

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-2-51-64>

УДК 637.14:637.136.5:616.391



Сравнительная характеристика ферментативных гидролизатов белков коровьего молока для использования в энтеральном питании

Ю.С. Сидорова¹, Н.А. Петров✉¹, Н.А. Бирюлина¹,
С.Н. Зорин¹, Е.Н. Соколова², В.К. Мазо¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»;
г. Москва, Российская Федерация,
✉petrov-nikita-y@mail.ru

²Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии –
филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»;
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Введение. Энтеральное питание является важнейшим компонентом лечения тяжело-больных пациентов. Его назначают пациентам при функционирующем пищеварительном тракте в ситуациях, когда обычный оральный прием пищи не обеспечивает физиологические потребности организма. Благодаря высокой биологической ценности и оптимальному аминокислотному составу сывороточные белки коровьего молока чаще всего используются для производства белковых гидролизатов, предназначенных для включения в состав продуктов энтерального питания. **Цель исследования.** Целью данного исследования была сравнительная оценка физико-химических показателей ферментативных гидролизатов белка молочной сыворотки (ФГКСБ) с различной степенью гидролиза, а также оценка их биологической ценности и эффективности *in vivo* для включения в рецептуры специализированных пищевых продуктов, в том числе энтерального питания. **Объекты и методы исследования.** В работе использовали гидролизат, полученный по разработанной нами ранее схеме (ФГКСБ 1 «Протозим Н»), и три образца промышленных гидролизатов (ФГКСБ 2 «Углич», ФГКСБ 3 «Ярославль», ФГКСБ 4 «Воронеж»). На первом этапе оценивали молекулярно-массовое распределение пептидных фракций, степень гидролиза, кратность снижения антигенности и аминокислотный состав образцов. На втором этапе проводили оценку биологической ценности исследуемых образцов гидролизатов в эксперименте на крысах-самцах линии Вистар. Оценивали потребление корма животными, прирост массы тела, за трое суток проводили обменный опыт в метаболических клетках, рассчитывали коэффициент эффективности белка (КЭБ), истинную усвояемость и биологическую ценность, скорректированную по аминокислотному скору (PDCAAS). **Результаты и обсуждение.** ФГКСБ 1 «Протозим Н» характеризовался средней степенью гидролиза, без явного снижения антигенности, с высоким значением КЭБ, высокой истинной усвояемостью и коэффициентом PDCAAS. **Заключение.** Полученный по разработанной нами схеме ферментативный гидролизат имеет ряд технологических преимуществ по сравнению с промышленными образцами и обладает биологической ценностью, не отличающейся от исходного концентрата сывороточных белков.

Ключевые слова: сыворотка, белок, ферментативный гидролиз, коэффициент эффективности белка, аминокислотный скор, биологическая ценность, крысы, аллергенность, усвояемость

Для цитирования: Сидорова Ю.С., Петров Н.А., Бирюлина Н.А., Зорин С.Н., Соколова Е.Н., Мазо В.К. Сравнительная характеристика ферментативных гидролизатов белков коровьего молока для использования в энтеральном питании. *Новые технологии / New technologies*. 2026; 22 (2): 51-64. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-2-51-64>

Благодарности. Авторы выражают признательность главному технологу АО «Молвест» / ПАО Молочный Комбинат Воронежский, доктору технических наук Мельниковой Елене Ивановне и старшему научному сотруднику ВНИИ маслоделия и сыроделия – филиал ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, кандидату биологических наук Абрамову Дмитрию Васильевичу за предоставленные образцы. Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания № FGMF-2025-0011.

Comparative characteristics of enzymatic hydrolysates of cow milk proteins for the use in enteral nutrition

Yu.S. Sidorova¹, N.A. Petrov¹, N.A. Biryulina¹,
S.N. Zorin¹, E.N. Sokolova², V.K. Mazo¹

¹*Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology, and Food Safety;
Moscow, the Russian Federation
✉petrov-nikita-y@mail.ru*

²*All-Russian Research Institute of Food Biotechnology – Branch of the Federal
Research Centre for Nutrition and Biotechnology;
Moscow, the Russian Federation*

Abstract. Introduction. Enteral nutrition is a critical component of treatment for seriously ill patients. It is prescribed to patients with a functioning gastrointestinal tract in situations where regular oral nutrition fails to meet their physiological needs. Due to its high biological value and optimal amino acid composition, cow milk proteins are most often used to produce protein hydrolysates for enteral nutrition products. **The goal of the research** was to comparatively evaluate the physicochemical properties of enzymatic whey protein hydrolysates (EWPBs) with varying degrees of hydrolysis, as well as to assess their biological value and in vivo efficacy for their introduction into specialized food products, including enteral nutrition. **The objectives and methods.** Hydrolysate obtained according to a previously developed protocol (FHWPC 1 “Protozyme N”) and three samples of industrial hydrolysates (FHWPC 2 “Uglich”, FHWPC 3 “Yaroslavl”, and FHWPC 4 “Voronezh”) were used in the research. In the first stage, the molecular weight distribution of peptide fractions, the degree of hydrolysis, the antigenicity reduction factor, and the amino acid composition of the samples were assessed. In the second stage, the biological value of the hydrolysate samples in an experiment on male Wistar rats was assessed. Feed intake and body weight gain was evaluated, a three-day exchange experiment in metabolic cells was conducted, and the protein efficiency ratio (PER), true digestibility, and the biological value adjusted for the amino acid score (PDCAAS) were calculated. **The results and discussion.** FHWPC 1 “Protozyme N” was characterized by a moderate degree of hydrolysis, without a clear reduction in antigenicity, with a high FER value, high intrinsic digestibility, and a PDCAAS coefficient. **Conclusion.** The enzymatic hydrolysate obtained using our developed scheme has a number of technological advantages over commercial samples and possesses a biological value indistinguishable from the original whey protein concentrate.

Keywords: whey, protein, enzymatic hydrolysis, protein efficiency coefficient, amino acid score, biological value, rats, allergenicity, digestibility

For citation: Sidorova Yu.S., Petrov N.A., Biryulina N.A., Zorin S.N., Sokolova E.N., Mazo V.K. Comparative characteristics of enzymatic hydrolysates of cow milk proteins for use in enteral nutrition. *Novye tehnologii / New technologies*. 2026; 22 (2): 51-64. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-2-51-64>

Acknowledgments. The authors express their gratitude to Elena Ivanovna Melnikova, Dr Sci. (Eng.), Chief Technologist of JSC Molvest / PJSC Voronezh Dairy Plant, and Dmitry Vasilyevich Abramov, PhD (Biology), Senior Researcher at the All-Russian Research Institute of Butter and Cheese Making, a branch of the V.M. Gorbatov Federal Scientific Centre of Food Systems, the Russian Academy of Sciences, for providing the samples. The research was carried out as part of State Assignment No. FGMF-2025-0011.

Введение. Энтеральное питание является важнейшим компонентом лечения тяжелобольных пациентов, особенно тех, у кого нарушено сознание, наблюдается дисфагия или желудочно-кишечная дисфункция. Адекватное энтеральное питание жизненно важно не только для предотвращения недоедания, но и для снижения риска возникновения инфекций, поддержания иммунной функции и содействия неврологическому восстановлению [1, с. 2; 2, с. 2]. Энтеральное питание назначают пациентам при функционирующем пищеварительном тракте в ситуациях, когда обычный оральный прием пищи не обеспечивает физиологические потребности организма. Рецептуры продуктов энтерального питания часто включают частично или полностью гидролизированные макронутриенты, например, гидролизаты белков, длинноцепочечных углеводов или жирных кислот [3, с. 2].

Благодаря высокой биологической ценности и оптимальному аминокислотному составу сывороточные белки коровьего молока чаще всего используются для производства белковых гидролизатов, предназначенных для специализированного питания [4, с. 1]. Ферментативный гидролиз сывороточных белков улучшает их усвояемость и функциональные свойства, расширяя возможности их применения в пищевой и медицинской промышленности [5, с. 3]. Гидролизаты белка молочной сыворотки характеризуются высокой скоростью гастродуоденального транзита и ускоренной эвакуаторной функцией желудка по сравнению с нативными белками, более эффективным перевариванием пептидов в кишечнике и стимуляцией ферментативной активности тонкого кишечника и активности мотилина, главного регулятора моторной активности желудочно-кишечного тракта в межпищеварительный [3, с. 3]. В исследовании [6, с. 422] отмечено снижение случаев желудочной непереносимости у пациентов, получавших энтеральное питание, в котором белковый компонент был представлен полностью гидролизатом

сывороточных белков по сравнению с группой сравнения, пациенты которой получали энтеральное питание на основе смеси интактных белков молочной сыворотки, казеина, гороха, сои.

Полученные гидролизом пептидные смеси обладают разнообразными биологически активными свойствами, которые находят применение в разработке специализированных продуктов питания и профилактического питания, в том числе для людей с аллергией на белки коровьего молока [7, с. 1]. Помимо этого, в процессе гидролиза высвобождаются биологически активные пептиды, которые обладают широким спектром биологических эффектов, включая антимикробное, противодиабетическое, антиоксидантное и иммуномодулирующее действие [8, с. 3; 9, с. 21302], что, в свою очередь вызывает значительный интерес.

Целью данного исследования была сравнительная оценка физико-химических показателей ферментативных гидролизатов белка молочной сыворотки (ФГКСБ) с различной степенью гидролиза, а также выявление их биологической ценности и эффективности *in vivo* для включения в рецептуры специализированных пищевых продуктов, в том числе энтерального питания.

Объекты и методы исследования.

В работе использовали:

1) Концентрат сывороточных белков (КСБ, ООО «Тагрис», РФ) с содержанием белка 72,3%;

2) ФГКСБ 1 «Протозим Н» – ферментолит КСБ, полученный по разработанной нами схеме, включающей гидролиз КСБ в течение 3-х часов с использованием ферментного препарата Протозим Н в количестве 3% с последующей инактивацией фермента при 75°C в течение 20 минут и последующей лиофилизацией;

3) ФГКСБ 2 «Углич» – ферментолит КСБ, любезно предоставленный ВНИИ маслоделия и сыроделия (ВНИИМС, г. Углич, РФ);

4) ФГКСБ 3 «Ярославль» - ферментолит КСБ (НПО «Пищевые биотехнологии»,

г. Ярославль, РФ), приобретенный в интернет-магазине;

5) ФГКСБ 4 «Воронеж» - ферментолит КСБ, любезно предоставленный ПАО Молочный комбинат «Воронежский» (г. Воронеж, РФ).

Физико-химическая характеристика гидролизатов

Определение степени гидролиза белка

Степень гидролиза белка оценивали по отношению содержания аминного азота в полученном гидролизате к содержанию аминного азота в исходном белке согласно [10, с. 1257] с использованием 2,4,6-тринитробензолсульфоновой кислоты. Вычисление проводят по соотношению разницы содержания аминного азота в полученном гидролизате и исходном КСБ по калибровочной кривой относительно стандартного раствора глицина.

Оценка остаточной антигенности

Остаточную антигенность белков и гидролизатов белков молочной сыворотки определяли непрямым иммуноферментным методом [11, с. 468] с некоторыми модификациями, используя в качестве стандарта и для сенсibilизации 96-луночных плоскодонных планшет КСБ. В качестве нагрузочного белка в фосфатно-солевом буфере использовался гидролизат коллагена курицы (ООО «СОФОС ПРОТЕИН БИОТЕХНОЛОДЖИ», РФ) с содержанием 0,1%.

Определение молекулярно-массового распределения

Распределение пептидных фракций по молекулярным массам в составе образцов гидролизатов определяли посредством эксклюзионной жидкостной хроматографии высокого давления (колонка TSK GEL 2000 SWLx (0,8*30 см), «Тоуо-Сода» Япония) [12, с. 113]. Полученные в ходе анализа хроматограммы интегрировали весовым методом.

Определение аминокислотного состава

Аминокислотный состав определяли согласно ГОСТ 32195-2013 (ISO 13903:2005) «Корма, комбикорма. Метод определения содержания аминокислот». Поскольку неза-

меняемая аминокислота триптофан разрушается при кислотном гидролизе, для оценки ее содержания в образцах применяли ГОСТ 32201-2013 (ISO 13904:2005) «Корма, комбикорма. Метод определения содержания триптофана». Аминокислотный скор вычисляли по отношению содержания незаменимых аминокислот к их содержанию в эталонном белке по ФАО/ВОЗ.

Определение общего азота

Содержание общего азота в образцах КСБ, гидролизатов, корма, а также в фекалиях, собранных в конце эксперимента с животными, определяли по методу Кьельдаля [13, с. 2].

Дизайн эксперимента in vivo

Животных выращивали на базе питомника «Столбовая». Было закуплено 50 крыс-самцов отъемышей стока Wistar. Животных немедленно помещали в карантинную зону на 7 суток для акклиматизации к условиям вивария ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии». По окончании карантина измеряли массу тела животных. Для эксперимента отбирали животных с массой тела не менее 68±2 г. Всего было сформировано пять групп животных, по десять крыс в каждой. Все манипуляции и содержание животных осуществлялись согласно Национальному стандарту РФ ГОСТ Р 53434-2009.

Крыс кормили рационом, приготовленным согласно AIN93 с некоторыми модификациями [14, с. 839S]. В рационе контрольной группы белок представлен КСБ; в рационе группы Г2 белок представлен исключительно ФГКСБ 1 «Протозим Н»; группы Г3 – ФГКСБ 2 «Углич»; Г4 – ФГКСБ 3 «Ярославль»; Г5 – ФГКСБ 4 «Воронеж». Рационы подробно описаны в таблице 1.

Животные имели круглосуточный доступ к корму и воде. Каждый день оценивали количество съеденного корма по разнице между исходной порцией и остатками с учетом влажности корма. Массу тела каждого животного фиксировали один раз в неделю на весах настольных «Масса-К» МК_A11 («Масса-К», РФ). На 15 сутки жи-

вотных помещали в индивидуальные метаболические клетки на трое суток. Измеряли массу экскретированных фекалий для оценки количества потребленного азота. На 18 сутки животных умерщвляли декапитацией под легким эфирным наркозом.

На основе мониторинга прироста животных индивидуально для каждой крысы рассчитывали коэффициент эффективности белка (КЭБ) по отношению прироста массы тела животных за весь период исследования в граммах к количеству потребленного за весь экспериментальный период белка в граммах. Истинную усвояемость белка рассчитывали по стандартной формуле согласно [15, с. 4]. На следующем этапе исследования вычисляли скорректированный аминокислотный скор с учетом усвояемости белка (the protein digestibility-corrected amino acid score, PDCAAS), представляющий собой произведение аминокислотного сора исследуемого белкового образца по шкале ФАО/ВОЗ с истинной усвояемостью [16, с. 3].

Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили с использованием программного пакета IBM SPSS Statistics 20 (IBM, США). Все физико-химические исследова-

ния проводили в трех повторностях, вычисляли среднее и стандартную ошибку среднего, данные представлены как $M \pm SE$.

В исследовании с экспериментальными животными выборку проверяли на нормальность распределения по критерию Смирнова-Колмогорова (уровень значимости 0,05). При нормальном распределении расчет вели по параметрическому критерию Тьюки. Вычисляли среднее и стандартную ошибку среднего, данные представлены как $M \pm SE$. В обратном случае использовали непараметрический критерий Крускала-Уоллеса. Определяли медиану, 25% и 75% процентиля. Данные представлены как $Me [Q1; Q3]$. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

Физико-химическая характеристика гидролизатов

Исследуемые образцы КСБ и ферментативные гидролизаты ФГКСБ 1, ФГКСБ 2 и ФГКСБ 4 хорошо растворялись в воде. При растворении ФГКСБ 3 уже через 2 минуты отстаивания образовывался осадок.

В таблице 2 представлены результаты определения степени гидролиза и кратности снижения антигенности в исследуемых гидролизатах.

Таблица 1. Состав полусинтетических рационов.

Table 1. Composition of semi-synthetic diets.

Компоненты		Содержание на 100 г корма, г				
		К1	Г2	Г3	Г4	Г5
КСБ (содержание белка 72,3%)		13,9	-	-	-	-
ФГКСБ 1 «Протозим Н» (содержание белка 69,7%)		-	14,4	-	-	-
ФГКСБ 2 «Углич» (содержание белка 74,1%)		-	-	13,5	-	-
ФГКСБ 3 «Ярославль» (содержание белка 73,6%)		-	-	-	13,6	-
ФГКСБ 4 «Воронеж» (содержание белка 71,3%)		-	-	-	-	14,0
Жировая композиция	Подсолнечное масло (г)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
	Лярд (г)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Крахмал (г)		68,5	68,0	68,9	68,8	68,4
Минеральная смесь* (г)		4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
ж/р витамины* (мл)		0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
в/р витамины* (г)		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Микрокристаллическая целлюлоза		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Холин хлорид		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
L-цистеин		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Калорийность, ккал		397±4	395±4	399±4	398±4	397±4

Примечание: * - согласно АИН-93 [14, с.839S]

Таблица 2. Основные физико-химические показатели качества исследуемых гидролизатов

Table 2. Main physical and chemical quality indicators of the studied hydrolysates

Показатель	ФГКСБ 1 «Протозим Н»	ФГКСБ 2 «Углич»	ФГКСБ 3 «Ярославль»	ФГКСБ 4 «Воронеж»
Степень гидролиза, %	10,2±0,2	21,4±0,1*	16,3±24,0*. [#]	24,0±0,3*. ^{\$}
Кратность снижения антигенности	110±9	407±36*	1150±70*. [#]	3300±40*. ^{#,\$}

Примечание: различия статистически значимы по сравнению с: * – ФГКСБ 2 «Углич»,

[#] – ФГКСБ 3 «Ярославль», ^{\$} – ФГКСБ 4 «Воронеж», $p < 0,05$

Согласно полученным данным, ФГКСБ 1 «Протозим Н» обладал самой низкой степенью гидролиза и кратностью снижения антигенности, различия статистически значимы по сравнению с другими образцами ФГКСБ. ФГКСБ 2 «Углич» и ФГКСБ 4 «Воронеж» характеризовались более высокой степенью гидролиза, более 20%. При этом кратность снижения антигенности ФГКСБ 4 была статистически значима почти в три раза и выше по сравнению с остальными гидролизатами.

Крупные молекулы белка в молоке могут вызывать расстройство пищеварения или аллергические реакции [17, с. 4]. В частности, β -лактоглобулин, содержащийся в молоке, часто вызывает наиболее распространенные и тяжелые немедленные аллергические реакции [18, с. 2].

В работе [19, с. 21] исследовали реакцию детей, госпитализированных с различными диагнозами (за исключением аллергии на белки коровьего молока), на энтеральное питание на основе гидролизатов белка. Отмечено, что у детей, получавших такие смеси реже, наблюдались признаки непереносимости пищи, такие как рвота, повышенный объем желудочного содержимого, диарея, в отличие от стандартного питания.

В нашем исследовании показано, что с увеличением степени гидролиза увеличивается кратность снижения антигенности, со-

ответственно использование гидролизатов со сниженной антигенностью может быть предпочтительнее в составе специализированных продуктов для питания детей.

В таблице 3 представлены результаты оценки распределения диапазонов молекулярных масс пептидных фракций в составе исследуемых ФГКСБ.

ФГКСБ 1 «Протозим Н» характеризовался низкой долей пептидов с молекулярной массой менее 6,4 кДа, что соотносится с показателем степени гидролиза, в то время как в других гидролизатах доля пептидных фракций составляет более 70% независимо от степени гидролиза. При этом ФГКСБ 4 «Воронеж» не содержал крупных пептидных фракций с молекулярной массой выше 56,6 кДа, при этом степень снижения кратности антигенности у него была наивысшей.

Сравнительная характеристика аминокислотного состава КСБ и исследуемых ферментализованных КСБ представлена в таблице 4.

Анализ аминокислотного состава КСБ и исследуемых ФГКСБ 1 «Протозим Н» и ФГКСБ 3 «Ярославль» свидетельствует об их высокой биологической ценности, так как лимитирующие аминокислоты в их составе отсутствуют. ФГКСБ 2 «Углич» и ФГКСБ 4 «Воронеж» лимитированы по сумме ароматических аминокислот, аминокислотный скор для которых составил 98% и 85% соответственно.

Таблица 3. Распределение диапазонов молекулярных масс пептидных фракций
Table 3. Distribution of molecular weight ranges of peptide fractions

Диапазон молекулярных масс, кДа	Распределение пептидных фракций в составе гидролизата, %			
	ФГКСБ 1 «Протозим Н»	ФГКСБ 2 «Углич»	ФГКСБ 3 «Ярославль»	ФГКСБ 4 «Воронеж»
>56,6	5,4±0,5	0,9±0,1	1,4±0,1	0
56,5-6,4	46,0±0,5	25,6±0,3	24,8±0,2	27,1±0,3
<6,4	48,6±0,5	73,5±0,7	73,8±0,7	72,9±0,7

Таблица 4. Аминокислотный состав и скор КСБ и исследуемых ФГКСБ
Table 4. Amino acid composition and score of WPC and the studied FHWPC

Незаменимые аминокислоты	Аминокислотная шкала «идеального» белка (FAO/ВОЗ 2007)	Содержание аминокислот (г/100 г белка) и аминокислотный скор									
		КСБ		ФГКСБ 1 «Протозим Н»		ФГКСБ 2 «Углич»		ФГКСБ 3 «Ярославль»		ФГКСБ 4 «Воронеж»	
		А	С	А	С	А	С	А	С	А	С
Изолейцин	3,0	8,2	273	7,8	261	8,2	273	7,85	261	8,8	292
Лейцин	5,9	11,8	200	11,6	197	9,0	153	11,8	200	11,2	190
Лизин	4,5	11,5	255	11,4	253	8,0	177	11,4	254	9,7	215
Метионин + цистин	2,2	3,0	135	2,9	131	2,4	110	2,9	130	2,4	111
Фенилаланин + тирозин	3,8	3,9	104	3,9	103	3,7	98	4,0	104	3,2	85
Треонин	2,3	5,3	230	5,3	229	3,7	163	4,2	183	5,0	218
Триптофан	0,6	2,3	388	2,3	387	2,16	360	1,9	322	2,1	349
Валин	3,9	8,4	215	8,2	209	4,3	111	8,0	205	7,5	192

Примечание: А – содержание аминокислоты, г/100 г белка; С – аминокислотный скор, % относительно «идеального» белка (FAO/ВОЗ).

Результаты эксперимента in vivo

Содержание белка в рационах в рационах животных всех групп, определенное по методу Кьельдаля, составило $10,0 \pm 0,3\%$.

На рисунке 1 представлены графические данные по среднему потреблению корма крысами в сутки и динамика прироста массы тела животных за весь эксперимент.

Потребление животными ферментативного гидролизата ФГКСБ 1 «Протозим Н»

приводило к снижению аппетита (на уровне тенденции, $p=0,06$), соответственно к концу эксперимента (на 15 сутки) у них наблюдалось статистически значимое отставание в приросте массы тела. К концу эксперимента у животных, получавших ФГКСБ 2 «Углич», также наблюдалось статистически значимое отставание в приросте массы тела по сравнению с контролем независимо от потребления корма.

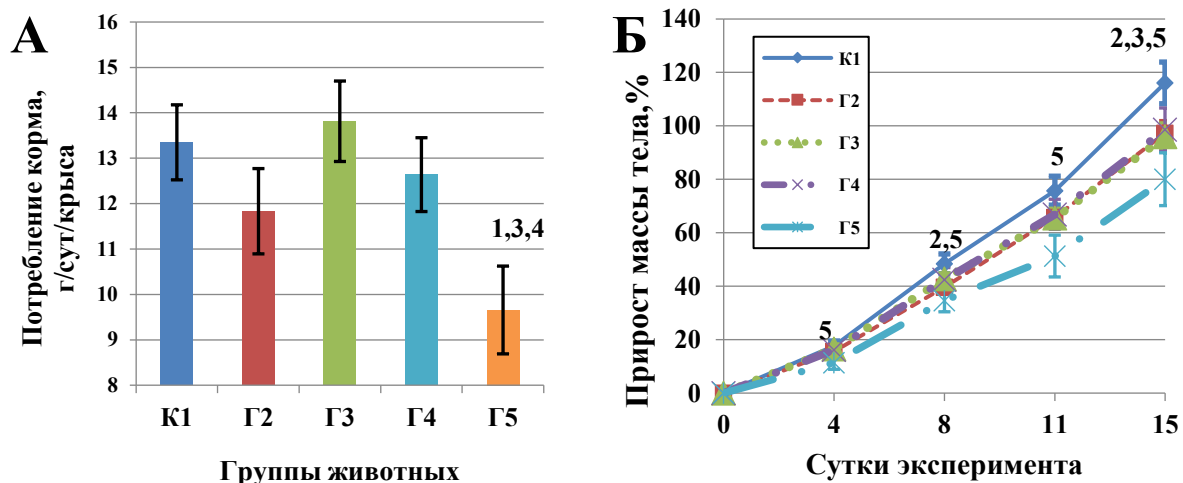


Рис. 1. Среднее суточное потребление корма, г/сут/крыса (А) и прирост массы тела, % (Б) животных

Fig. 1. Average daily feed consumption, g/day/rat (A), and body weight gain, % (B) of the animals
Примечания: различия статистически значимы по сравнению с: 1 – K1, 2 – G2, 3 – G3, 4 – G4, 5 – G5

Потребление ФГКСБ 4 «Воронеж» крысами группы Г5 было статистически значимо меньше по сравнению с контрольной группой, что приводило к отставанию в приросте массы тела, начиная с четвертых суток эксперимента.

Результаты определения КЭБ графически представлены на рисунке 2.

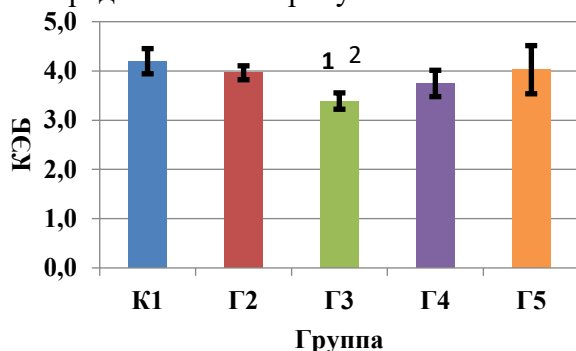


Рис. 2. Коэффициент эффективности белка

Fig. 2. Protein efficiency ratio

Примечания: 1 – различия статистически значимы по сравнению с K1, 2 – различия статистически значимы по сравнению с G2.

Статистически значимо от контрольной группы отличался КЭБ только для животных группы Г3 (на 20%), получавших в качестве основного источника белка ФГКСБ 2 «Углич», что соотносится с результатами определения потребляемости корма и прироста массы тела.

На рисунке 3 показаны результаты определения истинной усвояемости и PDCAAS.

Различий в истинной усвояемости выявлено не было. Биологическая ценность ФГКСБ 4 «Воронеж», рассчитанная с использованием PDCAAS, составила $81,6 \pm 0,3\%$, а для ФГКСБ 2 «Углич» $93,5 \pm 0,4\%$. Биологическая ценность ФГКСБ 1 «Протозим Н» и ФГКСБ 2 «Ярославль», рассчитанная с использованием PDCAAS, достоверно не отличалась от значения, полученного для КСБ.

В работе [20, с. 6] на модели клеток Сасо-2 было показано, что гидролизат сывороточных белков усваивается в два раза эффективнее по сравнению с исходным белком. В *in vitro* исследовании [21, с. 3125] гидролизаты

растительных белков, полученные гидролизом различными протеазами, обладали большей усвояемостью по сравнению с нативными белками. Полученные в нашей работе данные согласуются с *in vivo* исследованием [22, с. 3] с использованием крыс-самцов Sprague Dawley, в котором было также показано, что коэффициенты PDCAAS и DIAAS (digestible indispensable amino acid score) значительно не отличаются между гидролизатом и нативным сывороточным белком (0,92 и 1,00 для PDCAAS и 1,25 и 1,45 для DIAAS соответственно). В эксперименте [23, с. 58] на крысах-отъемышах линии Вистар было показано, что ферментативные гидролизаты сывороточных белков и казеина оказывают влияние на степень усвоения белка, прирост массы тела животных, и аминокислотный профиль сыворотки крови эквивалентен нативным белкам, подтверждая, что процесс гидролиза не влияет на аминокислотный состав и биологическую ценность белковых гидролизатов. В другом *in vivo* исследовании с использованием 32 петухов породы Белый Леггорн [24, с. 5] усвояемость незаменимых аминокислот в составе корма, где белковый компонент был полностью заменен на гидролизат куриного мяса, составляла более 80% и статистически не отличалась от усвояемости аминокислот в составе стандартного рациона. Согласно данным, представленным в работе [25, с. 1003], включение в рацион гидролизатов молочных белков не оказывает значимого влияния на состояние внутренних органов и активность протеолитических ферментов в организме.

Таким образом, на основании данных литературы и проведенных нами исследований, можно заключить, что гидролизаты белков являются оптимальным компонентом продуктов для энтерального питания, поскольку они сохраняют биологическую ценность на уровне нативного белка, имеют более высокую усвояемость, сниженную аллергенность, а также могут проявлять дополнительную биологическую эффективность благодаря наличию биологически активных пептидов в составе.

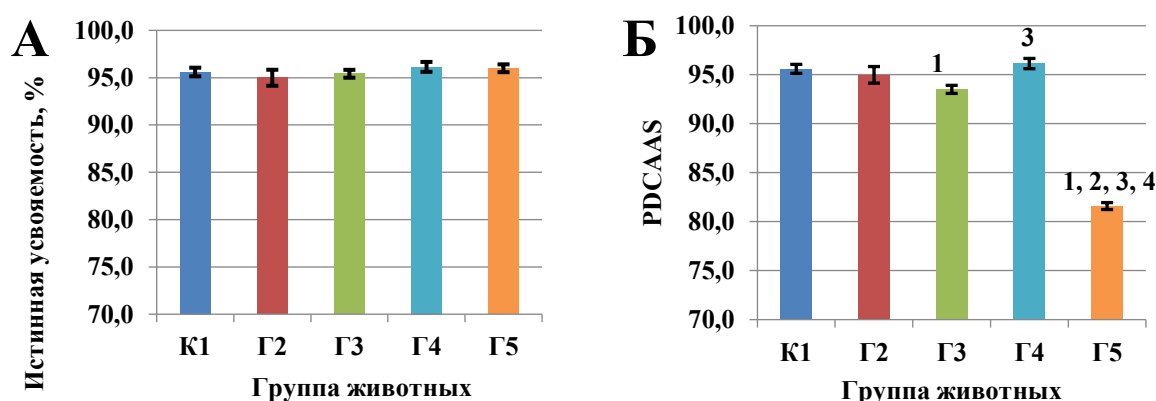


Рис. 3. Результаты определения истинной усвояемости (А) и PDCAAS (Б)

Fig. 3. The results of true digestibility determination (A) and PDCAAS (B)

Примечание: 1, 2, 3, 4 – статистически значимое отличие ($p < 0,05$) от показателя животных группы 1, 2, 3, 4.

Закключение. Соответственно, полученные результаты свидетельствуют о том, что биологическая ценность всех ферментативных гидролизатов КСБ, независимо от степени гидролиза, остается на высоком уровне – более 80%. При глубоком гидролизе лимитируют ароматические аминокислоты, что приводит к снижению биологической ценности. При этом гидролизат с высокой степенью гидролиза обладал сниженной антигенностью, что открывает перспективы его использования в составе специализированной пищевой продукции, в том числе гипоаллергенных. Ферментативный гидролизат, полученный по разработанной нами схеме, имеет ряд преимуществ и может быть успешно использован при разработке рецептур специализированных пищевых продуктов для энтерального питания в качестве единственного источника белка.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Improving enteral nutrition in patients requiring neurological intensive care unit care: A retrospective study on a novel bedside nasointestinal tube placement technique / Niuchenglin [et al.] // Nutrition in Clinical Practice. 2026. Vol. 2026. DOI: 10.1002/ncp.70106.
2. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit / Singer P. [et al.] // Clin Nutr. 2019. Vol. 38, No. 1. P. 48-79. DOI:10.1016/j.clnu.2018.08.037.
3. Semi-Elemental and Elemental Formulas for Enteral Nutrition in Infants and Children with Medical Complexity-Thinking about Cow's Milk Allergy and Beyond / Verduci E. [et al.] // Nutrients. 2021. Vol. 13, No. 12. P. 4230. DOI: 10.3390/nu1312423.
4. Milk Whey Hydrolysates as High Value-Added Natural Polymers: Functional Properties and Applications / León-López A. [et al.] // Polymers (Basel). 2022. Vol. 14, No. 6. P. 1258. DOI: 10.3390/polym14061258.
5. Enzymes for production of whey protein hydrolysates and other value-added products / Irazoqui J.M. [et al.] // Appl Microbiol Biotechnol. 2024. Vol. 108, No. 1. P. 354. DOI: 10.1007/s00253-024-13117-2.
6. A new high protein-to-energy enteral formula with a whey protein hydrolysate to achieve protein targets in critically ill patients: a prospective observational tolerability study // Tedeschi-Jockers F. [et al.] // Eur J Clin Nutr. 2022. Vol. 76, No. 3. P. 419-427. DOI: 10.1038/s41430-021-00956-9.

7. Peptide profiles and allergy-reactivity of extensive hydrolysates of milk protein / Cui Q [et al.] // Food Chem. 2023. Vol. 411. P. 135544. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135544.
8. Whey Protein Enzymatic Breakdown: Synthesis, Analysis, and Discovery of New Biologically Active Peptides in Papain-Derived Hydrolysates / Czelej M. [et al.] // Molecules. 2025. Vol. 30, No. 7. P. 1451. DOI: 10.3390/molecules30071451.
9. Glucose Management, and Muscle Protein Synthesis Properties of Fish Protein Hydrolysates and Peptides / Shekoohi N. [et al.] // J Agric Food Chem. 2024. Vol. 72, No. 39. P. 21301-21317. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c02920.
10. Adler-Nissen J. Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid // J Agric Food Chem. 1979. Vol. 27, No. 6. P. 1256-1262. DOI: 10.1021/jf60226a042.
11. Гидролизаты белков кобыльего молока. Иммунохимическая и физико-химическая характеристика / Семенова Е.С. [и др.] // Пищевые системы. 2024. Т. 7, № 3. С. 466-472. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472.
12. Модифицированный метод получения фикоцианинового концентрата биомассы *Arthrospira platensis* / Бирюлина Н.А. [и др.] // Вопросы питания. 2023. Т. 92, № 5. С. 110-116. DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-5-110-116.
13. *In vitro* study of antifungal effects of earthworm coelomic fluid obtained from *Eisenia fetida* on three opportunistic fungal pathogens / Sanaiirad S. [et al.] // Curr Med Mycol. 2025. Vol. 11. P. 1637. DOI: 10.22034/cmm.2025.345248.1637.
14. Reeves P.G. Components of the AIN-93 diets as improvements in the AIN-76A diet // J Nutr. 1997. Vol. 127, No. 5. P. 838S-841S. DOI: 10.1093/jn/127.5.838S.
15. Quantification of total endogenous nitrogen losses in broilers using a minimally invasive ¹⁵N-isotope dilution method / Habibi M.F. [et al.] // Animal. 2026. Vol. 20, No. 3. P. 101768. DOI: 10.1016/j.animal.2026.101768.
16. Genotypic influence on soybean protein quality: Linking molecular structure, functional properties, and nutritional quality through principal component and correlation analyses / Poddar S. [et al.] // Food Res Int. 2026. Vol. 232. P. 118869. DOI: 10.1016/j.foodres.2026.118869.
17. Cow's Milk Protein Allergy, a Systematic Review of Clinical Characteristics, Diagnosis, Management, and Economic Impact / Menco Contreras F. [et al.] // Diseases. 2026. Vol. 14, No. 4. P. 146. DOI: 10.3390/diseases14040146.
18. Myricetin suppresses whey protein allergenicity: *In vitro* and *in vivo* study / Yang W. [et al.] // Food Chem (Oxf). 2026. Vol. 12. P. 100380. DOI: 10.1016/j.fochms.2026.100380.
19. The use of extensively hydrolysed and amino acid feeds beyond cow's milk allergy: a national survey / Meyer R. [et al.] // J Hum Nutr Diet. 2021. Vol. 34, No. 1. P. 13-23. DOI: 10.1111/jhn.12794.
20. Characteristics and Absorption Rate of Whey Protein Hydrolysates Prepared Using Flavourzyme after Treatment with Alcalase and Protamex / Chang Y.B. [et al.] // Molecules. 2023. Vol. 28, No. 24. P. 7969. DOI: 10.3390/molecules28247969.
21. Nutritional, biological, and structural properties of bioactive peptides from bellflower, Persian-willow, and bitter-orange pollens. / Sarabandi K. [et al.] // J Food Sci. 2023. Vol. 88, No. 7. P. 3119-3133. DOI: 10.1111/1750-3841.16658.
22. Egg White Hydrolysate Retains the Nutritional Value of Proteins and Is Quickly Absorbed in Rats / Matsuoka R. [et al.] // Scientific World Journal. 2019. Vol. 2019. P. 5475302. DOI: 10.1155/2019/5475302.
23. Serum amino acid concentrations in growing rats fed intact protein versus enzymatic protein hydrolysate-based diets / Baró L. [et al.] // Biol Neonate. 1995. Vol. 68, No. 1. P. 55-61. DOI: 10.1159/000244218.
24. Standardized amino acid digestibility and protein quality in extruded canine diets containing hydrolyzed protein using a precision-fed rooster assay / Hsu C. [et al.] // J Anim Sci. 2023. Vol. 101. P. skad289. DOI: 10.1093/jas/skad289.
25. Comparison of digestibility and quality of intact proteins with their respective hydrolysates / Potier M. [et al.] // J AOAC Int. 2008. Vol. 91, No. 4. P. 1002-1005. PMID: 18727562.

REFERENCES

1. Improving enteral nutrition in patients requiring neurological intensive care unit care: A retrospective study on a novel bedside nasointestinal tube placement technique / Niuchenglin [et al.] // *Nutrition in Clinical Practice*. 2026. Vol. 2026. DOI: 10.1002/ncp.70106.
2. ESPEN guideline on clinical nutrition in the intensive care unit / Singer P. [et al.] // *Clin Nutr*. 2019. Vol. 38, No. 1. P. 48-79. DOI:10.1016/j.clnu.2018.08.037.
3. Semi-Elemental and Elemental Formulas for Enteral Nutrition in Infants and Children with Medical Complexity-Thinking about Cow's Milk Allergy and Beyond / Verduci E. [et al.] // *Nutrients*. 2021. Vol. 13, No. 12. P. 4230. DOI: 10.3390/nu1312423.
4. Milk Whey Hydrolysates as High Value-Added Natural Polymers: Functional Properties and Applications / León-López A. [et al.] // *Polymers (Basel)*. 2022. Vol. 14, No. 6. P. 1258. DOI: 10.3390/polym14061258.
5. Enzymes for production of whey protein hydrolysates and other value-added products / Irazoqui J.M. [et al.] // *Appl Microbiol Biotechnol*. 2024. Vol. 108, No. 1. P. 354. DOI: 10.1007/s00253-024-13117-2.
6. A new high protein-to-energy enteral formula with a whey protein hydrolysate to achieve protein targets in critically ill patients: a prospective observational tolerability study // Tedeschi-Jockers F. [et al.] // *Eur J Clin Nutr*. 2022. Vol. 76, No. 3. P. 419-427. DOI: 10.1038/s41430-021-00956-9.
7. Peptide profiles and allergy-reactivity of extensive hydrolysates of milk protein / Cui Q [et al.] // *Food Chem*. 2023. Vol. 411. P. 135544. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.135544.
8. Whey Protein Enzymatic Breakdown: Synthesis, Analysis, and Discovery of New Biologically Active Peptides in Papain-Derived Hydrolysates / Czelej M. [et al.] // *Molecules*. 2025. Vol. 30, No. 7. P. 1451. DOI: 10.3390/molecules30071451.
9. Glucose Management, and Muscle Protein Synthesis Properties of Fish Protein Hydrolysates and Peptides / Shekoohi N. [et al.] // *J Agric Food Chem*. 2024. Vol. 72, No. 39. P. 21301-21317. DOI: 10.1021/acs.jafc.4c02920.
10. Adler-Nissen J. Determination of the degree of hydrolysis of food protein hydrolysates by trinitrobenzenesulfonic acid // *J Agric Food Chem*. 1979. Vol. 27, No. 6. P. 1256-1262. DOI: 10.1021/jf60226a042.
11. Hydrolysates of mare milk proteins. Immunochemical and physicochemical characteristics / Semenova E.S. [et al.] // *Food systems*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 466-472. DOI: 10.21323/2618-9771-2024-7-3-466-472. [In Russ.]
12. Modified method for obtaining phycocyanin concentrate of *Arthrospira platensis* biomass / Biryulina N.A. [et al.] // *Nutrition issues*. 2023. Vol. 92, No. 5. P. 110-116. DOI: 10.33029/0042-8833-2023-92-5-110-116. [In Russ.]
13. *In vitro* study of antifungal effects of earthworm coelomic fluid obtained from *Eisenia fetida* on three opportunistic fungal pathogens / Sanaiirad S. [et al.] // *Curr Med Mycol*. 2025. Vol. 11. P. 1637. DOI: 10.22034/cmm.2025.345248.1637.
14. Reeves P.G. Components of the AIN-93 diets as improvements in the AIN-76A diet // *J Nutr*. 1997. Vol. 127, No. 5. P. 838S-841S. DOI: 10.1093/jn/127.5.838S.
15. Quantification of total endogenous nitrogen losses in broilers using a minimally invasive ¹⁵N-isotope dilution method / Habibi M.F. [et al.] // *Animal*. 2026. Vol. 20, No. 3. P. 101768. DOI: 10.1016/j.animal.2026.101768.
16. Genotypic influence on soybean protein quality: Linking molecular structure, functional properties, and nutritional quality through principal component and correlation analyses / Poddar S. [et al.] // *Food Res Int*. 2026. Vol. 232. P. 118869. DOI: 10.1016/j.foodres.2026.118869.
17. Cow's Milk Protein Allergy, a Systematic Review of Clinical Characteristics, Diagnosis, Management, and Economic Impact / Menco Contreras F. [et al.] // *Diseases*. 2026. Vol. 14, No. 4. P. 146. DOI: 10.3390/diseases14040146.
18. Myricetin suppresses whey protein allergenicity: *In vitro* and *in vivo* study / Yang W. [et al.] // *Food Chem (Oxf)*. 2026. Vol. 12. P. 100380. DOI: 10.1016/j.fochms.2026.100380.
19. The use of extensively hydrolysed and amino acid feeds beyond cow's milk allergy: a national survey / Meyer R. [et al.] // *J Hum Nutr Diet*. 2021. Vol. 34, No. 1. P. 13-23. DOI: 10.1111/jhn.12794.

20. Characteristics and Absorption Rate of Whey Protein Hydrolysates Prepared Using Flavourzyme after Treatment with Alcalase and Protamex / Chang Y.B. [et al.] // *Molecules*. 2023. Vol. 28, No. 24. P. 7969. DOI: 10.3390/molecules28247969.
21. Nutritional, biological, and structural properties of bioactive peptides from bellflower, Persian-willow, and bitter-orange pollens. / Sarabandi K. [et al.] // *J Food Sci*. 2023. Vol. 88, No. 7. P. 3119-3133. DOI: 10.1111/1750-3841.16658.
22. Egg White Hydrolysate Retains the Nutritional Value of Proteins and Is Quickly Absorbed in Rats / Matsuoka R. [et al.] // *Scientific World Journal*. 2019. Vol. 2019. P. 5475302. DOI: 10.1155/2019/5475302.
23. Serum amino acid concentrations in growing rats fed intact protein versus enzymatic protein hydrolysate-based diets / Baró L. [et al.] // *Biol Neonate*. 1995. Vol. 68, No. 1. P. 55-61. DOI: 10.1159/000244218.
24. Standardized amino acid digestibility and protein quality in extruded canine diets containing hydrolyzed protein using a precision-fed rooster assay / Hsu C. [et al.] // *J Anim Sci*. 2023. Vol. 101. P. skad289. DOI: 10.1093/jas/skad289.
25. Comparison of digestibility and quality of intact proteins with their respective hydrolysates / Potier M. [et al.] // *J AOAC Int*. 2008. Vol. 91, No. 4. P. 1002-1005. PMID: 18727562.

Информация об авторах / Information about the authors

Сидорова Юлия Сергеевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»; 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2168-2659>, e-mail: sidorovaulia28@mail.ru

Петров Никита Александрович (*корреспондирующий автор*), кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»; 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9755-6002>, e-mail: petrov-nikita-y@mail.ru

Бирюлина Надежда Александровна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»; 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-9066>, e-mail: biryulina_nadezhda@mail.ru

Зорин Сергей Николаевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»; 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2689-6098>, e-mail: zorin@ion.ru

Соколова Елена Николаевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и биологически активных добавок, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой

биотехнологии; 111033, Российская Федерация, г. Москва, ул. Самокатная, д. 4Б. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6084-7786>, e-mail: elenaniksokolova@inbox.ru

Мазо Владимир Кимович, доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории пищевых биотехнологий и специализированных продуктов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи»; 109240, Российская Федерация, г. Москва, Устьинский проезд, д. 2/14, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3237-7967>, e-mail: mazo@ion.ru

Yuliya S. Sidorova, PhD (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology and Food Safety; 109240, the Russian Federation, Moscow, 2/14. Ustinsky proezd, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2168-2659>, e-mail: sidorovaulia28@mail.ru

Nikita A. Petrov (*corresponding author*), PhD (Biology), Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology and Food Safety; 109240, the Russian Federation, Moscow, 2/14 Ustinsky proezd, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9755-6002>, e-mail: petrov-nikita-y@mail.ru

Nadezhda A. Biryulina, PhD (Biology), Junior Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology and Food Safety; 109240, the Russian Federation, Moscow, 2/14. Ustinsky proezd, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4143-9066>, e-mail: biryulina_nadezhda@mail.ru

Sergey N. Zorin, PhD (Biology), Senior Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology and Food Safety; 109240, the Russian Federation, Moscow, 2/14. Ustinsky proezd, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2689-6098>, e-mail: zorin@ion.ru

Elena N. Sokolova, PhD (Biology), Leading Researcher, Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids, and Biologically Active Additives, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology; 111033, the Russian Federation, Moscow, 4B Samokatnaya St., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6084-7786>, e-mail: elenaniksokolova@inbox.ru

Vladimir K. Mazo, Dr Sci. (Biology), Professor, Leading Researcher, Laboratory of Food Biotechnology and Specialized Products, Federal Research Centre for Nutrition, Biotechnology and Food Safety; 109240, the Russian Federation, Moscow, 2/14. Ustinsky proezd, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3237-7967>, e-mail: mazo@ion.ru

Заявленный вклад авторов

Сидорова Юлия Сергеевна, Петров Никита Александрович, Бирюлина Надежда Александровна, Зорин Сергей Николаевич, Соколова Елена Николаевна – проведение эксперимента.

Сидорова Юлия Сергеевна, Петров Никита Александрович – подбор литературных источников.

Петров Никита Александрович – оформление статьи по требованиям журнала.

Сидорова Юлия Сергеевна, Петров Никита Александрович, Бирюлина Надежда Александровна – разработка методики исследования, валидация данных.

Мазо Владимир Кимович – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Claimed contribution of the authors

Yulia S. Sidorova, Nikita A. Petrov, Nadezhda A. Biryulina, Sergey N. Zorin, Elena N. Sokolova – conducting the experiment.

Yulia S. Sidorova, Nikita A. Petrov – selection of literary sources.

Nikita A. Petrov – design of the article according to the requirements of the Journal.

Yulia S. Sidorova, Nikita A. Petrov, Nadezhda A. Biryulina – development of research methodology, data validation.

Vladimir K. Mazo – editing, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article.

Поступила в редакцию 30.04.2026

Поступила после рецензирования 28.05.2026

Принята к публикации 29.05.2026

Received 30.04.2026

Revised 28.05.2026

Accepted 29.05.2026