

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-1-63-77>

УДК 664.951:665.213:574.6



## Ферментативное выделение и исследование жира из вторичного рыбного сырья для использования в биотехнологии

О.Я. Мезенова✉<sup>1</sup>, С.В. Агафонова<sup>1</sup>, Н.О. Жила<sup>2</sup>, Н.Ю. Романенко<sup>1</sup>,  
Н.С. Калинина<sup>1</sup>, В.В. Волков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»;  
г. Калининград, Российская Федерация,  
✉mezenova@klgtu.ru

<sup>2</sup>Институт биофизики Сибирского отделения РАН;  
г. Красноярск, Российская Федерация

**Аннотация. Введение.** Жир из рыбных отходов является перспективным углеродным субстратом в микробной биотехнологии. **Целью** работы являлось исследование ферментативно выделенного из рыбных голов жира для использования в микробном синтезе в качестве источника углерода при получении продуктов биотехнологии. **Объекты и методы исследования.** Липидную фракцию извлекали из рыбных отходов консервного производства воздействием микробной протеазы Alcalase. В полученных жировых массах определяли показатели эффективности извлечения, наличие примесей и показатели гидролитической и окислительной порчи. Биологическую эффективность жиров оценивали по составу жирных кислот алкилглицеридов. **Результаты и обсуждение.** Жиры из голов копченой кильки имели небольшой разброс значений показателей качества: кислотное число 1,7-2,4 мг КОН/г жира; перекисное число 17,3-25,5 ммоль активного кислорода/кг; тиобарбитуровое число 1,36-1,56 ед. оптической плотности; анизидиновое число 21,2-24,1 у.е. Жиры из голов скумбрии характеризовались более широкими значениями показателей: кислотное число 22,7-32,9 мг КОН/г жира; перекисное число 66,3-81,43 ммоль активного кислорода/кг; тиобарбитуровое число 2,62-3,16 ед. оптической плотности; анизидиновое число 65,2-71,4 у.е. Во всех партиях жира отмечено высокое содержание полиненасыщенных жирных кислот (25,5-31,9%), кислот семейства омега 3 (24,7-25,8%), длинноцепочечных жирных кислот (28,6-51,4%). **Заключение.** Показатели качества жира, ферментативно выделенного из рыбных голов, позволили его использовать в микробной биотехнологии. В Институте биофизики Сибирского отделения РАН на данных жировых субстратах были получены биоразлагаемые полигидроксиалканоаты с высокими технологическими свойствами.

**Ключевые слова:** жир из рыбных голов, ферментативная экстракция, показатели качества жира, полиненасыщенные жирные кислоты, продукты микробной биотехнологии

**Для цитирования:** Мезенова О.Я., Агафонова С.В., Жила Н.О., Романенко Н.Ю., Калинина Н.С., Волков В.В. Ферментативное выделение и исследование жира из вторичного рыбного сырья для использования в биотехнологии. *Новые технологии / New technologies.* 2026; (1):63-77. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-1-63-77>

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-64-10007, <https://rscf.ru/project/23-64-10007/>

## Enzymatic isolation and investigation of oil from secondary fish raw materials for the use in biotechnology

O.Ya. Mezenova✉<sup>1</sup>, S.V. Agafonova<sup>1</sup>, N.O. Zhila<sup>2</sup>,  
N.Yu. Romanenko<sup>1</sup>, N.S. Kalinina<sup>1</sup>, V.V. Volkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kaliningrad State Technical University;  
Kaliningrad, the Russian Federation,  
✉mezenova@klgtu.ru

<sup>2</sup>Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences;  
Krasnoyarsk, the Russian Federation

**Abstract. Introduction.** Fish waste oil is a promising carbon substrate in microbial biotechnology. **The goal of the research** was to investigate the oil enzymatically isolated from fish heads for the use in microbial synthesis as a carbon source to obtain biotechnology products. **The objects and methods of the research.** The lipid fraction was extracted from fish canning waste by the action of the Alcalase microbial protease. The extraction efficiency, impurity presence, and hydrolytic and oxidative spoilage rates were determined in the obtained fat masses. The biological efficiency of the fats was assessed by the composition of alkylglyceride fatty acids. **The results and discussion.** Oil from smoked sprat heads had a small spread of quality indicator values: acid number 1.7-2.4 mg KOH/g fat; peroxide number 17.3-25.5 mmol active oxygen/kg; thiobarbituric number 1.36-1.56 optical density units; anisidine value of 21.2-24.1 c.u. Oil from mackerel heads were characterized by wider values of the following indicators: acid value of 22.7-32.9 mg KOH/g of fat; peroxide value of 66.3-81.43 mmol of active oxygen/kg; thiobarbituric value of 2.62-3.16 units of optical density; anisidine value of 65.2-71.4 c.u. All batches of oil were characterized by high content of polyunsaturated fatty acids (25.5-31.9%), omega 3 acids (24.7-25.8%), long-chain fatty acids (28.6-51.4%). **Conclusion.** The quality indicators of fat enzymatically isolated from fish heads allowed its use in microbial biotechnology. At the Institute of Biophysics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, biodegradable polyhydroxyalkanoates with high technological properties have been obtained using these fat substrates.

**Keywords:** fish head oil, enzymatic extraction, fat quality indicators, polyunsaturated fatty acids, microbial biotechnology products

**For citation:** Mezenova O. Ya., Agafonova S. V., Zhila N. O., Romanenko N. Yu., Kalinina N. S., Volkov V. V. Enzymatic isolation and investigation of oil from secondary fish raw materials for the use in biotechnology. *Novye tehnologii / New technologies*. 2026; (1):63-77. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2026-22-1-63-77>

**Acknowledgments.** The research was supported by grant No. 23-64-10007 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/23-64-10007/>

**Введение.** Актуальность полного использования потенциала рыбного сырья, в том числе так называемых рыбных отходов (непищевых частей, остающихся при разделке рыб на рыбоперерабатывающих производствах), отражена в ведущих стратегических документах по развитию национальной рыбной промышленности. В России при вылове в последние годы около 5 млн. тонн рыбы около 50% данной биомассы теряется в виде некондиционного

сырья и отходов, в том числе при транспортировке, первичной обработке и в процессе производства рыбной продукции [1, 2].

Все рыбные отходы (головы, кости, внутренности и др.) являются ценным жировым рыбным сырьем, так как содержат в своем составе липиды, выполняющие важные физиологические функции при жизни рыб. Их количество сильно зависит от вида рыбы и характера ткани (от 0,3% до 63,8%) [1-4]. Все рыбные жиры (тканевые и вто-

ричного сырья) содержат уникальные полиненасыщенные жирные кислоты (ПНЖК), в том числе жирные кислоты семейства омега 3 [2-5]. Спецификой рыбных жиров является их нестойкость в хранении, быстрый распад алкилглицеридов с образованием свободных жирных кислот, которые под действием кислорода воздуха в местах двойных связей образуют перекиси и гидроперекиси, деградирующие до токсичных низкомолекулярных альдегидов, кетон и оксикислот, понижая уровень качества жира до «непищевого» [3, 4]. Имеющиеся немногочисленные технологии переработки некондиционных рыбных жиров трудоемки и мало реализуемы (получение биотоплива, технических масел, свободных жирных кислот и др.) [6, 7].

В современных исследованиях обоснованы различные направления по использованию рыбных отходов, в том числе на пищевые, кормовые и технические цели [1, 2]. Однако в опубликованных работах недостаточно информации о специфических свойствах жиров из рыбных отходов, особенностях их состава, возможностях химического потенциала, зависящего от вида рыбы, ее тканей и технологий выделения. В реальности побочные ткани рыб, накапливающиеся на промышленных рыбозаводах при выработке пищевой продукции, из-за быстрой порчи не перерабатываются даже на кормовые полуфабрикаты. В лучшем случае они продаются в агрохозяйства по низким ценам, но чаще уничтожаются различными способами.

Перспективным путем утилизации жиросодержащих рыбных отходов является микробиологическая биоконверсия рыбных жиров с помощью водородокисляющих бактерий, которые способны синтезировать одноклеточные белки и ряд запасных органических соединений, включая полигидроксиалканоаты (ПГА) – биосовместимые и биоразлагаемые полимеры [8, 9]. На сегодняшний день известно более 300 видов микроорганизмов, способных к синтезу ПГА: *Azotobacter*, *Alcaligenes*,

*Bacillus*, *Nocardia*, *Methylobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Zoogloea*, *Chloroglaea*, *Haloferax*, *Chromatium*, *Rhodospirillum*. Среди автотрофных микроорганизмов наиболее изученными и эффективно окисляющими водород с образованием ПГА является бактерия *Cupriavidus necator* (*Ralstonia eutropha*). ПГА находят широкое применение при изготовлении материалов для пищевой и медицинской промышленности, предметов бытового обихода. Сдерживающим фактором в производстве ПГА является их высокая стоимость, обусловленная, прежде всего, стоимостью сырья для их производства. В основном в качестве питательного субстрата при синтезе ПГА используют глюкозу и другие углеводы, глицерин, метан, этанол, растительные масла и животные жиры, которые достаточно дорого стоят. В связи с этим применение в качестве субстрата возобновляемого и дешевого жира из вторичного рыбного сырья является рациональной альтернативой традиционным источникам. Некондиционный рыбный жир из непищевых частей рыбы может явиться новым доступным и перспективным источником углерода, востребованным в микробном синтезе биоразлагаемых полимеров нового поколения [8-11].

Преимуществом рыбных жиров, содержащихся в рыбных отходах даже пониженного качества, является их жидкая консистенция, которая отличает их от животных жиров (свиного, говяжьего и др.). Такое структурное состояние рыбных липидов обусловлено наличием повышенного количества полиненасыщенных длинноцепочечных жирных кислот (18С-22С). Именно данные кислоты являются благоприятным источником углерода, необходимым для развития автотрофных микроорганизмов, синтезирующих полигидроксиалканоаты при дефиците питательного азота. Мировой интерес к ПГА микробного происхождения связан с их высокими экологическими и технологическими свойствами – биodeградируемостью, биобезопасностью, термо-

стойкостью, прочностью, низкой кристаллическостью, пластичностью и другими характеристиками, которые обуславливают перспективу их использования в качестве альтернативы синтетическим пластикам [8-11].

Доказано, что при варьировании химических, питательных и/или ферментативных процессов микробного синтеза получаемые биополимеры могут приобретать заданные свойства, повышающие их использование в различных сферах [7, 9]. При ресурсной достаточности, экономической доступности, сырьевой возобновляемости и технологической эффективности рыбного жира представляется перспективным его получение из вторичного сырья и использование для промышленного развития данного направления биотехнологии. Позитивным итогом симбиоза рыбной и микробной биотехнологии стало бы повышение уровня эффективности рыбоперерабатывающей промышленности, приближение ее к экономике замкнутого цикла и решение экологической проблемы переработки отходов.

Калининградская область является ведущим регионом страны по производству рыбной продукции, прежде всего стерилизованных консервов. Лидером данной группы продуктов являются «Шпроты в масле», изготавливаемые из балтийской кильки, подвергающейся предварительному горячему копчению. Актуальной проблемой данного производства является удаление и аккумулирование рыбных копченых голов, содержащих фенольные, карбонильные и другие копильные ингредиенты. Такое сырье не подлежит переработке на кормовую продукцию (например, рыбную муку), так как содержит токсичные соединения, и подлежит утилизации, как правило, сжиганием. В настоящее время на 11 крупных рыбоконсервных предприятиях региона, вырабатывающих консервы «Шпроты в масле» из балтийской кильки, переработка данных отходов является большой проблемой. Они утилизируются высо-

котемпературным пиролизом как твердые бытовые отходы, по этой причине предприятия несут огромные убытки, при этом засоряется природная среда, появляются экологические проблемы [12-15].

Ежедневно в Калининградском регионе накапливается от 10 до 20 тонн голов копченой кильки. Этот огромный биологический ресурс, обладающий высоким органическим потенциалом и содержащий уникальные биологически активные вещества, в том числе рыбные липиды (8-25%), полноценные белки (15-19%), минеральные вещества (2-5%) и витамины, практически не используется, несмотря на востребованность в промышленной биотехнологии.

На рыбопромышленных предприятиях Калининградской области в повышенных масштабах образуются также отходы от производства пищевой продукции из скумбрии. Данный вид рыбы является широко распространенным объектом лова в России, она обитает во всех океанах мира [1]. Объем ее вылова на протяжении последних 10 лет составлял около 3% от всех уловов России, что объясняется обширным ареалом обитания, высокой миграционной способностью, особенностям образа жизни и хозяйственным значением данного вида рыбы. Скумбрия имеет повышенную жирность (от 9 до 16%), богата витаминами группы В, не содержит мелких костей, ее мясо нежное и вкусное. Из скумбрии изготавливают широкий ассортимент пищевой рыбной продукции, она используется для консервов, пресервов, в технологии посола, копчения, при выработке кулинарных изделий [1, 2]. Рыбопереработка скумбрии сопровождается разделкой сырья, образованием отходов, количество которых на калининградских предприятиях составляет от 500 до 1500 кг в сутки. Данное вторичное рыбное сырье является перспективным источником рыбного жира, потенциально используемого в микробном синтезе продуктов биотехнологии.

Анализ современных технологий извлечения жира из рыбных отходов, проведен-

ный в экспериментах по термической, ферментативной, комбинированной и ультразвуковой деструкции жиродержащих рыбных тканей с учетом критериев полноты извлечения и качества жира, показал наибольшую рациональность применения ферментативного способа, который позволяет экстрагировать около 80% всех содержащихся липидов [15-20]. В Институте биофизики СО РАН в лабораторных экспериментах с применением килечного и скумбриевого жира при ограниченном азотном питании биомассой бактерий *Cupriavidus necator* был синтезирован трехкомпонентный полимер, образованный мономерами 3-гидроксипропаната, 3-гидроксивалерата и 3-гидроксигексаноата при доминировании мономера 3-гидроксипропаната. Все сополимеры обладали способностью термически деградировать, имели молекулярную массу 590 - 620 кДа, высокие температуры плавления и деградации (соответственно 169-172°C и 278-285 °C) [10, 11]. На основе положительных результатов первых лабораторных экспериментов было рекомендовано их масштабировать, для чего использовать укрупненные партии рыбного жира, полученные способом ферментативной экстракции. Это позволило бы установить возможность синтеза разрушаемых «зеленых» биопластиков на промышленном оборудовании в повышенных количествах [14].

**Целью** работы являлось получение укрупненных партий жира из вторичного рыбного сырья с применением ферментативного способа экстракции и оценка уровня его качества, допустимого для обеспечения масштабирования биотехнологических исследований в Институте биофизики СО РАН по микробному синтезу биоразлагаемых пластиков при использовании рыбного жира в качестве источника углерода.

**Объекты и методы исследования.** В экспериментах использовали следующие рыбные отходы консервного производства: три партии копченых голов кильки (*Sprattus sprattus balticus*) и три партии голов скумбрии атлантической (*Scomber*

*scombrus*). В технологии извлечения жира применяли бактериальную протеазу «Alcalase», получаемую из генномодифицированного микроорганизма *Bacillus subtilis*, обладающую высокой эффективностью [21-22]. Экстракцию жира из измельченных рыбных голов проводили методом ферментативного разрушения жировых клеток при оптимизированных ранее условиях: температура рыбоводной смеси 60°C, продолжительность 60 минут; количество фермента алкалазы (% от массы сырья) 0,05% (головы копченой кильки) и 0,5% (головы скумбрии) [14, 15].

Проведение эксперимента начинали с реструктурирования сырья. К измельченной массе добавляли теплую воду с температурой 60°C при гидромодуле системы «рыба : вода», как 1 : 1, смесь тщательно перемешивали, вносили заданное количество фермента, помещали в шейкер с регулируемой температурой, где соблюдали режим ферментации. По окончании процесса биомассу нагревали для инактивации фермента до температуры 85°C, выдерживали 10 минут, затем охлаждали до 40°C, центрифугировали в течение 15 минут на аппарате Heraeus Megafuge 1.0 R при скорости вращения 3500 об./мин. для разделения дисперсии. Полученную жировую фракцию декантировали, взвешивали и исследовали.

В наработанных партиях рыбного жира определяли органолептические показатели (сенсорным методом) и уровень его качества по регламентированным и общепринятым физико-химическим характеристикам. Для оценки степени порчи жира полученные показатели сравнивали со значениями, свойственными свежим природным жирам данных видов рыб. Соответствие жира его природному качеству оценивали по числу омыления жира (ГОСТ 7636-85), характеризующему молекулярную массу жирных кислот. Степень гидролитических изменений липидов определяли по кислотному числу (ГОСТ 7636-85), показывающему содержание гидролизованных свободных жирных кислот, отщепившихся от триа-

цилглицеридов и фосфолипидов. Уровень первичного окисления жировых молекул анализировали непосредственно по значениям перекисного числа, а также косвенно по йодному числу (ГОСТ 7636-85), показывающему уменьшение количества двойных связей в молекулах жирных кислот. Дополнительно окислительный эффект оценивали по показателям анизидинового числа (ГОСТ 31756) и тиобарбитурового числа [13, 14], которые характеризуют накопление конечных низкомолекулярных продуктов окисления – альдегидов и кетонов. Нежелательное присутствие в экстрагируемых жировых фракциях воды определяли стандартными методами отгонки по ГОСТ 11812. Наличие примесей нежирового характера, нежелательных для качества жира, анализировали стандартным методом (ГОСТ 8714-2014). Содержание неомыляемых веществ (стеринов, белков, углеводов), понижающих качество жира, оценивали весовым методом по ГОСТ 7636-85. Жирнокислотный состав экстрагированных липидов устанавливали хроматографическим методом на хроматографе TRAXE GC 2000 Ultra FINNIGAN [14]. Статистическую обработку данных осуществляли общепринятыми методами на 95%-ом доверительном уровне.

**Результаты и обсуждение.** В процессе экспериментов по масштабированной ферментативной экстракции жира всего было переработано 6 партий рыбных голов и получено соответственно 6 партий рыбного жира: 3 партии жира – из голов копченой кильки и 3 партии жира – из голов скум-

брии атлантической. Общая масса жиров, выделенных из вторичного рыбного сырья, составила 10,4 л.

Органолептические свойства экстрагированных жиров существенно отличались. «Шпротный» килечный жир имел ярко-коричневый цвет, был прозрачным, его аромат и вкус имели небольшие оттенки горечи, свойственные копченостям из сельдевых рыб, без порочащих признаков. Скумбриевый жир был ярко желтым с оранжевым оттенком, непрозрачным, аромат и вкус имели явно выраженные оттенки окисленного рыбного жира.

Химический состав рыбных отходов и экстрагированных из них партий жира приведен в таблице 1.

Экспериментальные данные таблице 1 показывают, что разные партии сырья не одинаковы по химическому составу, что объясняется сезонными физиологическими колебаниями жира в развитии организма. При этом головы кильки во всех партиях более богаты жиром, чем головы скумбрии, что обусловлено природой сырья. В составе извлеченного жира в качестве примесей установлены вода (0,26-0,34%), белковые вещества (2,10-2,15%), минеральные компоненты (0,62-0,88%). Массовая доля липидной фракции в обеих партиях жира была примерно одинаковой (96,8-97,2%).

Показатели выхода и качества шести партий жира, выделенного в разное время из голов копченой кильки и голов скумбрии ферментативным методом с применением алкалазы, приведены в таблице 2.

**Таблица 1.** Содержание основных органических соединений в партиях рыбных отходов и ферментативно извлеченных жиров, % массы жира

**Table 1.** Content of main organic compounds in fish waste and enzymatically extracted oil, % of oil mass

Сырьевой источник	Вода	Белок	Жир	Минеральные вещества
Головы копченой кильки	46,7-52,2	21,4-23,9	19,2-22,1	5,8-7,3
Головы скумбрии	60,0-65,5	14,9-20,6	12,8-14,5	5,1-6,6
Жир из голов копченой кильки	0,26-0,30	2,10-2,15	97,0-97,4	0,84-0,88
Жир из голов скумбрии	0,30-0,34	2,05-2,15	96,8-97,2	0,62-0,66

**Таблица 2.** Показатели качества жира из голов копченой кильки и скумбрии  
**Table 2.** Quality indicators of oil from smoked sprat and mackerel heads

Показатель качества	Жир из голов копченой кильки			Жир из голов скумбрии		
	1 партия	2 партия	3 партия	1 партия	2 партия	3 партия
Выход жира, г/100 г сырья / % от содержания жира в сырье	18,8/ 84,8	16,7/ 81,5	15,9/ 82,8	8,9/ 69,6	10,3/ 71,0	9,6/ 70,1
Кислотное число, мг КОН/г	1,7	1,8	2,4	23,6	22,7	32,8
Перекисное число, ммоль активного кислорода/кг	25,5	17,3	18,9	72,2	66,3	81,4
Тиобарбитуровое число, ед. оптической плотности	1,49	1,36	1,56	2,87	2,62	3,16
Анизидиновое число, у.е.	23,0	21,2	24,1	68,8	65,2	71,4
Йодное число, г йода /100 г	135,5	142,2	139,2	179,3	185,8	180,4
Число омыления, мг КОН/г	186,6	183,4	193,2	200,5	196,9	203,2
Неомыляемые вещества, %	2,66	2,12	2,34	4,51	3,73	4,36
Содержание влаги, %	0,31	0,22	0,28	0,51	0,43	0,45
Содержание примесей нежирового характера, %	0,81	0,78	0,69	2,13	1,89	2,24

Полученные экспериментальные данные процесса экстракции и качества жира показывают (табл.2), что извлечение жира из голов копченой кильки во всех партиях было достаточно эффективным. Выход жира составил 15,9-18,8% от массы рыбы, что соответствовало 81,5-84,8% от его количества в сырье

По степени гидролиза жира, индикатором которого является кислотное число, липидную фракцию из голов копченой кильки можно отнести к качественному продукту, т.к. значение показателя (1,7-2,4 мг КОН/г) не превышает уровня, установленного для пищевого жира из рыб и других гидробионтов (не более 4 мг КОН/г) в ГОСТ 8714-2014 «Жир пищевой из рыбы и водных млекопитающих»). Однако перекисное число всех образцов килечного жира (17,3-25,5 ммоль активного кислорода/кг жира) значительно превышает нормативный уровень безопасности, регламентированный в Техническом регламенте Таможенного Союза 021/2011 по показателям первичного окисления (не более 10 ммоль акт. кислорода/кг). В связи с интенсивным образованием в килечном жире перекисей и гидроперекисей под действием радикального автоокисления в жировой фракции начинают накапливаться низкомолекулярные альдегиды, кетоны и другие нежелательные вещества, приводящие к понижению качества липидов. Об их росте свидетельствуют достаточно высокие

значения тиобарбитурового числа (1,36-1,56 ед. оптической плотности) и анизидинового числа (21,2-23,0 у.е.), установленные во всех образцах.

Косвенным индикатором окисления жира является его йодное число, значения которого (135,5-142,2 г йода/100 г) были недостаточно высокими относительно свежего жира кильки (150-160 г йода/100 г) [2, 3, 5]. Установленные значения йодного числа в жирах кильки показывают, что двойные связи полиненасыщенных жирных кислот уже вступили во взаимодействие с кислородом, при этом жирные кислоты несколько видоизменили свою химическую природу, что привело к уменьшению биологической ценности жира.

Число омыления жира из голов копченой кильки во всех образцах было примерно одинаковым (183,4-193,2 мг КОН/г), соответствующим природным характеристикам килечного жира, отражающим его достаточно высокую молекулярную массу [2, 3]. Показатели содержания неомыляемых веществ (2,12-2,66 %), влаги (0,22-0,31%), примесей нежирового характера (0,69-0,81%) свидетельствуют о присутствии в полученных жирах нерастворимых примесей (фосфолипиды, свободные жирные кислоты, пигменты, углеводороды и др.), воды и других «загрязнителей». Согласно ГОСТ 8714-2014, массовая доля воды и примесей нежирового характера в пищевом жире из рыб и

водных млекопитающих не должна превышать соответственно 0,5% и 0,2%. Полученные данные свидетельствуют о недостаточной чистоте данного жира, содержащего в основном примеси органического характера. Однако данный факт не является отрицательным для жира, используемого в качестве источника углерода в биотехнологии микробного синтеза [8-12].

Характеристики жира, ферментативно выделенного из 3-х партий голов скумбрии (табл. 2), показывают его индивидуальную природу, отличную от природы жира кильки, а также особенности разрушения жировых клеток под действием алкалазы. Важно, что степень экстракции липидов во всех партиях тоже была достаточно высокой: выход жира составил 69,6-71,0 % от его содержания в сырье. Однако показатели гидролиза и окисления жира скумбрии были значительно хуже, чем в килечном жире, что свидетельствует о глубоких процессах его порчи. Так, кислотное число (23,6-32,8 мг КОН/г) в 6-8 раз превысило значение, регламентированное в ГОСТ 8714-2014, свидетельствуя о значительном количестве накопившихся в жире свободных жирных кислот. Значения перекисных чисел (66,3-81,4 ммоль активного кислорода/кг) в 6-8 раз превысили установленную в ТР ТС 021/2011 норму безопасности (10 ммоль активного кислорода /кг). О развитии окислительных процессов также свидетельствуют высокие значения тиобарбитурового числа (2,62-3,16 ед. оптической плотности) и анизидинового числа (65,2-71,4 у.е.), которые показывают накопление альдегидов, кетонов, оксикислот и других вторичных продуктов окисления [2, 3].

Значения йодного числа жиров скумбрии (179,3-185,8 г йода / 100 г) свидетельствует о неплохой сохранности полиненасыщенных жирных кислот, несмотря на идущие процессы окисления [4, 6].

Пределы варьирования числа омыления в жире скумбрии (196,9-200,5 мг КОН / г) показывают достаточно высокие молекулярные массы исследованных жиров. Этот показатель является благоприятным для

микробного синтеза продуктов биотехнологии, в процессе которого желательна наличие в субстрате длинноцепочечных жирных кислот [5, 6, 7].

Исследование содержания неомыляемых веществ (3,73-4,51%) показало их высокое наличие во всех образцах скумбриевого жира, что обусловлено их повышенным присутствием в природном жире [3, 4]. По этой же причине в жирах из голов скумбрии установлено повышенное количество воды (0,43-0,51%) и примесей нежирового характера (1,89-2,24 %). Этот факт, однако, нельзя считать отрицательным при использовании жира в качестве источника углерода в синтезе продуктов биотехнологии [9-13].

В наработанных укрупненных партиях жира был проанализирован жирнокислотный состав его липидов (табл. 3).

Методами жидкостной хроматографии анализа рыбных жиров установлено (табл. 3), что по видовому составу основных жирных кислот (ЖК) они аналогичны. Это характеризует их близкую природу как рыбных жиров, и специфические отличия от животных жиров и растительных масел. Однако сравнения в содержании индивидуальных жирных кислот показывают характерные особенности выделенных липидных фракций, установленные по количественным приоритетам в содержании отдельных жирных кислот. Главной насыщенной жирной кислотой является пальмитиновая (16:0), содержащаяся в жире из голов кильки и скумбрии соответственно 25,05% и 18,66% от массы всех ЖК. Однако по количеству моноеновых жирных кислот в образцах установлено существенное различие: в килечном жире основная массовая доля приходится на олеиновую кислоту (28,1%), тогда как в скумбриевом жире данной ЖК существенно меньше (13,5%). В группу моноеновых ЖК в данном жире входят также эйкозеновая ЖК (8,5%) и в повышенном количестве докозеновая ЖК (15,9%), которых очень мало в жире из голов кильки (соответственно 1,2% и 0,4%).

**Таблица 3.** Состав жирных кислот в партиях жира, полученных ферментализом голов копченой кильки и скумбрии с применением фермента алкалаза  
**Table 3.** Composition of fatty acids in oils obtained by enzymolysis of smoked sprat and mackerel heads using the enzyme alcalase

Жирная кислота (ЖК)	Название ЖК	Жир из голов копченой кильки	Жир из голов скумбрии атлантической
14:0	миристиновая	4.35	5.46
<i>i</i> -14:0	изомиристиновая	0.31	0.13
<i>ai</i> -14:0	антиизо-миристиновая	0.40	-
15:0	пентадекановая	-	0.40
16:0	пальмитиновая	25.05	18.66
<i>i</i> -16:0	изо-пальмитиновая	-	0.16
<i>ai</i> -16:0	антиизо-пальмитиновая	0.25	-
16:0-7-CH <sub>3</sub>	7-метилпальмитиновая	0.45	0.30
16:1 $\omega$ 7	пальмитоолеиновая	0.30	0.21
16:2 $\omega$ 6	гексадекадиеновая	-	0.46
17:0	маргариновая	0.29	0.40
17:1	цис-10-гептадеценовая	0.36	0.24
18:0	стеариновая	1.48	4.89
18:1 $\omega$ 9	олеиновая	28.09	13.48
18:1 $\omega$ 7	вакценовая	2.28	2.46
18:2 $\omega$ 6	линолевая	4.95	-
18:3 $\omega$ 3	линоленовая	2.82	1.41
20:0	эйкозановая (арахиновая)	0.32	0.26
20:1 $\omega$ 9	эйкозеновая	1.19	8.49
20:2 $\omega$ 6	эйкозациеновая	0.39	0.19
20:3 $\omega$ 3 11,14,17	эйкозатриеновая	0.22	0.25
20:4 $\omega$ 6	эйкозатетраеновая	0.69	1.20
20:5 $\omega$ 3	тимнодоновая (эйкозопентаеновая)	9.08	7.73
22:0	бегеновая	0.37	-
22:1 $\omega$ 9	докозеновая	0.41	15.90
22:6 $\omega$ 3	докозогексаеновая	13.72	15.30
24:1 $\omega$ 9	нервоновая	2.24	2.03
Остальные*		1.6	0.6
$\Sigma$ насыщ. ЖК		33,50	30,80
$\Sigma$ ненасыщ. ЖК		66,50	69,20
$\Sigma$ насыщ. ЖК/ $\Sigma$ ненасыщ. ЖК		0,50	0,45
$\Sigma$ моноен. ЖК		34,90	42,60
$\Sigma$ полиен. ЖК		31,60	26,60
$\Sigma$ ПНЖК $\omega$ 3		25,84	24,69
$\Sigma$ длинноцеп. ЖК (свыше 19 атомов С)		28,63	51,35

\**i*-14:0, *ai*-14:0, *i*-16:0, *ai*-16:0, 17:1

Следует отметить, что оба жира обладают высоким потенциалом по содержанию биологически активных жирных кислот, важных для микробного синтеза биополимеров – ненасыщенных и длинноцепочечных ЖК. Основным достоинством обеих партий жира является повышенная концентрация ненасыщенных жирных кислот, содержащих минимум одну двойную связь (66,5% и 69,2% соответственно в жирах из

кильки и скумбрии). Из полученных данных видно, что в жире из голов копченой кильки содержится несколько больше полиненасыщенных жирных (ПНЖК) кислот, чем в скумбриевом (соответственно 31,6% и 26,60%), что можно объяснить эффектом присутствия в килечном жире копильных компонентов, обуславливающих антиоксидантный защитный эффект ПНЖК. Установленной отличительной особенностью

липидов скумбрии является повышенное количество длинноцепочечных жирных кислот (51,4%), что намного превышает их количество в килечном жире (28,6%) и обусловлено видовой природой данных рыб. Полученные данные согласуются с ранее установленными показателями качества жира, выделенного из других партий рыбных отходов [14]. Достоинством обоих жиров является высокая доля ЖК семейства омега 3 (в килечном и скумбриевом жирах соответственно 25,8% и 24,7%), при этом основную массу в этой группе составляет докозогексаеновая кислота (соответственно 13,7% и 15,3%), молекула которой имеет 22 углеродных атома и обладает шестью двойными связями. Эта особенность состава жиров объясняется их природным обитанием в соленых водоемах в отличие от пресноводных рыб, в жирах которых преобладает эйкозапентаеновая ЖК, также относящаяся к ЖК семейства омега 3 [1,2].

Укрупненные партии жира, полученные ферментативной экстракцией из голов копченой кильки и скумбрии атлантической, были переданы в Институт биофизики Сибирского отделения РАН для биотехнологических испытаний. На основе данного сырья в специальных микробиологических экспериментах с применением штамма *Cupriavidus necator* В-10646 был получен ряд сополимеров полигидроксиалканоатов, основными из которых являлись 3-гидроксibuтират и 4-гидроксibuтират. Изучение их физико-химических характеристик (молекулярная масса, полидисперсность, степень кристалличности, темпера-

туры плавления и термической дегградации, биоразлагаемость и др.) показало их высокие молекулярные и термодинамические свойства, соответствующие требованиям биомедицины, предъявляемым при изготовлении костно-пластических имплантов [24]. Таким образом, жир пониженного качества, получаемый ферментативно из рыбных отходов, можно считать перспективным возобновляемым и экономически доступным субстратом для изготовления биоразлагаемых «зеленых» пластиков в промышленных масштабах [10, 25].

**Выводы.** Рыбное вторичное сырье, исследованное на примере голов копченой кильки и скумбрии атлантической, является перспективным источником биологически ценного жира, который можно получать в повышенных количествах из наиболее массовых рыбных отходов рыбопереработки – голов копченой кильки (отходы шпротного производства) и скумбрии атлантической. Исследование ферментативного процесса извлечения жира из повышенного количества данного сырья показало, что применение фермента алкалаза позволяет экстрагировать жир достаточно полно – на уровне 81,5-84,8%. Качество полученных жиров, детально проанализированное по регламентированным и традиционным показателям, состав его жирных кислот, а также положительные результаты по микробному синтезу на жировых субстратах биоразлагаемых пластиков полигидроксиалканоатов свидетельствуют о высоком потенциале жиров из вторичного рыбного сырья для развития промышленной биотехнологии.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

### CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare no conflict of interests

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пищевые технологии. Технологии рыбной промышленности: энциклопедия: в 2-х ч. Ч. 1 / отв. ред. Абрамова Л.С. М.: ВНИРО, 2019. 405 с.

2. Технология жиров из водных биологических ресурсов: монография / Боева Н.П. [и др.]. М.: ВНИРО, 2016. 107 с.
3. Агафонова С.В., Мезенова О.Я., Дамбарович Л.В. Оценка безопасности и биологической ценности очищенного жира из вторичного шпротного сырья // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2023. № 4 (393). С. 123-128. DOI: 10.26297/0579-3009.2023.4.21.
4. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport / Gammone M.A. [et al.] // Nutrients. 2019. No. 11. P. 46. DOI: 10.3390/nu11010046.
5. Alfio V.G., Manzo C., Micillo R. From Fish Waste to Value: An Overview of the Sustainable Recovery of Omega-3 for Food Supplements // Molecules. 2021. Vol. 26, No. 4. P. 1002. DOI: 10.3390/molecules26041002.
6. Петров Б.Ф. Переработка отходов производства рыбных жиров в смазочную добавку // Современная наука и инновации. 2023. No. 4. P. 72-78. DOI.org/10.37493/2307-910X.2023.4.8.
7. Fish waste oil extraction using supercritical CO<sub>2</sub> extraction for biodiesel production: Mathematical, and kinetic modeling / Shalfoh E. [et al.] // Renewable Energy. 2024. Vol. 220. P. 119659. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119659.
8. Authors D.V. Thuoc V.T.M. Bioconversion of Crude Fish Oil Into Poly-3-hydroxybutyrate by *Ralstonia* sp. M91 // Anh Applied Biochemistry and Microbiology. 2021. Vol. 57, No. 2. P. 219-225.
9. Utilisation of tuna condensate waste from the canning industry as a novel substrate for polyhydroxyalkanoate production / Sangkharak K. [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. No. 11. P. 2053-2064 <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00581-4>.
10. Отходы рыбопереработки – перспективный субстрат для синтеза целевых продуктов биотехнологии / Жила Н.О. [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. 2023. Т. 16, № 3. С. 386-397.
11. Properties of degradable polyhydroxyalkanoates synthesized from newwaster fish oils (WFO) / Zhila N.O. [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24, No. 16. P. 1-18. DOI:10.3390/ijms241914919.
12. Исследование процесса выделения жира из отходов рыбопереработки в качестве сырья для биотехнологического синтеза полигидроксиалканоев / Мезенова О.Я. [и др.] // Вестник Международной академии холода. 2024. № 1. С. 50-59. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-50-59.
13. Evaluation of the balance of oils from fish by-products / Agafonova S. V. [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 689. P. 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/012027.
14. Исследование процесса ферментативного выделения жира из вторичного рыбного сырья для использования в качестве биотехнологического субстрата / Мезенова О.Я. [и др.] // Пищевые и биотехнологии. 2024. Т. 1, № 4. С. 62-73. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-78-91/.
15. Сравнительная оценка способов извлечения из вторичного рыбного сырья жира, предназначенного для синтеза продуктов биотехнологии / Мезенова О.Я. [и др.] // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 71, № 1. С. 59-71. DOI:org/10.48612/dalrybvtuz/2025-71-07.
16. Optimization of fish oil extraction from *Lophius litulon* liver and fatty acid composition analysis / Hu Z. [et al.] // Fisheries and Aquatic Sciences. 2022. Vol. 25, No. 2. P. 76-89. DOI: 10.47853/FAS.2022.e8.
17. Enzymatic hydrolysis extraction and quality assessment of fish oil from Patin catfish (*Pangasius Hypophthalmus*) / Indera N.I.M. [et al.] // Environmental Quality Management. 2024. Vol. 33, No. 3. P. 91-101. DOI: 10.1002/tqem.21994.
18. Quality Assessment of Fish Oil Obtained after Enzymatic Hydrolysis of a Mixture of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Rest Raw Material Pretreated by High Pressure / Kotsoni E. [et al.] // Marine drugs. 2024. Vol. 22, No. 6. P. 261. DOI: 10.3390/md22060261.
19. Petrov B.F., Volkova T.P. Enzymatic method for obtaining fatty acid concentrate from fish oil // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. 2022. Vol. 1052. P. 012084. DOI:10.1088/1755-1315/1052/1/012084.
20. Extraction of Proteins from Mackerel Fish Processing Waste Using Alcalase Enzyme / Ramakrishnan V.V. [etal.] // Bioprocessing & Biotechniques. 2013. No. 3(2). P. 1000130. DOI: 10.4172/2155-9821.1000130.

21. Oil extraction from *Pterygoplichthys pardalis* with Alcalase®2.4 L using Plackett-Burman experimental design / Gómez-Valdéz A.J. [et al.] // Applied Food Research. 2025. No. 5(2). P. 101226. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101226.
22. Hao Extraction of fish oil from fish heads using ultra-high pressure pre-treatment prior to enzymatic hydrolysis / Zhang Y. [et al.] // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2021. Vol. 70. P. 102670. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102670.
23. Waste Fish Oil is a Promising Substrate for Productive Synthesis of Degradable Polyhydroxyalkanoates / Kiselev E.G. [et al.] // Journal of Polymers and the Environment. 2024. Vol. 33, No. 2. P. 1022-1034. DOI: 10.1007/s10924-024-03461-9.
24. Киселев Е.Г., Демиденко А.В., Волова Т.Г. Изменение молекулярных и термических характеристик термопластичного биоразлагаемого сополимера в FDM-процессе // Пластические массы. 2025. № 3. С. 49-52. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2025-03-49-52>.
25. From Waste to Biopolymer: Synthesis of P(3HB-co-4HB) from Renewable Fish Oil / Volova T. [et al.] // Journal of Renewable Materials. 2025. Vol. 13, No. 3. P. 413-432. DOI: 10.32604/jrm.2024.058775.

## REFERENCES

1. Food Technologies. Fishing Industry Technologies: An Encyclopedia: in 2. Parts. Part 1 / Ed. by Abramova L.S. Moscow: VNIRO, 2019. 405 p. [In Russ.]
2. Technology of fats from aquatic biological resources: a monograph / Boeva N.P. [et al.]. Moscow: VNIRO, 2016. 107 p. [In Russ.]
3. Agafonova S.V., Mezenova O.Ya., Dambarovich, L.V. Assessment of the safety and biological value of purified fat from secondary sprat raw materials // News of Higher Educational Institutions. Food Technology. 2023. No. 4 (393). P. 123-128. DOI: 10.26297/0579-3009.2023.4.21. [In Russ.]
4. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport / Gammone M.A. [et al.] // Nutrients. 2019. No. 11. P. 46. DOI: 10.3390/nu11010046.
5. Alfio V.G., Manzo C., Micillo R. From Fish Waste to Value: An Overview of the Sustainable Recovery of Omega-3 for Food Supplements // Molecules. 2021. Vol. 26, No. 4. P. 1002. DOI: 10.3390/molecules26041002.
6. Petrov B.F. Processing of fish oil production waste into a lubricating additive // Modern Science and Innovation. 2023. No. 4. P. 72-78. DOI.org/10.37493/2307-910X.2023.4.8. [In Russ.]
7. Fish waste oil extraction using supercritical CO<sub>2</sub> extraction for biodiesel production: Mathematical and kinetic modeling / Shalfoh E. [et al.] // Renewable Energy. 2024. Vol. 220. P. 119659. DOI: 10.1016/j.renene.2023.119659.
8. Authors D.V. Thuoc V.T.M. Bioconversion of Crude Fish Oil Into Poly-3-hydroxybutyrate by *Ralstonia* sp. M91 // Anh Applied Biochemistry and Microbiology. 2021. Vol. 57, No. 2, P. 219–225.
9. Utilization of tuna condensate waste from the canning industry as a novel substrate for polyhydroxyalkanoate production / Sangkharak K. [et al.] // Biomass Conversion and Biorefinery. 2021. No. 11, P. 2053–2064 <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00581-4>.
10. Fish processing waste as a promising substrate for the synthesis of target biotechnology products / Zhila N.O. [et al.] // Journal of the Siberian Federal University. Series: Biology. 2023. Vol. 16, No. 3. P. 386-397. [In Russ.]
11. Properties of degradable polyhydroxyalkanoates synthesized from newwaster fish oils (WFO) / Zhila N.O. [et al.] // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24, No. 16. P. 1-18. DOI: 10.3390/ijms241914919.
12. Agafonova, S.V., Romanenko, N.Yu., Kalinina, N.S., Volkov, V.V. Study of the process of fat isolation from fish processing waste as a raw material for the biotechnological synthesis of polyhydroxyalkanoates / Mezenova O.Ya. [et al.] // Bulletin of the International Academy of Refrigeration. 2024. No. 1. P. 50-59. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-1-50-59. [In Russ.]
13. Evaluation of the balance of oils from fish by-products / Agafonova S. V. [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 689. P. 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/012027.
14. Study of the process of enzymatic extraction of oil from secondary fish raw materials for the use

as a biotechnological substrate / Mezenova O. Ya [et al.] // Food and Biotechnology. 2024. Vol. 1, No. 4. P. 62-73. DOI: 10.46845/1997-3071-2024-74-78-91/. [In Russ.]

15. Comparative assessment of methods for extracting oil from secondary fish raw materials intended for the synthesis of biotechnology products / Mezenova O. Ya. [et al.] // Scientific works of the Far Eastern Fisheries Technical University. 2025. Vol. 71, No. 1. P. 59-71. DOI: org/10.48612/dalrybvtuz/2025-71-07. [In Russ.]

16. Optimization of fish oil extraction from Lophius litulon liver and fatty acid composition analysis / Hu Z. [et al.] // Fisheries and Aquatic Sciences. 2022. Vol. 25, No. 2. P. 76-89. DOI: 10.47853/FAS.2022.e8.

17. Enzymatic hydrolysis extraction and quality assessment of fish oil from Patin catfish (*Pangasius Hypophthalmus*) / Indera N.I.M. [et al.] // Environmental Quality Management. 2024. Vol. 33, No. 3. P. 91-101. DOI: 10.1002/tqem.21994.

18. Quality Assessment of Fish Oil Obtained after Enzymatic Hydrolysis of a Mixture of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Atlantic Salmon (*Salmo salar*) Rest Raw Material Pretreated by High Pressure / Kotsoni E. [et al.] // Marine drugs. 2024. Vol. 22, No. 6. P. 261. DOI: 10.3390/md22060261.

19. Petrov B.F., Volkova T.P. Enzymatic method for obtaining fatty acid concentrate from fish oil // IOP Conference Series: Earth Environmental Science. 2022. Vol. 1052. P. 012084. DOI:10.1088/1755-1315/1052/1/012084. [In Russ.]

20. Extraction of Proteins from Mackerel Fish Processing Waste Using Alcalase Enzyme / Ramakrishnan V.V. [et al.] // Bioprocessing & Biotechniques. 2013. No. 3(2). P. 1000130. DOI: 10.4172/2155-9821.1000130.

21. Oil extraction from *Pterygoplichthys pardalis* with Alcalase®2.4 L using Plackett-Burman experimental design / Gómez-Valdéz A.J. [et al.] // Applied Food Research. 2025. No. 5 (2). P. 101226. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101226.

22. Hao Extraction of fish oil from fish heads using ultra-high pressure pre-treatment prior to enzymatic hydrolysis / Zhang Y. [et al.] // Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2021. Vol. 70. P. 102670. DOI: 10.1016/j.ifset.2021.102670.

23. Waste Fish Oil is a Promising Substrate for Productive Synthesis of Degradable Polyhydroxyalkanoates / Kiselev E.G. [et al.] // Journal of Polymers and the Environment. 2024. Vol. 33, No. 2. P. 1022-1034. DOI: 10.1007/s10924-024-03461-9.

24. Kiselev E.G., Demidenko A.V., Volova T.G. Changes in the molecular and thermal characteristics of a thermoplastic biodegradable copolymer in the FDM process // Plastics. 2025. No. 3. P. 49-52. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2025-03-49-52>. [In Russ.]

25. From Waste to Biopolymer: Synthesis of P(3HB-co-4HB) from Renewable Fish Oil / Volova T. [et al.] // Journal of Renewable Materials. 2025. Vol. 13, No. 3. P. 413-432. DOI: 10.32604/jrm.2024.058775.

### *Информация об авторах / Information about the authors*

**Мезенова Ольга Яковлевна**, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой пищевой биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»; 236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1. ORCID: 0000-0002-4716-2571, e-mail: mezenova@klgtu.ru

**Агафонова Светлана Викторовна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1. ORCID: 0000-0002-5992-414X, e-mail: svetlana.agafonova@klgtu.ru

**Жила Наталья Олеговна**, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологии новых биоматериалов, ФГБНУ Федеральный исследовательский центр Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук Обособленное подразделение Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук; 660036 Красноярск, Академгородок, 50, стр. 50, Россия, ORCID:0000-0002-6256-00258, e-mail: nzhila@mail.ru

**Романенко Наталья Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пищевой биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»; 236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1, ORCID: 0000-0002-7433-7189, e-mail: nataliya.mezenova@klgtu.ru

**Калинина Наталья Сергеевна**, заведующая лабораториями кафедры пищевой биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»; 236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1, ORCID: 0000-0003-0942-5411 5, e-mail: natalya.kalinina@klgtu.ru

**Волков Владимир Владимирович**, директор Центра передовых технологий использования белков кафедры пищевой биотехнологии, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет»; 236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1, ORCID: 0000-0001-5560-7131, e-mail: vladimir.volkov@klgtu.ru

**Olga Ya. Mezenova**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University; 236022, the Russian Federation, Kaliningrad, 1 Sovetsky Prospect, ORCID: 0000-0002-4716-2571, e-mail: mezenova@klgtu.ru

**Svetlana V. Agafonova**, PhD (Eng.), Associate Professor, the Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University; 236022, the Russian Federation, Kaliningrad, 1 Sovetsky Prospect, ORCID: 0000-0002-5992-414X, e-mail: svetlana.agafonova@klgtu.ru

**Natalia O. Zhila**, PhD (Biol.), Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Biotechnology of New Biomaterials, Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Separate Subdivision of the Institute of Biophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 660036 the Russian Federation, Krasnoyarsk, 50 Akademgorodok, building 50, ORCID:0000-0002-6256-00258, e-mail: nzhila@mail.ru

**Natalia Y. Romanenko**, PhD (Eng.), Associate Professor, the Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University; 236022, the Russian Federation, Kaliningrad, 1 Sovetsky Prospect, ORCID: 0000-0002-7433-7189, e-mail: nataliya.mezenova@klgtu.ru

**Natalia S. Kalinina**, Head of Laboratories of the Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University; 236022, the Russian Federation, Kaliningrad, 1 Sovetsky Prospect, ORCID: 0000-0003-0942-54115, e-mail: natalya.kalinina@klgtu.ru

**Vladimir V. Volkov**, Director of the Center for Advanced Protein Utilization Technologies, the Department of Food Biotechnology, Kaliningrad State Technical University; 236022,

the Russian Federation, Kaliningrad, 1 Sovetsky Prospect, ORCID: ORCID 0000-0001-5560-7131, e-mail: vladimir.volkov@klgtu.ru

#### **Заявленный вклад авторов**

Мезенова Ольга Яковлевна – разработка методики исследования, валидация данных, оформление статьи по требованиям журнала.

Агафонова Светлана Викторовна, Жила Наталья Олеговна, Калинина Наталья Сергеевна, Романенко Наталья Юрьевна, Волков Владимир Владимирович – проведение экспериментов, подбор литературных источников.

#### **Claimed contribution of the authors**

Olga Y. Mezenova – developed the research methodology, validated the data, and prepared the article according to the requirements of the Journal.

Svetlana V. Agafonova, Natalya O. Zhila, Natalya S. Kalinina, Natalya Y. Romanenko, and Vladimir V. Volkov – conducted the experiments and selected references.

Поступила в редакцию 28.12.2025

Поступила после рецензирования 02.02.2026

Принята к публикации 03.02.2026

Received 28.12.2025

Revised 02.02.2026

Accepted 03.02.2026