

Ольга Яковлевна Мезенова^{1✉}, Светлана Викторовна Агафонова²,
Наталья Олеговна Жила³, Наталья Юрьевна Романенко⁴,
Наталья Сергеевна Калинина⁵, Владимир Владимирович Волков⁶

^{1,2,4,5,6}Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия

³Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия

¹mezenova@klgtu.ru

²svetlana.agafonova@klgtu.ru

³nzhila@mail.ru

⁴nataliya.mezenova@klgtu.ru

⁵natalya.kalinina@klgtu.ru

⁶vladimir.volkov@klgtu.ru

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ФЕРМЕНТАТИВНОГО ГИДРОЛИЗА ВТОРИЧНОГО РЫБНОГО СЫРЬЯ НА СТЕПЕНЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖИРА И ЕГО СОСТАВ

Цель исследования – определить влияние режимов ферментативного гидролиза вторичного рыбного сырья на степень извлечения из него жира, состав его жирных кислот, важных для микробного синтеза продуктов биотехнологии. В качестве сырья использовали отходы рыбоперерабатывающих предприятий Калининградской области: головы кильки горячего копчения, головы скумбрии и внутренние органы судака с содержанием жира 12,8–22,4 %. Гидролиз сырья проводили с применением ферментного препарата Alcalase при варьировании температуры (50–70 °С), продолжительности (20–60 мин), дозировки фермента (0,025–0,6 %). В экспериментах степень извлечения жира составила, % содержания жира в сырье: 60,8–73,6 у кильки; 34,4–53,1 у скумбрии; 57,6–80,4 у судака. При минимальных значениях параметров гидролиза отмечен наименьший выход жира для всех видов сырья. Максимальные параметры по-разному влияли на уровень экстракции жира. Существенных различий в жирнокислотном составе жиров, полученных при различных режимах гидролиза, не обнаружено. Суммарное содержание полиненасыщенных жирных кислот во всех образцах жира было высоким: 25,0–27,1 % у кильки; 24,4–27,0 % у скумбрии; 29,5–32,5 % у судака. Максимальное содержание ПНЖК омега 3 установлено в жире кильки (22,9–23,9 %), длинноцепочечных жирных кислот – в жире скумбрии (40,7–48,5 %). С учетом степени извлечения жира и его жирнокислотного состава в качестве рациональных параметров ферментализации рыбных отходов препаратом Alcalase рекомендованы: температура 50 °С, продолжительность 60 мин, дозировка фермента 0,3 %. Анализ состава жирных кислот и опубликованных данных позволил считать извлеченные жиры благоприятным компонентом для использования в составе субстратов при микробном синтезе продуктов биотехнологии.

Ключевые слова: ферментативный гидролиз рыбного сырья, Alcalase, жирнокислотный состав, режимы гидролиза

Для цитирования: Мезенова О.Я., Агафонова С.В., Жила Н.О., и др. Влияние режимов ферментативного гидролиза вторичного рыбного сырья на степень извлечения жира и его состав // Вестник КрасГАУ. 2026. № 2. С. 269–280. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-269-280.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-64-10007.

Olga Yakovlevna Mezenova^{1✉}, Svetlana Viktorovna Agafonova², Natalya Olegovna Zhila³,
Natalya Yuryevna Romanenko⁴, Natalya Sergeevna Kalinina⁵, Vladimir Vladimirovich Volkov⁶

^{1,2,4,5,6}Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

³Institute of Biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, Russia

¹mezenova@klgtu.ru

²svetlana.agafonova@klgtu.ru

³nzhila@mail.ru

⁴nataliya.mezenova@klgtu.ru

⁵natalya.kalinina@klgtu.ru

⁶vladimir.volkov@klgtu.ru

THE EFFECT OF ENZYMATIC HYDROLYSIS MODES OF SECONDARY FISH RAW MATERIALS ON THE DEGREE OF FAT EXTRACTION AND ITS COMPOSITION

The aim of the study is to determine the influence of enzymatic hydrolysis modes of secondary fish raw materials on the degree of fat extraction from them, the composition of its fatty acids, which are important for the microbial synthesis of biotechnology products. The waste of fish processing plants in the Kaliningrad Region was used as raw materials: hot-smoked sprat heads, mackerel heads and pike-perch internal organs with a fat content of 12.8–22.4 %. Hydrolysis of the raw materials was carried out using the enzyme preparation Alcalase with varying temperature (50–70 °C), duration (20–60 min), enzyme dosage (0.025–0.6 %). In the experiments, the degree of fat extraction was, in % of the fat content in the raw materials: 60.8–73.6 for sprat; 34.4–53.1 for mackerel; 57.6–80.4 for pike-perch. At minimum values of hydrolysis parameters, the lowest fat yield was noted for all types of raw materials. The maximum parameters had different effects on the fat extraction level. No significant differences in the fatty acid composition of the fats obtained under different hydrolysis conditions were found. The total content of polyunsaturated fatty acids in all fat samples was high: 25.0–27.1 % in sprat; 24.4–27.0 % in mackerel; 29.5–32.5 % in pike-perch. The maximum content of omega-3 PUFAs was found in sprat fat (22.9–23.9 %), and long-chain fatty acids – in mackerel fat (40.7–48.5 %). Taking into account the degree of fat extraction and its fatty acid composition, the following rational parameters are recommended for enzymolysis of fish waste with Alcalase: temperature of 50 °C, duration of 60 min, enzyme dosage of 0.3 %. An analysis of the fatty acid composition and published data allowed the extracted fats to be considered a favorable component for use in substrates for microbial synthesis of biotech products.

Keywords: enzymatic hydrolysis of fish raw materials, Alcalase, fatty acid composition, hydrolysis modes

For citation: Mezenova OYa, Agafonova SV, Zhila NO, et al. The effect of enzymatic hydrolysis modes of secondary fish raw materials on the degree of fat extraction and its composition. *Bulletin of KSAU*. 2026;(2):269-280. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-269-280.

Funding: the study was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 23-64-10007.

Введение. Рыбные отходы, составляющие до 50 % перерабатываемой массы рыбы, являются ценным источником липидов, богатых длинноцепочечными полиненасыщенными жирными кислотами (ПНЖК), включая редкие эйкозапентаеновую (ЭПК, 20 : 5 ω-3) и докозагексаеновую (ДГК, 22 : 6 ω-3) кислоты. Эти соединения обладают доказанной пользой для здоровья, снижают риск сердечно-сосудистых заболеваний и когнитивных нарушений за счет интенсификации в организме синтеза противовоспалительных и рассасывающих молекул – эйкозаноидов [1, 2].

Однако из-за высокой ненасыщенности жирных кислот липиды рыб, особенно в рыбных отходах, нестабильны при хранении, быстро теряют качество и не подлежат пищевому или кормовому использованию. Такие жиры перспективно применять в биотехнологическом процессе получения биоразлагаемых пластиков и белков. В исследованиях [3–5] показана эффективность накопления биоразлагаемого полимера группы полигидроксиалканоатов в биомассе *Cupriavidus necator* на субстрате с содержанием жира из рыбных голов. Установлено,

что состав жирных кислот, наличие длинноцепочечных и полиненасыщенных жирных кислот в жирах из вторичного рыбного сырья оказывает влияние на получение микробной биомассы и соответствующих продуктов биотехнологии – белковых и биополимерных материалов [4, 5]. Получение жира из рыбных отходов для использования в качестве источника углерода в микробной биотехнологии представляется перспективным по причине доступности такого сырья и его низкой себестоимости.

Среди методов получения рыбных жиров наиболее эффективными являются влажное прессование (термическая экстракция, или вытапливание), экстракция органическими растворителями, ферментативная экстракция (enzyme-assisted extraction). Экстракция органическими растворителями позволяет извлекать максимальное количество липидов, включая свободные и запасные, однако приводит к образованию побочных токсичных отходов, к которым относится отработанный экстрагент, что создает негативную экологическую нагрузку на окружающую среду и затрудняет получение безопасных для дальнейшего использования жировых продуктов [6, 7].

Достоинством термического способа извлечения жира является экономичность, простота, безопасность процесса, отсутствие токсичных отходов. В то же время, как отмечают некоторые авторы, этот способ позволяет извлекать преимущественно запасные (резервные) липиды рыб, поэтому выход жира недостаточно высок, при этом интенсифицируется образование вторичных продуктов окисления жирных кислот. Выход жира при таком способе невысок и составляет в среднем 18,7–52 % в зависимости от вида рыбного сырья [6, 7].

Увеличить выход свободного жира из сырья и повысить его качество потенциально возможно применением современных методов липидной экстракции – ферментативным воздействием, считающимся эффективным и щадящим. Сущность ферментативного способа получения жира из жиросодержащих рыбных отходов заключается в ферментативном разрушении (растворении) в водной среде оболочек жировых клеток при щадящих температурных условиях под действием вносимых протеолитических ферментов. Ферментативная экстракция соответствует принципам «зеленой» химии за счет отсутствия токсичных растворителей, энергоэффективности (температура процесса, как прави-

ло, ниже 60 °С), возможности интеграции в существующие технологические линии [6, 7].

В связи с этим ферментативный гидролиз рассматривается как перспективная альтернатива, обеспечивающая мягкие условия процесса, высокий выход и сохранение ценных компонентов. В последние годы активно исследуются различные протеазы и липазы для экстракции липидов из различных видов рыбных отходов (головы, внутренности, костные отходы), а также из целой рыбы.

Исследователями De Oliveira et al. получен 63 %-й выход жира из замороженных голов желтоперого тунца (*Thunnus albacares*) при ферментативного гидролиза 2 %-м раствором Alcalase в объеме 2,4 л в течение 4 час [8]. Glowacz-Rozynska и соавторы получили 87,1 %-й выход жира из лососевых отходов (смесь внутренностей, голов, скелеты *Salmosalar*) с 2 %-м содержанием протеазы, при гидролизе при температуре 46 °С [9]. В работе [8] для выделения жира из голов желтоперого тунца использовали ферментные препараты протеаз животного, растительного и микробного происхождения. Наибольший выход жира (72 % от всего жира, содержащегося в сырье) отмечен при использовании растительной протеазы – папаина.

Помимо увеличения выхода жира, ферментативные методы за счет щадящих режимов не снижают содержание полиненасыщенных жирных кислот. Тем не менее стоит учитывать, что тип используемой протеазы, температура, pH гидролиза могут оказывать влияние на содержание отдельных жирных кислот в извлекаемых жирах, как это показано некоторыми исследователями. Так, Andy J. и др. проведены исследования по установлению оптимальных параметров экстракции жира из леопардового птеригоплихта (*Pterygoplichthys pardalis*) [10]. Гидролиз 2 %-м раствором Alcalase при температуре 60 °С, pH 8, в течение 234 мин позволил извлечь 44 % жира, содержащего 45,77 % насыщенных, 13,87 % мононенасыщенных и 40,36 % полиненасыщенных жирных кислот [10].

Ферментный препарат Alcalase (Novozymes, Дания) представляет собой эндопептидазу, продуцируемую бактериями *Bacillus licheniformis*. Данный фермент проявляет каталитическую активность в широком диапазоне температур (30–70 °С) и значений pH, демонстрируя высокую эффективность в процессах гидролиза белков рыбного сырья. Эта протеаза гидролизует белковые оболочки жировых клеток рыбо-

го сырья при небольших дозировках, при этом жир свободно вытекает из разрушенных структур, а количество белково-жировой эмульсии, снижающей выход свободного жира, как правило, небольшое. Высокая активность ферментного препарата позволяет осуществлять гидролиз рыбного сырья в мягких условиях с сокращением времени процесса, что способствует сохранению высоконасыщенных длинноцепочечных жирных кислот и получению рыбного жира с благоприятным жирнокислотным профилем [11, 12].

Эффективность применения алкалазы подтверждена рядом исследований. Так, при ферментативной обработке вторичного сырья балтийской сельди (*Clupea harengus membras*) был достигнут выход жира на уровне 5,3 % от массы рыбного сырья [6]. Сравнительный анализ в работе Glowacz-Rozynska A. с соавторами показал, что жир, выделенный из голов лососевых рыб (*Salmosalar*) с помощью алкалазы, в отличие от продукта, полученного методом влажного прессования, характеризуется более низкой степенью гидролитической и окислительной порчи, а также сбалансированным жирнокислотным составом [10]. Аналогичные результаты были получены при сравнении термического и ферментативного способов экстракции жира из отходов тунца (*Thunnus albacares*). Жир, экстрагированный с помощью алкалазы, характеризовался повышенным содержанием эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот. Кроме того, отмечалось увеличение выхода жира на 2 % при использовании фермента [9]. В другом исследовании гидролиз сырья сома (*Pangasius Hypophthalmus*) позволил достичь выхода жира 10,9 % при низких показателях его окислительной порчи. Жир составил 10,9 %, при этом показатели окислительной порчи жира были невысокими [13]. Гидролиз печени дальневосточного удильщика (*Lophius litulon*) позволил получить жир с высоким содержанием докозагексаеновой кислоты [8].

Таким образом, ферментативный метод обладает значительным потенциалом для переработки рыбных отходов с получением ценных липидов и их использования в качестве углеродного субстрата, благотворно влияющего на микробный синтез продуктов биотехнологии. Дальнейшие исследования должны быть направлены на масштабирование технологии и снижение себестоимости процесса.

Цель исследования – определить влияние технологических режимов ферментативного гидролиза вторичного рыбного сырья на степень извлечения из него жира, состав его жирных кислот, важных для использования в микробном синтезе продуктов биотехнологии.

Задачи: оценка химического состава вторичного рыбного сырья; определение выхода жира при его ферментативной экстракции по различным режимам; исследование жирнокислотного состава полученных образцов рыбного жира; анализ содержания наиболее важных для микробного синтеза продуктов биотехнологии жирных кислот.

Объекты и методы. Для исследования были отобраны образцы вторичного сырья, являющиеся типичными отходами рыбоперерабатывающих предприятий Калининградской области. Сырьем для извлечения жира служили: головы балтийской кильки (*Sprattus sprattus balticus*), прошедшие процесс горячего копчения, головы атлантической скумбрии (*Scomber scombrus*) и внутренние органы судака (*Sander lucioperca*). Данные субпродукты представляют значительный интерес, так как образуются в больших объемах при изготовлении копченой рыбы, консервов и пресервов и в настоящее время недостаточно эффективно используются.

Химический состав исходного сырья был исследован общепринятыми методами в соответствии с ГОСТ 7636. Определение влаги проводили высушиванием в сушильном шкафу (100–103 °С), содержание белка – методом Кьельдаля, общее количество жира – методом экстракции Сокслета с использованием диэтилового эфира в качестве растворителя. Зольность устанавливали путем сжигания навески в муфельной печи при температуре 600 °С.

Ферментативный способ извлечения жира осуществляли с применением протеолитического фермента Alcalase 2,5 L (Novozymes, Дания). Для ферментативного гидролиза испытывали различные дозировки фермента, температуру и продолжительность гидролиза, выбор которых основан на рабочем температурном диапазоне фермента, а также на предварительных экспериментах. Исследовали жиры, полученные при минимальных (А), средних (Б) и максимальных (В) параметрах гидролиза (табл. 1). Максимальные параметры были установлены, исходя из экономической целесообразности ферментативного процесса получения рыбного жира.

Режимы ферментативного гидролиза вторичного рыбного сырья при извлечении жира
Modes of enzymatic hydrolysis of fish waste during oil extraction

Комбинация режимов гидролиза	Температура, °С	Продолжительность, мин	Дозировка ферментного препарата Alcalase, %
А	30	20	0,025
Б	50	60	0,3
В	70	100	0,6

При проведении экспериментов рыбное сырье измельчали на волчке с диаметром отверстия 2,0 мм, добавляли теплую воду для формирования соотношения рыбной измельченной массы и воды 1 : 1, после чего дисперсию тщательно перемешивали для равномерного распределения воды между рыбным сырьем. К полученной рыбной суспензии добавляли определенное количество фермента, образцы помещали в шейкер лабораторный с регулируемой температурой, где выдерживали по режимам ферментации согласно плану эксперимента (см. табл. 1). По окончании процесса смесь нагревали до температуры 85 °С для инактивации фермента, выдерживали 10 минут, затем центрифугировали при скорости вращения 3800 об/мин для разделения фракций, систему охлаждали и декантировали жировую (верхнюю)

фракцию, которую взвешивали и исследовали ее жирнокислотный состав.

Для определения профиля жирных кислот в исследуемых образцах рыбных жиров был применен метод газовой хроматографии на системе TRAXE GC 2000 Ultra FINNIGAN в следующих условиях: капиллярная колонка SPTM2560 (100 м × 0,25 мм); температура испарителя 260 °С; программированный нагрев колонки от 100 до 240 °С. Идентификация компонентов основывалась на сравнении времени удерживания каждого пика с таковым для стандартных метиловых эфиров жирных кислот из коммерческого набора (Sigma-Aldrich, США).

Результаты и их обсуждение. Химический состав рыбных отходов, использованных при исследовании ферментативного способа извлечения жира, приведен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав рыбных отходов, использованных при исследовании ферментативного способа извлечения жира, %
Chemical composition of fish waste used in the study of the enzymatic method of oil extraction, %

Сырье	Вода	Белок	Жир	Минеральные вещества
Головы копченой кильки	55,4	21,2	17,4	6,0
Головы скумбрии	60,0	20,6	12,8	6,6
Внутренние органы судака	62,9	13,4	22,4	1,3

Исследование химического состава выбранных видов вторичного рыбного сырья показывает, что оно является высокоперспективным для извлечения жира ферментативным способом. Высокое содержание липидов (от 12,8 до 22,4 %) во всех видах отходов свидетельствует о значительном потенциальном выходе целевого продукта, что делает его переработку экономически обоснованной. Особенно выделяются внутренние органы судака, демонстрируя наибольшее содержание жира. Умеренное содер-

жание белка (13,4–21,2 %) и невысокая зольность (1,3–6,6 %) являются важными факторами для применения протеолитического ферментного препарата для гидролиза белковой матрицы и высвобождения липидов.

Таблица 3 демонстрирует степень извлечения жира в % от массы жира в сырье из трех видов рыбных отходов, обработанных ферментным препаратом Alcalase при параметрах, представленных в таблице 1.

Выход жира из вторичного рыбного сырья при его гидролизе ферментным препаратом Alcalase по различным режимам, % массы жира в сырье (табл. 1)
Oil yield from fish waste during its hydrolysis with the enzyme preparation Alcalase according to various regimens, % of fat mass in raw materials (table 1)

Режимы ферментативного гидролиза рыбного сырья	Вид рыбного сырья		
	Головы копченой кильки	Головы скумбрии	Внутренние органы судака
А	60,8–61,0	34,4–36,2	57,6–60,0
Б	68,2–69,0	50,0–51,6	76,8–79,5
В	71,3–73,6	50,0–53,1	75,0–80,4

Наибольшим потенциалом к извлечению жира характеризуются внутренности судака, выход существенно превышает показатели других видов сырья. Невысокий выход жира из голов скумбрии обусловлен не только низким его содержанием в этом виде рыбного сырья, но также высоким количеством образующейся белково-жировой эмульсии в процессе гидролиза, что является специфичным для данного вида сырья.

Гидролиз по режимам А показал наименьшую эффективность экстракции жира для всех типов сырья. Низкая температура и минимальная доза ферментного препарата недостаточны для глубокого расщепления белковой матрицы и высвобождения связанных липидов. В случае гидролиза голов скумбрии при этих режимах также наблюдалось усиленное образование эмульсии, затрудняющей отделение жира. Извлечение жира по режимам Б привело к значимому увеличению выхода жира по сравнению с

режимом А для всех образцов. Режим В, характеризующийся максимальными значениями всех параметров ферментализации, не показал однозначного преимущества по выходу жира. Для голов копченой кильки отмечен рост данного показателя (71,3–73,6 %), однако для голов скумбрии не наблюдалось существенного увеличения его извлечения (50,0–53,1 %). Для внутренностей судака был зафиксирован наибольший разброс данных (75,0–80,4 %), что может указывать на начало протекания нежелательных процессов изменения качества, например, окисления липидов. Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение дозировки фермента с 0,3 до 0,6 % к массе сырья не является экономически целесообразным.

В рыбных жирах, извлеченных биотехнологическим способом, исследовали содержание отдельных жирных кислот и их фракций с применением метода газовой хроматографии (табл. 4).

Жирнокислотный состав жиров, ферментативно экстрагированных из вторичного рыбного сырья по различным режимам, % от суммы жирных кислот (табл. 1)
Fatty acid composition of oils enzymatically extracted from fish waste according to various modes, % of the total of fatty acids (table 1)

Код жирной кислоты	Жир, выделенный из копченой кильки по режимам			Жир, выделенный из скумбрии по режимам			Жир, выделенный из судака по режимам		
	А	Б	В	А	Б	В	А	Б	В
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8:0	0,09	–	–	–	–	–	–	–	–
9:0	0,20	–	–	–	–	–	–	–	–
10:0	0,13	–	–	–	–	–	–	–	0,02
13:0	–	–	–	–	–	–	–	–	0,02
i-13:0	0,03	0,02	–	–	–	–	0,08	0,10	0,11
14:0	3,45	4,26	4,02	5,40	6,03	4,84	3,14	3,34	3,52
i-14:0	0,36	0,39	0,37	0,14	0,16	0,14	0,63	0,69	0,74
ai-14:0	0,21	0,14	0,12	0,05	0,05	0,06	0,24	0,27	0,28
14:1	–	–	–	–	–	–	0,19	0,25	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15:0	0,46	0,56	0,49	0,37	0,42	0,37	0,70	0,74	0,82
i-15:0	0,17	0,13	0,12	0,05	0,06	0,06	0,23	0,24	0,26
16:0	15,97	19,67	18,92	15,82	16,81	14,09	12,31	12,24	11,45
i-16:0	0,40	0,26	0,22	0,19	0,21	0,19	0,33	0,33	0,36
ai-16:0	0,61	0,54	0,59	–	–	–	0,39	0,39	0,44
16:1 ω 7	4,57	5,56	5,23	4,12	4,64	3,98	19,42	22,19	23,28
16:1	0,41	0,43	0,39	0,26	0,33	0,27	1,35	1,45	1,51
16:2 ω 6	–	0,13	0,14	0,36	0,53	0,39	0,52	0,77	0,82
16:4	–	–	–	0,12	0,29	0,13	–	–	–
17:0	0,30	0,32	0,31	0,34	0,34	0,31	0,60	0,66	0,63
17:1	0,49	0,53	0,53	0,24	0,33	0,31	0,95	1,09	1,08
18:0	5,48	5,31	5,14	4,15	3,90	3,18	1,77	0,99	1,58
18:1 ω 9	37,88	29,74	31,64	17,86	18,02	16,68	17,14	18,14	17,56
18:1 ω 7	1,87	2,11	2,06	2,59	2,46	2,50	5,54	6,24	6,37
18:2 ω 6	–	–	–	–	–	–	3,18	3,06	2,76
18:3 ω 3	1,75	2,54	2,44	1,01	1,12	0,89	2,45	3,00	2,94
18:4	1,05	1,52	1,46	3,44	3,43	2,93	0,50	0,66	0,65
20:0	0,14	0,31	0,37	0,37	0,44	0,41	–	–	–
20:1 ω 9	0,18	0,41	0,45	7,43	7,77	8,64	–	–	–
20:2 ω 6	0,09	0,34	0,36	0,20	0,21	0,23	0,19	0,11	0,08
20:4	–	0,19	0,39	0,70	0,55	0,67	0,55	0,52	0,33
20:4 ω 6	0,94	0,97	0,84	0,30	0,30	0,30	6,87	6,20	6,30
20:3	–	–	–	0,08	0,07	0,17	0,62	0,46	0,43
20:5 ω 3	6,04	6,87	6,40	6,99	6,71	7,08	4,88	5,39	5,32
22:0	–	0,12	0,17	–	–	–	–	–	–
22:1 ω 9	–	–	–	12,20	12,38	16,13	0,45	0,24	0,27
22:4	–	–	–	–	–	–	1,68	1,01	0,99
22:5	–	–	–	–	–	–	0,50	0,85	0,90
22:6 ω 3	15,09	14,52	14,37	13,81	11,14	13,63	10,51	7,93	7,95
24:1 ω 9	1,50	1,88	2,22	1,32	1,16	1,28	0,45	0,24	0,27
Σ НЖК	28,00	32,03	30,84	26,88	28,42	23,65	20,42	19,99	20,23
Σ МНЖК	46,90	40,66	42,52	46,02	47,02	49,79	45,49	49,84	50,34
Σ ПНЖК	24,96	27,08	26,40	27,01	24,35	26,42	32,45	29,96	29,47
Σ ДЦЖК	23,98	25,61	25,57	43,40	40,73	48,54	26,70	22,95	22,84
$\Sigma\omega$ 3	22,88	23,93	23,21	21,81	18,97	21,6	17,84	16,32	16,21
$\Sigma\omega$ 6	1,03	1,31	1,34	0,86	1,04	0,92	10,76	10,14	9,96
ω 3/ ω 6	22,2/1	18,3/1	17,3/1	25,3/1	18,2/1	23,5/1	1,6/1	1,6/1	1,6/1

Примечание: «–» – не обнаружено; i – изо кислота; ai – антиизо кислота; НЖК – насыщенные жирные кислоты; МНЖК – мононенасыщенные жирные кислоты; ПНЖК – полиненасыщенные жирные кислоты; ДЦЖК – длинноцепочечные жирные кислоты.

Среди насыщенных жирных кислот во всех образцах преобладали пальмитиновая (16 : 0) и миристиновая (14 : 0) кислоты. Наибольшее содержание пальмитиновой кислоты отмечено в жире кильки (до 19,67 % в режиме Б), тогда как в судаке ее уровень был ниже (11,45–12,31 %). Изомерные формы насыщенных жирных кислот (i-14 : 0, ai-14 : 0, i-15 : 0) присутствовали в небольших количествах в жире копченой кильки и скумбрии с несколько повышенным содержанием

в жире судака. Из мононенасыщенных жирных кислот (МНЖК) наиболее высокий уровень в жире копченой кильки и скумбрии отмечался для олеиновой кислоты (18 : 1 ω 9), в жире судака – для пальмитолеиновой кислоты. Во всех образцах обнаружено высокое содержание эйкозапентаеновой (20 : 5 ω 3) и докозагексаеновой (22 : 6 ω 3) кислот, их преобладание в жирах копченой кильки и скумбрии типично для морских пелагических рыб. Среди важных полиненасы-

щенных жирных кислот омега-3 во всех образцах жира обнаружена α -линоленовая кислота, в небольших количествах в жирах кильки и скумбрии и в большем количестве в жире судака. В жире судака отмечено повышенное содержание арахидоновой кислоты (20 : 4 ω 6), что отражает особенности метаболизма пресноводных рыб.

Следует отметить, что жиры копченой кильки и скумбрии характеризовались достаточно высокими соотношениями ω 3 : ω 6 (более 18) за счет преобладания полиненасыщенных жирных кислот омега-3 над омега-6. Соотношения существенно отличается от рекомендуемого соотношения для пищевых жиров (1 : 5–10), однако это показывает большой потенциал данных жиров в микробном синтезе продуктов биотехнологии. Для данного использования важно суммарное содержание длинноцепочечных жирных кислот, которые являются эффективным источником углерода при продуцировании биоразлагаемых полигидроксиалканоатов и белков [14]. Данный показатель у всех полученных жиров представлен на значительном уровне: 23,98–25,61 % (в жирах из голов копченой кильки); 40,73–48,54 % (в жирах из голов скумбрии); 22,84–26,70 % (в жирах из внутренностей судака).

Диаграммы на рисунке наглядно демонстрируют содержание и соотношения насыщенных (НЖК), мононенасыщенных (МНЖК), полиненасыщенных жирных кислот (ПНЖК) и полиненасыщенных жирных кислот омега-3 в жирах, экстрагированных ферментативным способом. Виден значительный потенциал данных жиров по высокому содержанию полиненасыщенных жирных кислот во всех образцах (24,96–32,45 %), что потенциально подтверждает рациональность их использования в микробной биотехнологии.

Анализ полученных результатов показал, что при варьировании параметров процесса ферментации рыбного сырья при использовании алкалазы значительных отличий в составе жирных кислот не наблюдается. Во всех образцах количество и соотношения жирных кислот были близкими. Так, суммарное содержание ПНЖК установлено на уровне 24,96–27,08 % для жира кильки, 24,35–27,01 % для жира скумбрии, 29,47–32,45 % для жира судака. Содержание ПНЖК ω 3 составило 22,88–23,93 % в жире копченой кильки, 18,97–21,81 % в жире скумбрии, 16,21–17,84 % в жире судака. При интенсифи-

кации процесса гидролиза сырья скумбрии и судака отмечалось уменьшение количества полиненасыщенных жирных кислот в выделяемом жире, что, очевидно, связано с активацией процессов гидролиза и окисления ненасыщенных соединений. Жир копченой кильки более устойчив к нежелательным процессам за счет присутствия компонентов копильного дыма, обладающих антиоксидантной активностью. Несколько более благоприятные значения по содержанию биологически важных ПНЖК ω 3, эйкозапентаеновой и докозагексаеновой кислот имели образцы жира копченой кильки, выделенные при средних значениях параметров гидролиза (Б), образцы жира скумбрии, экстрагированные при крайних режимах гидролиза (А и В) и образцы жира судака, полученные при минимальных параметрах гидролиза (В).

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о рациональности использования жиров, экстрагированных из жиродержащих рыбных отходов, в биотехнологических целях. В исследовании [4] сообщается, что при введении рыбного жира из рыбных отходов в состав питательных субстратов микроорганизмы *Cupriavidus necator* эффективно синтезировали ценные биоразлагаемые полимеры полигидроксиалканоаты. При этом бактериями утилизируются, прежде всего, длинноцепочечные жирные кислоты (более 20 углеродных атомов), концентрация которых в отработанной культуральной среде снижалась в десятки раз в сравнении с начальным этапом культивирования, а также полиненасыщенные жирные кислоты. Наименее активно бактерии потребляли олеиновую кислоту. Среди исследованных жиров наибольшее содержание длинноцепочечных жирных кислот отмечено в жире скумбрии (40,73–48,54 %), который также характеризовался невысоким содержанием олеиновой кислоты (16,68–18,02 %) при максимальных параметрах гидролиза. Следует отметить, что все исследованные образцы жира содержали повышенное количество полиненасыщенных жирных кислот (24,96–32,45 %) и длинноцепочечных жирных кислот (22,84–48,54 %), что позволяет их считать благоприятным источником углерода для микробного синтеза продуктов биотехнологии.

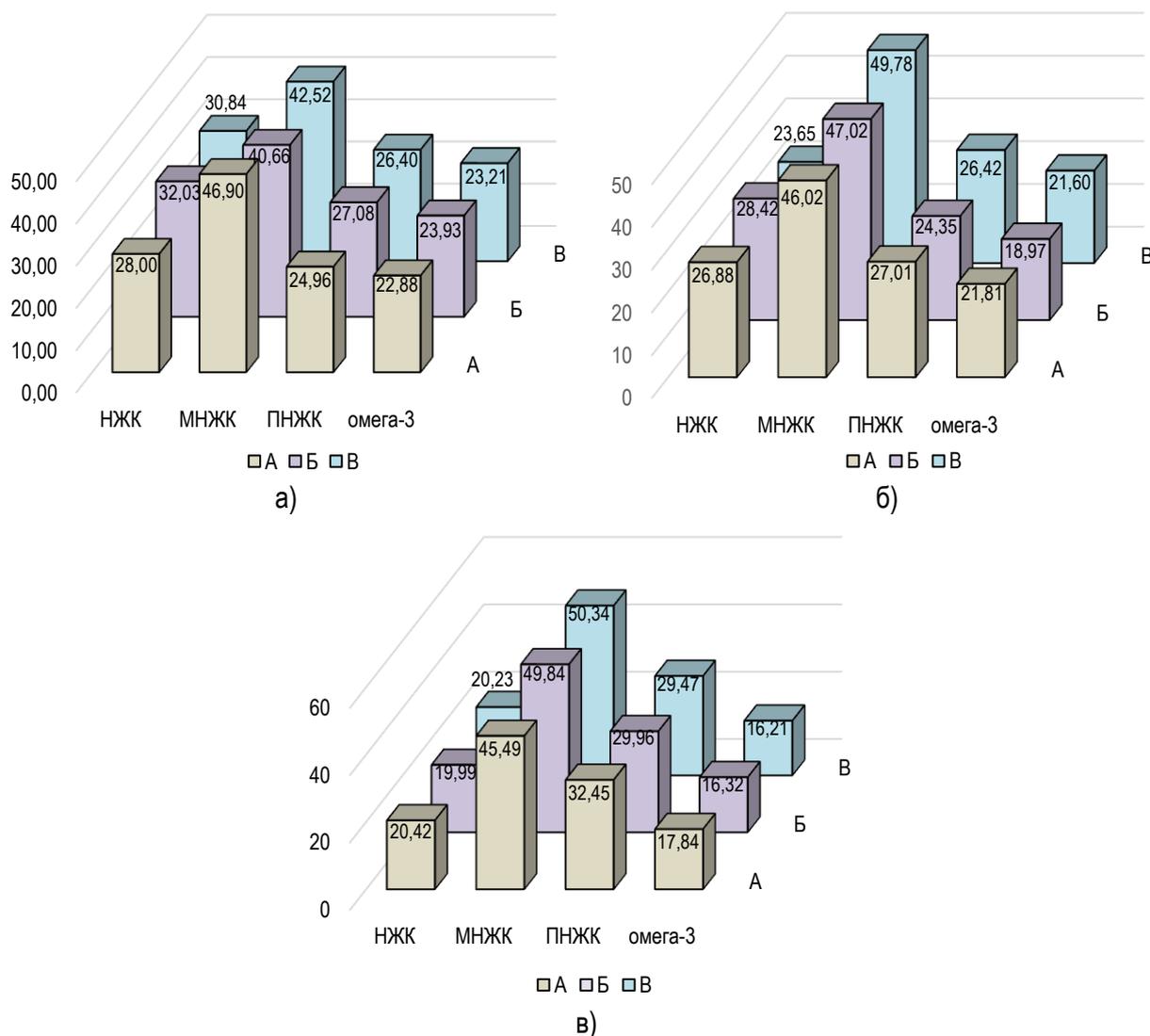


Рис. 1. Содержание различных фракций жирных кислот в жирах копченой кильки (а), скумбрии (б), судака (в), выделенных по режимам А, Б, В (табл. 1), % суммы жирных кислот
 The content of various fractions of fatty acids in the oils of smoked sprat (а), mackerel (б), zander (в), isolated according to modes А, Б, В (table 1), % of the sum of fatty acids

Закключение. Жиросодержащие рыбные отходы являются перспективным источником ценных липидов. Ферментативный гидролиз голов кильки и скумбрии, внутренних органов судака с использованием протеолитического препарата Alcalase показал эффективность получения рыбного жира по степени его извлечения (от 60,8 до 80,4 % от его содержания в сырье). Рациональными параметрами ферментализа являются температура 50 °С, продолжительность 60 мин и дозировка фермента 0,3 %, при которых обеспечивается максимальный выход жира. Варьирование режимами гидролиза не оказывают существенного влияния на жирнокислотный состав полученных жиров. Во всех образцах жира установлено высокое содержание биологически активных жирных кислот, вос-

требуемых в микробной биотехнологии. Наиболее богаты полиненасыщенными жирными кислотами, в т. ч. омега-3, и длинноцепочечными жирными кислотами жиры, извлеченные из голов кильки горячего копчения и голов скумбрии.

Ферментативная экстракция липидов из рыбных отходов является экологически безопасной альтернативой традиционным методам извлечения жира, соответствует принципам «зеленой» химии и позволяет получать жиры с благоприятным жирнокислотным профилем. Получение и использование жира из рыбных отходов в микробной биотехнологии представляются перспективным решением технологии замкнутого цикла на рыбоперерабатывающих предприятиях.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gammone M.A., Riccioni G., Parrinello G., et al. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport // *Nutrients*. 2019. Vol. 11. P. 46. DOI: 10.3390/nu11010046.
2. 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, N 4. P. 1002. DOI: 10.3390/molecules26041002.
3. Volova T., Zhila N., Sapozhnikova K., et al. From Waste to Biopolymer: Synthesis of P(3HB-co-4HB) from Renewable Fish Oil // *Journal of Renewable Materials*. 2025. Vol. 13, N 3. P. 413–432. DOI: 10.32604/jrm.2024.058775.
4. Kiselev E.G., Demidenko A.G., Zhila N.O., et al. Waste Fish Oil is a Promising Substrate for Productive Synthesis of Degradable Polyhydroxyalkanoates // *Journal of Polymers and the Environment*. 2024. Vol. 33, N 2. P. 1022–1034. DOI: 10.1007/s10924-024-03461-9.
5. Zhila N.O., Kiselev E.G., Volkov V.V., et al. Properties of Degradable Polyhydroxyalkanoates Synthesized from New Waste Fish Oils (WFOs) // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24, N 19. P. 14919. DOI: 10.3390/ijms241914919.
6. Aitta E., Marsol-Vall A., Damerou A., et al. Enzyme-Assisted Extraction of Fish Oil from Whole Fish and by-Products of Baltic Herring (*Clupea harengus membras*) // *Foods*. 2021. Vol. 10. P. 1811. DOI: 10.3390/foods10081811.
7. Aitta E., Damerou A., Marsol-Vall A., et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of fish oil from Baltic herring (*Clupea harengus membras*) with special reference to emulsion-formation, extraction efficiency, and composition of crude oil // *Food Chemistry*. 2023. Vol. 424, P. 136381. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136381.
8. Hu Z., Chin Y., Liu J., et al. Optimization of fish oil extraction from *Lophius litulon* liver and fatty acid composition analysis // *Fisheries and Aquatic Sciences*. 2022. Vol. 25, N 2. P. 76–89. DOI: 10.47853/FAS.2022.e8.
9. De Oliveira D.A.S.B., Licodiedoff S., Furigo A., et al. Enzymatic extraction of oil from yellow fin tuna (*Thunnus albacares*) by-products: a comparison with other extraction methods // *Food science and technology*. 2017. Vol. 52, N 3. P. 699–705. DOI: 10.1111/ijfs.13324.
10. Głowacz-Rozynska A., Tynek M., Malinowska-Panczyk E., et al. Comparison of oil yield and quality obtained by different extraction procedures from salmon (*Salmo salar*) processing byproducts // *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2016. Vol. 118, N 7. P. 1759–1767. DOI: 10.1002/ejlt.201500269.
11. Gómez-Valdéz A.J., Meza-Gordillo R., Abud-Archila M., et al. Oil extraction from *Pterygoplichthys pardalis* with Alcalase®2.4 L using Plackett-Burman experimental design // *Applied Food Research*. 2025. Vol. 5, N 2. P. 101226. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101226.
12. Liu Y., Dave D. Beyond processing waste: Extraction of oil from Atlantic salmon (*Salmo salar*) by-products using immobilized Alcalase on chitosan-coated magnetic nanoparticles // *Aquaculture*. 2022. Vol. 548. P. 737546. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737546.
13. Indera N.I.M., Iberahim N.I., Lutpi L.A., et al. Enzymatic hydrolysis extraction and quality assessment of fish oil from Patin catfish (*Pangasius Hypophthalmus*) // *Environmental Quality Management*. 2023. Vol. 33, N 3. P. 91–101. DOI: 10.1002/tqem.21994.
14. Agafonova S.V., Mezenova O.Y., Volkov V.V., et al. Evaluation of the balance of oils from fish by-products. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 689. P. 012027. DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/012027.

References

1. Gammone MA, Riccioni G, Parrinello G, et al. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport. *Nutrients*. 2019;11:46. DOI: 10.3390/nu11010046.
2. Alfio VG, Manzo C, Micillo R. From Fish Waste to Value: An Overview of the Sustainable Recovery of Omega-3 for Food Supplements. *Molecules*. 2021;26(4):1002. DOI: 10.3390/molecules26041002.
3. Volova T, Zhila N, Sapozhnikova K, et al. From Waste to Biopolymer: Synthesis of P(3HB-co-4HB) from Renewable Fish Oil. *Journal of Renewable Materials*. 2025;13(3):413-432. DOI: 10.32604/jrm.2024.058775.
4. Kiselev EG, Demidenko AG, Zhila NO, et al. Waste Fish Oil is a Promising Substrate for Productive Synthesis of Degradable Polyhydroxyalkanoates. *Journal of Polymers and the Environment*. 2024;33(2):1022-1034. DOI: 10.1007/s10924-024-03461-9.
5. Zhila NO, Kiselev EG, Volkov VV, et al. Properties of Degradable Polyhydroxyalkanoates Synthesized from New Waste Fish Oils (WFOs). *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(19):14919. DOI: 10.3390/ijms241914919.
6. Aitta E, Marsol-Vall A, Damerau A, et al. Enzyme-Assisted Extraction of Fish Oil from Whole Fish and by-Products of Baltic Herring (*Clupea harengus membras*). *Foods*. 2021;10:1811. DOI: 10.3390/foods10081811.
7. Aitta E, Damerau A, Marsol-Vall A, et al. Enzyme-assisted aqueous extraction of fish oil from Baltic herring (*Clupea harengus membras*) with special reference to emulsion-formation, extraction efficiency, and composition of crude oil. *Food Chemistry*. 2023;424:136381. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.136381.
8. Hu Z, Chin Y, Liu J, et al. Optimization of fish oil extraction from *Lophius litulon* liver and fatty acid composition analysis // *Fisheries and Aquatic Sciences*. 2022;25(2):76-89. DOI: 10.47853/FAS.2022.e8.
9. De Oliveira DASB, Licodiedoff S, Furigo A, et al. Enzymatic extraction of oil from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) by-products: a comparison with other extraction methods. *Food science and technology*. 2017;52(3):699-705. DOI: 10.1111/ijfs.13324.
10. Glowacz-Rozynska A, Tynek M, Malinowska-Panczyk E, et al. Comparison of oil yield and quality obtained by different extraction procedures from salmon (*Salmo salar*) processing byproducts. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 2016;118(7):1759-1767. DOI: 10.1002/ejlt.201500269.
11. Gómez-Valdéz AJ, Meza-Gordillo R, Abud-Archila M, et al. Oil extraction from *Pterygoplichthys pardalis* with Alcalase®2.4 L using Plackett-Burman experimental design. *Applied Food Research*. 2025;5(2):101226. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101226.
12. Liu Y, Dave D. Beyond processing waste: Extraction of oil from Atlantic salmon (*Salmo salar*) by-products using immobilized Alcalase on chitosan-coated magnetic nanoparticles. *Aquaculture*. 2022;548:737546. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2021.737546.
13. Indera NIM, Iberahim NI, Lutpi LA, et al. Enzymatic hydrolysis extraction and quality assessment of fish oil from Patin catfish (*Pangasius Hypophthalmus*). *Environmental Quality Management*. 2023;33(3):91-101. DOI: 10.1002/tqem.21994.
14. Agafonova SV, Mezenova OY, Volkov VV, et al. Evaluation of the balance of oils from fish by-products. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;689:012027. DOI: 10.1088/1755-1315/689/1/012027.

Статья принята к публикации 12.01.2026 / The article accepted for publication 12.01.2026.

Информация об авторах:

Ольга Яковлевна Мезенова, заведующая кафедрой пищевой биотехнологии, доктор технических наук, профессор

Светлана Викторовна Агафонова, доцент кафедры пищевой биотехнологии, кандидат технических наук, доцент

Наталья Олеговна Жила, старший научный сотрудник лаборатории биотехнологии новых биоматериалов, кандидат биологических наук, доцент

Наталья Юрьевна Романенко, доцент кафедры пищевой биотехнологии, кандидат технических наук, доцент

Наталья Сергеевна Калинина, заведующая лабораториями кафедры пищевой биотехнологии

Владимир Владимирович Волков, директор Центра передовых технологий использования белков кафедры пищевой биотехнологии

Information about the authors:

Olga Yakovlevna Mezenova, Head of the Food Biotechnology Department, Doctor of Technical Sciences, Professor

Svetlana Viktorovna Agafonova, Associate Professor at the Food Biotechnology Department, Candidate of Technical Sciences, Docent

Natalya Olegovna Zhila, Senior Researcher at the Laboratory of Biotechnology of New Biomaterials, Candidate of Biological Sciences, Docent

Natalya Yuryevna Romanenko, Associate Professor at the Food Biotechnology Department, Candidate of Technical Sciences, Docent

Natalya Sergeevna Kalinina, Head of Laboratories of the Food Biotechnology Department

Vladimir Vladimirovich Volkov, Director of the Center for Advanced Protein Utilization Technologies of the Food Biotechnology Department

