, %
Цельносмолотая пшеничная крупа	40,0
Мука нута (крупнодисперсная)	40,0
Порошок крапивы	7,0
Порошок облепихи	5,0
Отруби пшеничные	8,0
Итого	100,0

Оптимизированная рецептура характеризуется технологической сбалансированностью: пшеничная основа обеспечивает структуру и привычные потребительские свойства, нутовая мука повышает белковую ценность, крапива служит источником железа и биологически активных веществ, облепиха усиливает растворимость негемового железа, а отруби повышают содержание пищевых волокон.

Таблица 2. Расчётно-экспериментальные показатели качества продукта

Компонент	Массовая доля железа, мг/100 г	Биодоступность железа, %	АКС по лизину, %	Массовая доля белка, %
Цельносмолотая пшеничная крупа	4,5±0,2	5,0±0,3	52,0±1,5	13,5±0,4
Мука нута	8,5±0,3	9,5±0,4	105,0±2,0	23,0±0,7
Порошок крапивы	45,0±1,1	11,0±0,5	112,0±2,4	25,0±0,8
Порошок облепихи	6,0±0,2	10,0±0,4	75,0±1,8	8,0±0,3
Отруби пшеничные	12,0±0,5	4,0±0,2	60,0±1,6	16,0±0,5
Оптимизированная смесь	10,5±0,3	8,8±0,4	94,2±1,8	17,8±0,6

Полученные данные свидетельствуют о высокой пищевой и биологической ценности разработанной крупы. Содержание железа в оптимизированной смеси составило 10,5±0,3 мг/100 г, что соответствует заданному ограничению модели. Биодоступность железа на уровне 8,8±0,4 % обусловлена сочетанием крапивы как минерального донора и облепихи как источника органических кислот. Нутовая мука обеспечила повышение аминокислотного скора по лизину до 94,2±1,8 %, что позволяет устранить типичный для зерновых продуктов дефицит данной незаменимой аминокислоты.

Таблица 3. Органолептическая оценка оптимизированной композиции

Показатель	Оценка, балл	Комментарий
Внешний вид и цвет	4,7±0,2	однородная крупяная смесь с умеренным зелёно-жёлтым оттенком
Запах	4,5±0,2	слабовыраженный растительный аромат без посторонних запахов
Вкус после варки	4,4±0,3	умеренная травянистость, без выраженной терпкости
Консистенция	4,6±0,2	рассыпчатая, без грубых включений
Общая приемлемость	4,55±0,20	образец соответствует требованиям для функционального продукта

Органолептическая оценка подтвердила технологическую обоснованность выбранных дозировок фитодобавок. При содержании крапивы выше 8,0 % и облепихи выше 6,0 % отмечалось усиление травянистого привкуса и терпкости, что ограничивает дальнейшее повышение их доли в рецептуре даже при потенциальном росте минеральной ценности.

Заключение

Проведённые исследования подтвердили возможность разработки функциональной композитной крупы антианемической направленности на основе зернового, бобового и фитосырья. Использование нутовой муки, порошков крапивы и облепихи в сочетании с цельносмолотой пшеничной крупой и пшеничными отрубями обеспечивает формирование многокомпонентной пищевой системы с повышенным содержанием железа, улучшенным аминокислотным составом и более высокой потенциальной доступностью микроэлементов.

С применением метода поверхностей отклика установлено, что оптимальные показатели достигаются при следующем составе: цельносмолотая пшеничная крупа – 40,0 %, нутовая мука – 40,0 %, порошок крапивы – 7,0 %, порошок облепихи – 5,0 %, пшеничные отруби – 8,0 %. Данный состав обеспечивает содержание белка 17,8±0,6 %, железа 10,5±0,3 мг/100 г, прогнозируемую биодоступность железа 8,8±0,4 % и аминокислотный скор по лизину 94,2±1,8 %.

Показано, что дальнейшее увеличение концентрации растительных добавок не сопровождается статистически значимым повышением биодоступности железа ($p>0,05$), но ухудшает органолептические характеристики продукта. Поэтому содержание крапивы 7,0 % и облепихи 5,0 % следует рассматривать как рациональные и технологически обоснованные параметры рецептуры.

Результаты исследования подтверждают эффективность применения принципов пищевой комбинаторики, аналитического контроля, органолептической оценки и математического моделирования при разработке функциональных продуктов профилактического назначения. Полученные данные создают научно-практическую основу для дальнейшей технологической апробации и внедрения разработанной крупы в производство.

Список литературы

1. Rădulescu L., Popescu M., Soare R. Nettle bread, a potential functional product // Scientific Papers. Series A. Agronomy. – 2024. – T. 67, № 2. – P. 640–647.
2. AOAC Official Method 999.11. Lead, cadmium, copper, iron and zinc in foods. Atomic absorption spectrophotometry after dry ashing. – AOAC International. – AOAC International. – 1999.
3. Brodkorb A., Egger L., Alminger M. et al. INFOGEST static in vitro simulation of gastrointestinal food digestion // Nature Protocols. – 2019. – T. 14. – P. 991–1014.
4. Brouns F. Phytic acid and whole grains for health controversy // Nutrients. – 2022. – T. 14.
5. Chondrou T., Kourkouta L., Fradelos E.C. et al. Dietary phytic acid, dephytinization, and phytase intervention for improving iron and zinc bioavailability // Nutrients. – 2024. – T. 16. – Art. 4069.
6. Devkota H.P., Paudel K.R., Hassan M.M. et al. Stinging nettle (Urtica dioica L.): nutritional composition, bioactive compounds and food applications // Molecules. – 2022. – T. 27. – Art. 5219.

7. FAO. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Report of an FAO Expert Consultation. – Rome: FAO, 2013. – 66 P.
8. Givens D.I., Punetha P., Humphries J.M. The importance of bioavailability of iron in plant-based foods in the context of treating iron-deficiency anaemia // International Journal of Food Science and Technology. – 2024. – T. 59. – P. 1–10.
9. Hurrell R., Egli I. Iron bioavailability and dietary reference values // The American Journal of Clinical Nutrition. – 2010. – T. 91.
10. Maietti A., Tedeschi P., Catani M. et al. Nutrient composition and antioxidant performances of bread-making products enriched with stinging nettle // Foods. – 2021. – T. 10. – Art. 938.
11. Mukwevho P.L., Nthangeni B., Akinmoladun O.F. et al. Optimisation using response surface methodology of process variables in functional food development // Processes. – 2023. – T. 11. – Art. 2503.
12. Nutritional Science and Clinical Dietetics: National Guidelines / ed. by V.A. Tutelyan, D.B. Nikityuk. – Moscow: GEOTAR-Media, 2020. – 656 P.
13. Peerkhan N., Nema P.K., Kumar K. Optimization of functional food formulation using response surface methodology // Journal of Food Science and Technology. – 2020. – T. 57. – P. 2209–2218.
14. Skalny A.V. Human Microelementoses: Diagnosis and Correction. – Moscow: GEOTAR-Media, 2019. – 304 P.
15. Sulaiman N., Givens D.I., Anitha S. et al. A narrative review: in vitro methods for assessing bioaccessibility/bioavailability of iron in plant-based foods // Frontiers in Sustainable Food Systems. – 2021. – T. 5. – Art. 727533.
16. Tambo Tene S., Womeni H.M., Kamdem J.P. et al. Application of response surface methodology in food process optimisation // Cogent Food & Agriculture. – 2023. – T. 9. – Art. 2279724.