



Связь спектральных характеристик с уровнем антирадикальной активности у пищевых ингредиентов и компонентов кормов для аквакультуры

<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-93-99>
EDN: HTIZDS

Научная статья УДК 543.421/.424

Горбачев Виктор Валерьевич – кандидат биологических наук, Исследователь, старший научный сотрудник Лаборатория аквакультуры, ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» Санкт-Петербургский филиал «ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: genetic2@yandex.ru, *ORCID:* 0000-0003-2737-8604

Смирнов Андрей Анатольевич – доктор биологических наук, доцент, Главный научный сотрудник отдела морских рыб Дальнего Востока, Государственный научный центр РФ ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии («ВНИРО»); профессор кафедры ихтиологии Дагестанский государственный университет (ДГУ); ведущий научный сотрудник лаборатории химико-биологических исследований Сахалинский государственный университет (СахГУ), Москва, Россия
E-mail: asmirnov@vniro.ru, *ORCID:* 0009-0003-4940-6175

Беляева Марина Александровна – доктор технических наук, профессор кафедры пищевых технологий и биоинженерии, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, Москва, Россия
E-mail: Belyaeva.MA@rea.ru

Лютиков Анатолий Анатольевич – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории аквакультуры ГНЦ РФ ФГБНУ ВНИРО Санкт-Петербургский филиал «ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга», Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lyutikov@niorh.vniro.ru, *ORCID:* 0000-0003-0418-8218

Суслов Дмитрий Викторович – аспирант, заведующий лабораторией кадастровой оценки, Аграрно-технологический институт РУДН, Российский университет дружбы народов, Государственный университет по землеустройству, Москва, Россия
E-mail: dmitrij.viktorovich.2000@mail.ru, *ORCID:* 0009-0003-2344-224X

Адреса:

1. Санкт-Петербургский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга) – Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, ул. Набережная Макарова, д. 26
2. Государственный научный центр Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» – Россия, 105187, г. Москва, Окружной проезд, 19
3. Дагестанский государственный университет – Россия, 367025, г. Махачкала, ул. Гаджиева, д. 43а
4. Сахалинский государственный университет – Россия, 693000, г. Южно-Сахалинск, ул. Ленина, д. 290;
5. Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова – 115054, г. Москва, Стремянный переулок, д.36;
6. Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы – Россия, 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Аннотация. В работе приводятся данные по оценке и поиску спектральных характеристик среднего ИК-диапазона, с применением методов хемотретического анализа, в контексте поиска диагностически ассоциированных участков спектров, коррелирующих со значениями повышенной антирадикальной активности для пищевых компонентов и ингредиентов, применяемых при производстве кормов в аквакультуре. В исследование вошли как достаточно часто применяемые пищевые добавки, такие как токоферол (витамин Е), так и гидроколлоиды: гуммиарабик (Е414), гуаровая (Е412), конжаковая (Е425) камеди, структурообразователи, выделяемые из пищевых видов водорослей: агар-агар (Е406), альгинат (Е401), κ -, λ -, ι - каррагинаны (Е407). Для каждого из изученных групп соединений, помимо его спектральных ИК характеристик, проводился анализ на определение антирадикальной активности, которая измерялась фотоколориметрически с применением стойкого радикала DPPH. Представленные данные весьма актуальны для разработки математической модели, позволяющей проводить экспресс тестирование пищевых компонентов, продуктов питания, готовых кормов для аквакультуры, на предмет оценки их антирадикальной активности, а в перспективе – и их сроков хранения.

Ключевые слова: ИК-Фурье спектроскопия, антирадикальная активность, гидроколлоиды, пищевые ингредиенты, корма для аквакультуры, спектральные характеристики, DPPH

Для цитирования: Горбачев В.В., Смирнов А.А., Беляева М.А., Лютиков А.А., Суслов Д.В.

Связь спектральных характеристик с уровнем антирадикальной активности у пищевых ингредиентов и компонентов кормов для аквакультуры // Рыбное хозяйство. 2026. № 3. С. 93-99.

<https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-93-99>

CHEMOMETRIC SEARCH FOR IR SPECTRAL CHARACTERISTICS ASSOCIATED WITH THE LEVEL OF ANTIRADICAL ACTIVITY OF FOOD INGREDIENTS AND FEED FOR AQUACULTURE

Viktor V. Gorbachev – Candidate of Biological Sciences, Researcher, Senior Researcher Laboratory of Aquaculture, Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO St. Petersburg Branch of GosNIORH named after L.S. Berg, St. Petersburg, Russia

Andrey A. Smirnov – Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of the Marine Fish Department of the Far East, State Science Center of the Russian Federation Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO); Professor of Ichthyology Department Dagestan State University (DSU); Leading Researcher at the Laboratory of Chemical and Biological Research Sakhalin State University (SAKHGU), Moscow, Russia

Marina A. Belyaeva – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Food Technology and Bioengineering, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia

Anatoly A. Lyutikov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Aquaculture of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO St. Petersburg Branch of GosNIORH named after L.S. Berg, St. Petersburg, Russia

Dmitry V. Suslov – Postgraduate Student, Head of the Cadastral Assessment Laboratory, RUDN Agricultural and Technological Institute, Peoples' Friendship University of Russia, State University of Land Management, Moscow, Russia

Addresses:

1. St. Petersburg branch of the Scientific Research Center of the Russian Federation VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution (GosNIORH named after L.S. Berg) – Russia, 199053, St. Petersburg, Embankment Makarova Street, 26
2. The State Scientific Center of the Russian Federation Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO) – Russia, 105187, Moscow, Okruzhnoy Proezd, 19
3. Dagestan State University – Russia, 367025, Makhachkala, Gadzhieva str., 43a
4. Sakhalin State University – Russia, 693000, Yuzhno-Sakhalinsk, Lenin St., 290
5. Plekhanov Russian University of Economics – Russia, 115054 Moscow, Stremyanny Lane, 36
6. Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia – Russia, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str., 6

Annotation. The paper provides data on the assessment and search of spectral characteristics of the mid-IR range using chemometric analysis methods, as well as the search for diagnostically associated spectral regions that statistically correlate with the values of increased antiradical activity for food components and ingredients used in the production of feed in aquaculture. The study included such commonly used food additives as tocopherol (vitamin E), ascorbic acid, as well as hydrocolloids: gum arabic (E414), guar gum (E412), konjac gum (E425), structure-forming agents isolated from edible algae species: agar-agar (E406), alginate (E401), κ -, λ -, ι -carrageenans (E407). For each of the studied groups of compounds, in addition to its spectral IR characteristics, an analysis was performed to determine the antiradical activity, which was measured photocolorimetrically by using the stable radical DPPH. The presented data are very relevant for the development of a mathematical model that allows rapid testing of food components, food products, and ready-made feeds for aquaculture in order to assess their antiradical activity and, in the future, their shelf life.

Keywords: IR-Fourier spectrometry, antiradical activity, hydrocolloids, food ingredients, aquaculture feed, spectral characteristics, DPPH

For citation: Gorbachev V.V., Smirnov A.A., Belyaeva M.A., Lyutikov A.A., Suslov D.V. 2026. Chemometric search for IR spectral characteristics associated with the level of antiradical activity of food ingredients and feed for aquaculture // Fisheries. No. 3. Pp. 93-99. <https://doi.org/10.36038/0131-6184-2026-3-93-99>

Рисунок и таблица – авторские / The drawing and table were made by the author

ВВЕДЕНИЕ

Гидроколлоиды, как и специализированные пищевые компоненты, занимают значимое положение в современной технологии производства продуктов питания и кормов для аквакультуры [1; 2; 3]. Гидроколлоиды – группа сложных высокополимерных веществ, обычно выделяемых из пищевого сырья и обладающих важными технологическими и химико-физическими свойствами: способностью к гелеобразованию, загущению и стабилизации пищевых систем и отдельных пищевых, функциональных или лекарственных компонентов в образуемом ими матриксе. Таким образом, они выступают как multifunctional ингредиенты, формирующие структуру, стабильность и физико-химические свойства конечного продукта [1; 2].

Если в пищевой промышленности на первый план исторически выходили свойства гидроколлоидов как структурообразователей, то, по мере накопления современных данных, возросла роль пищевых компонентов, способных проявлять антирадикальные свойства [4].

С момента формулирования теории свободно-радикального старения были накоплены данные, демонстрирующие, что при контакте с атмосферным воздухом, как и при наличии сложных многокомпонентных химических систем (которыми являются пищевые продукты, корма и т.д.), инициируется появление свободных радикалов, что сказывается на сроках хранения, скорости прогоркания липидных

компонентов, органолептических свойствах, остаточной активности витаминов и т.д. [5]. Более того, тема связи свободных радикалов также актуальна как профилактическая мера, так как накоплены множественные данные о негативной роли радикальных частиц при состояниях стресса, болезни у человека и животных, в том числе в связи с изменениями эколого-климатических условий (переохлаждения или перегрев и т.д.) и логистических трудностей (условия перевозки грузов, дополнительные сроки хранения) [4].

Как обсуждалось нами ранее, антирадикальные свойства сводятся к трем механизмам взаимодействия пищевого матрикса со свободно-радикальными частицами, и включают в себя как способность выступать в роли молекулярного барьера, так и элиминировать возникающие цепные свободно-радикальные реакции («радикальные ловушки») [6]. Не маловажной при этом является способность хелатировать ионы с переменной валентностью, которые могут содержаться в пищевой системе, что особенно актуально в связи с тем, что даже часто применяемые в аквакультуре антиоксиданты типа астаксантина или аскорбиновой кислоты при определенных условиях могут проявлять прооксидативный эффект и ускорять окисление [7; 8].

Исследования в этой области критически важны и для создания и разработки рецептур новых кормов для аквакультуры, и для пище-

вой промышленности в целом, особенно если речь идет о продукции, которая подвержена порче из-за окисления липидов и потенциально способна ухудшить физиологические состояния потребителей [1; 4; 5].

Весьма примечательна эта группа соединений и с точки зрения ее возможности для использования в технологиях микро- и нано-капсуляции, что позволяет с одной стороны дифференцировать в пищевых системах компоненты, способные к химическим взаимодействиям, а с другой – увеличивать сроки хранения и разработки технологии таргетированной доставки в организм человека или животных необходимых пластических компонентов, вакцин, препаратов и т.д.

Немаловажным аспектом, определяющим выбор гидроколлоидов, как объекта исследования, является тот факт, что часть групп этих веществ способна проявлять пребиотические свойства, положительно влияя на микрофлору кишечника человека и животных, а также и рыб, содержащихся в аквакультуре [9]. Это означает, что введение таких компонентов, как агар-агар, гуммиарабик или арабиногалактан и др. в состав кормов для рыб перспективно с точки зрения модуляции автохтонной микрофлоры кишечника гидробионтов и требует отдельных исследований.

Однако, ввиду высокомолекулярной химической природы ряда указанных пищевых компонентов, классические методы анализа не всегда пригодны для их исследований, особенно в свете необходимости проведения быстрых, экономящих время работ. Одной из наиболее подходящих для этих целей группой методов являются методы неразрушающего контроля, а именно – спектрометрия в инфракрасном диапазоне (ИК/IR).

Инфракрасный IR диапазон состоит из ближнего (NIR), среднего (MIR) и дальнего (FIR) интервалов. Возможность применения этой области излучения базируется на способности материалов поглощать, отражать или испускать инфракрасное излучение обратно, что позволяет анализировать их состав и свойства [9], не прибегая к длительным и дорогостоящим методам. В основе способности взаимодействия материалов и ИК-излучения лежит механизм молекулярных колебаний (валентных и деформационных). Получаемые спектральные ряды (цифровые метрики) при этом требуют в ряде случаев специализированного применения статистики, которые в научных публикациях получили название хемометрии [11]. Хемометрический анализ – мощный статистический инструмент, способный дифференци-

ровать сигналы от различных молекулярных групп, что позволяет применять его для математической обработки данных, связывая тот или иной уровень антирадикальной активности со спецификой молекулярного строения у вещества (в нашем случае – пищевого компонента). Получаемые таким образом данные могут быть в дальнейшем применены для контроля качества кормов, оценки подлинности тех или иных компонентов, в том числе для изучения скоррелированности спектральных характеристик и способности проявлять антирадикальные свойства у анализируемого компонента.

Таким образом, целью нашего исследования является выявление спектральных характеристик с применением методов хемометрического анализа ряда пищевых типичных ингредиентов, ассоциированных с уровнем антирадикальной активности на примере гидроколлоидов и некоторых витаминов, часто применяемых в пищевых технологиях и при разработке кормов для аквакультуры.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалами для исследования послужили наиболее часто применяемые в рецептурах современных продуктов питания и кормов: α -токоферол (E307), агар-агар (E406), альгинат натрия (E401), арабиногалактан из хвойных пород деревьев (лиственница), мальтодекстрин (E1400), изомальто-олигосахарид, кукурузный крахмал и растворимое пищевое волокно из кукурузного зерна, коричневый (неочищенный) мальтодекстрин, декстрин кукурузный (E1400), фосфатированный крахмал (E1410), гуаровая камедь (E412), гуммиарабик (E414), конжаковая камедь (E425), три вида каррагинанов κ -, λ -, ι - (E407), микрокристаллическая целлюлоза – МКЦ (E460), карбоксиметилцеллюлоза (E469), полиэтиленгликоль – PEG-400 (E1521).

Все перечисленные компоненты были проанализированы с применением ИК спектрофотометрии. Для спектрального анализа образцов применялся ИК-Фурье спектрометр Bruker Alpha со столиком для неполного внутреннего отражения ИК излучения. После сбора и получения данных проводилась подготовка и статистическая обработка значений. Статистическая подготовка спектров предполагала несколько вариантов для анализа: нормирование значений, применение тривиального варианта фильтра Савицкого-Голея (скользящее среднее с окном примерно в 1% от длины спектра) или центрирование [11].

После измерения на ИК-спектрофотометре для всех образцов была определена антирадикальная активность (далее – АРА). АРА измерялась в трипликате с применением фотоколориметрического метода на основе устойчивого радикала дифенилпикрилгидразила (DPPH), как это описывалось нами ранее [6], в пересчете на мг аскорбиновой кислоты. В анализе использовались значения оптической плотности образцов для серии двукратного разведения растворов аскорбиновой кислоты со следующими концентрациями в мг/р: 0,234; 0,468; 0,937; 1,88; 3,75; 7,5 и бланк (контрольный образец раствора). На основе этих данных рассчитывались калибровочные графики, с применением которых производилась оценка АРА искомым ингредиентов. Полученные результаты и спектральные величины сопоставлялись в одной таблице, и производился поиск статистических корреляций. Во множественных тестах применялась поправка Бонферрони, которая $\approx 3,673 \times 10^{-8}$.

Статистический анализ проводился в программе Excel 2010 и Statistica 10. Графическая обработка рисунков в Corel Draw X7.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как известно, существует несколько вариантов ИК-спектрометрии Фурье и Рамановская спектрометрия. Первая основана на принципе поглощения подаваемого им излучения молекулярными структурами, у которых при колебании присутствует дипольный момент. Поэтому, в отличие от Рамановской, Фурье ИК-спектрометрия более чувствительна к полярным группам, например, к гидроксильным ($-O-H$), альдегидным ($-C=O$), аминок группам ($-N-H$) и т.д. Именно по этой причине для анализа был выбран метод, основанный на преобразовании Фурье. График обобщенных для всех 34 изученных спектров представлен на рисунке 1.

На нем можно заметить несколько участков, выделенных цветом, самый правый из которых соответствует (широкая средней интенсивности полоса в области значений 3 600-3 100 обратных см) $-O-H$ группам и классу соединений, содержащих спиртовые или карбоксильные группы, а также данная группа волновых характеристик соответствует присутствию воды в соединениях. Следующий

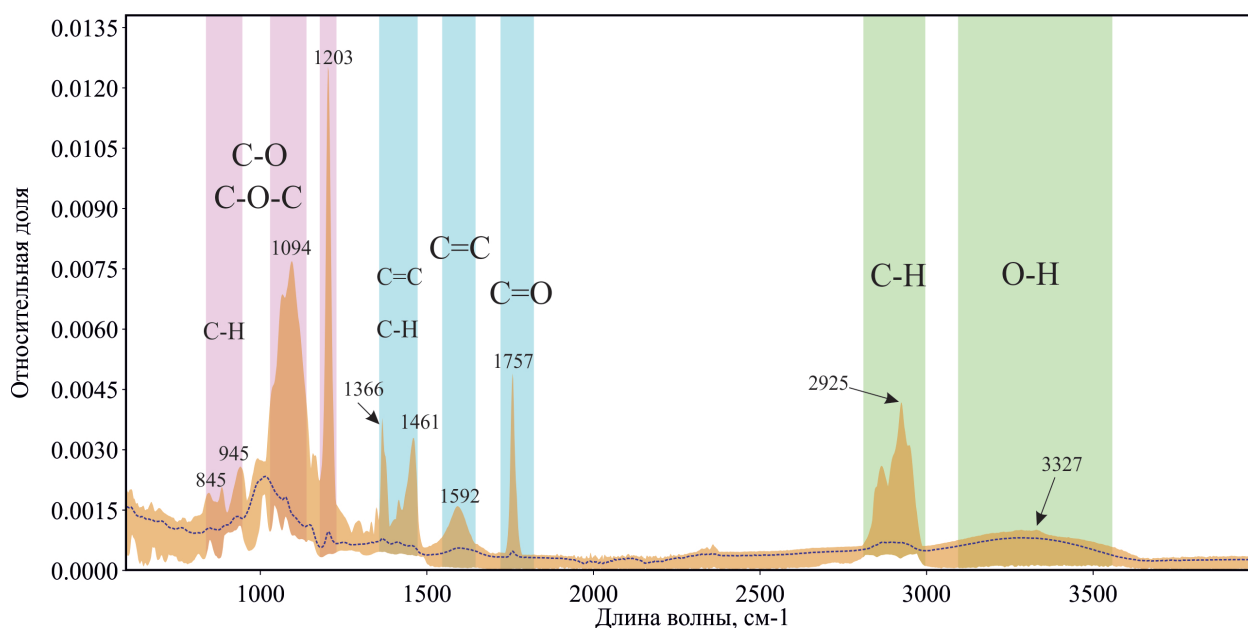


Рисунок 1. График ИК-Фурье нормированного спектра для всех исследованных пищевых ингредиентов.

Примечание: Оранжевая область – значения от минимальных до максимальных величин, пунктиром обозначено среднее значение. Цветными прямоугольными линиями обозначены области волновых характеристик, на которые оказывают влияние соответствующие связи (с указанием химических элементов). Цифры на графике – экстремумы для каждой из областей.

Figure 1. A graph of the IR-Fourier normalized spectrum for all studied food ingredients. **Note:** The orange area represents the values from minimum to maximum values, the dotted line indicates the average value. Colored rectangular lines indicate the areas of wave characteristics that are affected by the corresponding bonds (indicating the chemical elements). The numbers on the graph are the extremes for each area.

за ним пик поглощения в 2925 см^{-1} соответствует согласно таблицам ИК спектров метиленовой группе ($-\text{CH}_2-$) и соотносится с алифатическими связями $-\text{C}-\text{H}$ в структуре неразветвленных алканов. С большой вероятностью – это вклад в итоговые значения компонентов PEG400 или ряда других соединений, например, углеводов.

Волновые характеристики, соответствующие значениями $1\,757-1\,760\text{ см}^{-1}$, соотносятся с альдегидной или кето-группой $-\text{C}=\text{O}$, в том числе близки к значениям 5-ти членных полуацеталей, к которым можно отнести фуранозы из молекул гидроколлоидов, содержащих углевод арабинозу в форме арабинофуранозы (арабиногалактан и гуммиарабик).

Следующая группа волновых характеристик связана с наличием пика в положении между значениями $\approx 1\,600-1\,500\text{ см}^{-1}$ (на рисунке пик приходится на значение $1\,592\text{ см}^{-1}$). Эти характеристики обычно связывают с наличием двойных связей между углеродами, входящими в бензольное кольцо и при наличии у соединений в молекуле конъюгированных диенов. Среди исследованных групп веществ характерным представителем, показывающим подобные значения, являются токоферолы (наличествуют как диены, так и ароматическое кольцо). Эти же группы молекулярных связей дают характеристику, близкую со значением $1\,450\text{ см}^{-1}$. На графике можно заметить в этой области двойной пик с перекрывающимися основаниями, что может быть следствием влияния метиленовой группы на эту волновую характеристику.

В самой левой части рисунка присутствует область, известная как «область отпечатков пальцев», в связи с тем, что она демонстрирует в этом диапазоне достаточно сильную

вариативность. Ключевые экстремумы в этой области приходятся на значения 1203, 1094, 945, 845. Первые две являются характерными для спиртовых и эфирных групп ($\text{C}-\text{O}$), а также – фенолы ($1\,200\text{ см}^{-1}$) и вторичные спирты ($1\,100\text{ см}^{-1}$). Мы не исключаем, что эти значения с высокой интенсивностью являются следствием суммарного вклада простых эфирных групп, гидроксильных групп спиртов, а также – сложноэфирных групп различных представителей классов изученных нами пищевых ингредиентов. Два последних значения также были получены при влиянии колебаний атомов в $\text{C}-\text{H}$ группах молекулярного каркаса вещества.

Так как основные вещества, проанализированные нами, относились к нескольким классам (не считая примесей): полимерные углеводы, конъюгированные и бензолсодержащие липиды, эфиры и спирты, то представляется возможным оценить степень скоррелированности тех или иных волновых характеристик (областей описанных выше) и АРА у изученных компонентов. Значения представлены в таблице 1. Как можно заметить, большинство величин находится в прямой зависимости, но есть и высоко отрицательная корреляция. Волновые характеристики в диапазоне $3\,415-3\,465\text{ см}^{-1}$ являются одними из весьма информативных в представленных данных, поскольку они соответствуют валентным колебаниям $\text{O}-\text{H}$ -групп свободной и слабосвязанной воды, а также – гидроксильных групп в составе органических молекул (углеводов, спиртов, карбоновых кислот). Отрицательная корреляция на уровне $-0,91$ с высокой статистической значимостью указывает на обратную зависимость между интенсивностью поглощения в этом диапазоне

Таблица 1. Значения волновых характеристик, коррелирующих с уровнями АРА и диапазоны их обнаружения / **Table 1.** The values of the wave characteristics correlating with the levels of АРА and the ranges of their detection

№	Диапазон, см^{-1}	Уровень корреляции, средн.	Статистическая значимость p
1	1 166-1 168	0,90	$2,3 - 3,1 \cdot 10^{-8}$
2	1 189-1 217	0,92	$4,5 \cdot 10^{-9} - 6,1 \cdot 10^{-13}$
3	1 360-1 384	0,96	$2,5 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-14}$
4	1 428-1 473	0,94	$3,4 \cdot 10^{-8} - 5,3 \cdot 10^{-14}$
5	1 745-1 774	0,96	$2,4 \cdot 10^{-8} - 4,3 \cdot 10^{-14}$
6	2 915-2 975	0,94	$2,0 \cdot 10^{-8} - 2,1 \cdot 10^{-12}$
7	3 415-3 465	-0,91	$1,1 \cdot 10^{-8} - 8,8 \cdot 10^{-9}$

и искомым параметром, что позволяет использовать ее для оценки как сухости сырья, так и для оценки возможной его антирадикальной активности.

Представленные ИК-спектральные характеристики демонстрируют высокие уровни корреляции (0,91-0,96) и статистически значимые уровни p , что указывает на их потенциальную пригодность для использования в качестве маркеров при определении содержания воды (диапазон 3415-3465 см^{-1} с отрицательной корреляцией), оценке антирадикальной активности, а также – для мониторинга сроков хранения и прогоркания пищи, поскольку диапазоны, связанные с окислением липидов (1745-1774 см^{-1} , 2915-2975 см^{-1}) и изменениями протеиново-углеводного комплекса (1360-1384 см^{-1} , 1428-1473 см^{-1}), отражают характерные химические процессы при деградации свойств. На основе этих данных в перспективе вполне возможно создание программного обеспечения для экспресс-анализа, которое будет использовать заранее обученные калибровочные модели для быстрой неинвазивной оценки свежести и стабильности пищевых продуктов и кормов для аквакультуры по ИК-волновым характеристикам с применением алгоритмов машинного обучения.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Вклад в работу авторов: **В.В. Горбачев** – идея статьи, сбор материала, написание и корректировка текста, обработка графики и статистическая обработка данных; **А.А. Смирнов** – внесение правок в текст, окончательная верстка; **М.А. Беляева** – обсуждение и внесение правок в рукопись; **А.А. Лютиков** – внесение правок в текст, помощь в подготовке рукописи; **Д.В. Суслов** – помощь в статистической обработке, помощь в подготовке рукописи.

The authors declare that there is no conflict of interest. Contribution to the work of the authors: **V.V. Gorbachev** – the idea of the article, collection of material, writing and correcting the text, graphics processing and statistical data processing; **A.A. Smirnov** – making edits to the text, final layout; **M.A. Belyaeva** – discussion and making edits to the manuscript; **A.A. Lyutikov** – making edits to the text, assistance in the preparation of the manuscript; **D.V. Suslov** – assistance in statistical processing, assistance in the preparation of the manuscript.

ЛИТЕРАТУРА И ИСТОЧНИКИ LITERATURE AND SOURCES

1. Phillips G.O. Handbook of Hydrocolloids / ed. by Phillips G.O., Williams P.A. // Woodhead Publishing. 2 ed. 2009. 924 p.

2. Ramírez J.A., Uresti R.M., Velazquez G. [et al.] Food hydrocolloids as additives to improve the mechanical and functional properties of fish products: A review // Food Hydrocolloids. 2011. T. 25. N. 8. Pp. 1842-1852. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2011.05.009
3. Leclercq E., Graham P., Migaud H. Development of a Water-Stable agar-based diet for the supplementary feeding of cleaner fish Ballan Wrasse (*Labrus Bergylta*) deployed within commercial Atlantic Salmon (*Salmon Salar*) Netpens. // Animal Feed Science and Technology. 2015. N. 208. Pp. 98-106. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2015.06.026
4. Ma W., Zeng W., Zhang D. [et al.] Oxidative Stress in Aquaculture: Pathogenic Mechanisms and Preventive Strategies in Farmed Aquatic Animals. // Current Issues in Molecular Biology. 2025. V. 47(11). P. 873. DOI:10.3390/cimb47110873
5. Steele R. Understanding and measuring the shelf life of food. / R. Steele // Woodhead Publishing Ltd, c/o CRC Press. LLC. 2004. 395 p.
6. Горбачев В.В., Щербakov А.П., Беляева М.А. [и др.] Динамика антирадикальной активности гидроколлоидов и пищевых волокон при сонохимической обработке // Вестник Камчатского государственного технического университета. 2026. Т. 76 (в печати)
6. Gorbachev V.V., Schebakov A. P., Belyayeva M.A. [et al.] Dynamics of antiradical activity of hydrocolloids and dietary fibers during sonochemical treatment // Bulletin of Kamchatka State Technical University. 2026. T. 76. In press (In Russ.)
7. Дудник А.Г., Лотош Н.Ю., Куликов Е.А. [и др.] Влияние каротиноида астаксантина на перекисное окисление фосфолипидов, индуцируемое ионами двухвалентного железа // Вестник Московского университета. Серия 2: Химия. 2025. Т. 66. № 3. С. 249-260. DOI 10.55959/MSU0579-9384-2-2025-66-3-249-260
7. Dudnik A.G., Lotosh N.Yu., Kulikov E.A. [et al.] Carotenoid Astaxanthin Effect on Phospholipid Peroxidation Induced by Ferrous Ions // Moscow University Chemistry Bulletin. 2025. Vol. 80. N. 3. Pp. 176-184. DOI 10.3103/S0027131425700166. (In Russ.)
8. Yen G.-C., Duh P.-D., Tsai H.-L. Antioxidant and Pro-Oxidant Properties of Ascorbic Acid and Gallic Acid. // Food Chemistry. 2002. 79 (3). Pp. 307-313. DOI:10.1016/s0308-8146(02)00145-0
9. Ringø E., Olsen R.E., Gifstad T.Ø. [et al.] Prebiotics in Aquaculture: A Review. // Aquaculture Nutrition. 2010. V.16. No 2. Pp. 117-136. DOI:10.1111/j.1365-2095.2009.00731.x
10. Borba A., Gómez-Zavaglia A. Infrared spectroscopy: an underexploited analytical tool for assessing physicochemical properties of food products and processing // Current Opinion in Food Science. 2023. V. 49. P. 100953
11. Kunal R. Chemometrics and cheminformatics in Aquatic Toxicology. // Wiley. 2021. DOI: 10.1002/9781119681397

Материал поступил в редакцию/ Received 06.04.2026
Принят к публикации / Accepted for publication 07.05.2026