

Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели

¹ Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Российская Федерация

² Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Российская Федерация

³ Астраханский государственный университет им. В.Н. Татищева, г. Астрахань, Российская Федерация

Д. Д. Вилкова¹, М. А. Белова^{1,2}, М. Н. Кутузов¹, О. В. Новиченко^{3,1}, К. В. Штер¹, И. А. Никитин^{2,1}

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Дарья Дмитриевна Вилкова

E-mail: dariavilkova333@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Вилкова, Д.Д., Белова, М.А., Кутузов, М.Н., Новиченко, О.В., Штер, К.В., Никитин, И.А. (2025). Потенциал рамановской спектроскопии как метода экспресс-оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(1), 161-171. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.627>

ПОСТУПИЛА: 11.01.2025

ДОРАБОТАНА: 10.03.2025

ПРИНЯТА: 10.03.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 31.03.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Материалы подготовлены в рамках выполнения проекта «Разработка экспресс-аналитических методов на основе больших данных спектрального анализа для определения сроков хранения и безопасности пищевого рыбного сырья», <https://rscf.ru/project/23-76-10038/> за счет средств гранта Российского научного фонда № 23-76-10038.



АННОТАЦИЯ

Введение: Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) является одним из наиболее востребованных для потребителей видов пресноводной рыбы во всем мире. Филе радужной форели представляет большую пищевую и биологическую ценность. Однако свежая рыба является скоропортящимся продуктом с ограниченным сроком хранения. Обеспечение высокого качества и безопасности свежей рыбы является актуальной задачей для переработчиков и поставщиков. Среди методов неразрушающего контроля качества метод рамановской спектроскопии имеет потенциал использования для обеспечения качества и мониторинга безопасности пищевых продуктов. Несмотря на свою эффективность рамановская спектроскопия остается в значительной степени недостаточно исследованной для оценки свежести и сроков хранения рыбной продукции. Данная работа восполняет недостающие знания в этой области.

Цель: Изучить возможность применения метода спектроскопии комбинационного рассеяния для оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели, а также определить ключевые спектральные характеристики, которые позволяют отслеживать изменения качества продукта в процессе хранения.

Материалы и методы: В качестве объекта исследования использовалось филе охлажденной радужной форели, которое хранилось при температуре $+2 \pm 2^\circ\text{C}$. Определение срока хранения, свежести и качества проводилось с использованием рамановского спектрометра серии Nanoscope NS100 с длиной волны возбуждения 785 нм и рабочим диапазоном $100-3200\text{ см}^{-1}$. Измерения проводились в течение 16 дней холодильного хранения.

Результаты: Результаты рамановского спектрального анализа показали различия в спектрах комбинационного рассеяния света в течении срока хранения, которые главным образом отражали степень окисления липидов. Наименьшая интенсивность наблюдалась для образцов свежей рыбы с 0 до 3 дня хранения, что позволяет дифференцировать эти образцы от других. В процессе анализа была выявлена флуоресценция образцов, которая создавала дополнительные шумы у спектров. Трехмерная математическая модель показала наибольший процент от общей дисперсии для охлажденной радужной форели (92 %).

Выводы: Полученные результаты демонстрируют потенциал использования рамановской спектроскопии как основу для разработки методики экспресс-оценки и неразрушающего контроля качества и срока хранения рыбы. Данный метод будет иметь практическую значимость для органов контроля безопасности пищевой продукции и для потребителей. Для успешного применения метода необходима минимизация фонов флуоресценции, в том числе с использованием хеометрических методов, что позволит повысить точность прогностических моделей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

филе радужной форели; рамановская спектроскопия; свежесть рыбы; контроль качества пищевых продуктов; хранение в охлажденном виде; неразрушающий мониторинг; интерференция флуоресценции; хеометрические методы

The Potential of Raman Spectroscopy as a Rapid Method for Monitoring Shelf Life and Freshness of Refrigerated Rainbow Trout Fillet

¹ Cherepovets State University,
Cherepovets, Russian Federation

² Plekhanov Russian University
of Economics, Moscow,
Russian Federation

³ Astrakhan State University name
of V.N. Tatishchev, Astrakhan,
Russian Federation

Daria D. Vilkova¹, Maria A. Belova^{1,2}, Mikhail N. Kutuzov¹,
Olga V. Novichenko^{3,1}, Konstantin V. Shter¹, Igor A. Nikitin^{2,1}

CORRESPONDENCE:

Daria D. Vilkova

E-mail: dariavilkova333@gmail.com

FOR CITATIONS:

Vilkova, D.D., Belova, M.A., Kutuzov, M.N., Novichenko, O.V., Shter, K.V., & Nikitin, I.A. (2025). The potential of raman spectroscopy as a rapid method for monitoring shelf life and freshness of refrigerated rainbow trout fillet. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(1), 161-171. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.1.627>

RECEIVED: 11.01.2025

REVISED: 10.03.2025

ACCEPTED: 15.03.2025

PUBLISHED: 31.03.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FOUNDING

The materials were prepared as part of the project "Development of Rapid Analytical Methods Based on Big Data from Spectral Analysis for Determining the Shelf Life and Safety of Fish Raw Materials," <https://rscf.ru/project/23-76-10038/>, funded by the Russian Science Foundation (grant No. 23-76-10038).



ABSTRACT

Background: Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) is among the most commercially important freshwater fish species worldwide. Rainbow trout fillets are recognized for their high nutritional value and beneficial biological properties. However, fresh fish is a highly perishable food with a limited shelf life. Ensuring consistent quality and safety of fresh fish products remains a critical challenge for processors and suppliers. Among non-destructive quality evaluation techniques, Raman spectroscopy emerges as a promising approach for quality and safety monitoring in the food industry. Despite its proven effectiveness, Raman spectroscopy remains significantly understudied for assessing freshness and shelf-life in fish products. This research gap was addressed by providing novel insights into the application of Raman spectroscopy for fish freshness monitoring.

Purpose: To investigate the potential of Raman spectroscopy for assessing the shelf life and freshness of refrigerated rainbow trout fillets, and to determine key spectral characteristics that enable monitoring of product quality changes during storage.

Materials and Methods: The study object was refrigerated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets stored at $+2 \pm 2^\circ\text{C}$. The shelf-life assessment, freshness evaluation and quality monitoring were performed using a Nanoscope NS100 series Raman spectrometer with 785 nm excitation wavelength and 100–3200 cm^{-1} spectral range. Measurements were conducted during 16 days of refrigerated storage.

Results: The Raman spectral analysis demonstrated distinct variations in the spectra of rainbow trout samples and corresponding to different storage durations, revealing lipid oxidation levels. The lowest intensity was observed in fresh samples stored for 0–3 days, enabling clear differentiation from other groups. Sample fluorescence was detected during the analysis, introducing additional noise to the spectra. The 3D mathematical model demonstrated the highest percentage of total variance (92 %) for chilled rainbow trout.

Conclusion: The obtained results demonstrate the potential of Raman spectroscopy as a rapid-assessment and non-destructive monitoring techniques for fish quality and shelf-life evaluation. This method holds practical significance for food safety regulatory authorities and consumers. Successful implementation of the technique requires minimization of fluorescence background interference, including the application of chemometric approaches, which would improve the accuracy of predictive models.

KEYWORDS

rainbow trout fillets; Raman spectroscopy; fish freshness; food quality control; refrigerated storage; non-destructive monitoring; fluorescence interference; chemometric tools

ВВЕДЕНИЕ

Радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*) стала одним из самых востребованных для потребителей видом пресноводной рыбы во всем мире. Филе радужной форели представляет особую пищевую и биологическую ценность, поскольку имеет в составе высококачественный белок, незаменимые аминокислоты, ненасыщенные жирные кислоты, витамины и минеральные вещества (Xu et al., 2022).

Свежая рыба относится к скоропортящимся продуктам с ограниченным сроком хранения. В связи с этим, обеспечение высокого качества и безопасности свежей рыбы остается актуальной задачей для переработчиков и поставщиков, поскольку эти показатели являются приоритетными для потребителей при выборе продукции. Во время хранения рыбы в течение постмортального периода происходят необратимые микробиологические и биохимические изменения, которые могут негативно влиять на её вкусовые качества и пищевую ценность. В рыбе содержится больше эндогенных ферментов и психротрофных микроорганизмов, чем в других продуктах животного происхождения. Кроме того, особенности строения мышечной ткани рыбы облегчают проникновение бактерий внутрь через рыхлую интерстициальную ткань (Wu et al., 2018). Всё это приводит к быстрому ухудшению качества свежей рыбы и сокращению сроков её хранения.

Снижение качества рыбы в свою очередь не только значительно уменьшает её экономическую и пищевую ценность, но и может серьёзно повлиять на здоровье людей (Yao et al., 2023). Даже при условии охлаждения продукции, которое способствует замедлению процессов порчи, поддержание свежести и безопасности рыбы остается непростой задачей. Это связано с воздействием на продукт внешних факторов, таких как колебания температуры, уровень влажности и доступ кислорода. Сроки хранения рыбы также зависят от географического происхождения, способа и сезона вылова, особенности разделки рыбы (потрошение рыбы и др.), обработки, способа упаковки (Kashani et al., 2023). Отслеживание всех этих параметров рыбы является важным аспектом для пищевой безопасности и защиты прав потребителей.

Для оценки свежести и сроков хранения рыбы традиционно используют сенсорные (Chytiri et

al., 2004), физико-химические (Poli et al., 2006), биохимические (Ocaño-Higuera et al., 2011) и микробиологические методы (Hernández et al., 2009). Однако в практике контроля качества существуют определённые проблемы, связанные с недостаточной точностью и оперативностью некоторых традиционных методов, которые требуют сложной подготовки образцов или деструктивны (Cheng et al., 2013; Hassoun et al., 2019; Hassoun & Karoui, 2017; Vilkova et al., 2021). Таким образом, возникает необходимость в более быстром, чувствительном и точном аналитическом инструменте, который мог бы дополнить или заменить традиционные методы.

Недавние достижения в области прикладной рамановской спектроскопии продемонстрировали потенциал данного метода в обеспечении качества и мониторинге безопасности пищевых продуктов (Sun et al., 2022). Этот метод, основанный на рассеянии света, позволяет получать уникальную информацию о качественном и количественном составе различных веществ. Благодаря высокой точности и чувствительности рамановской спектроскопии становится возможным отслеживать даже незначительные изменения в химическом составе рыбы, которые могут свидетельствовать о начале процессов порчи (Cheng et al., 2013). Важным преимуществом метода является его нечувствительность к влиянию воды, что позволяет с более высокой точностью анализировать продукты с высоким содержанием влаги (Sui et al., 2020).

С помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света ранее были выявлены несколько биомаркеров, которые могут служить показателями качества рыбы и других продуктов животного происхождения. К ним относятся содержание липидов, каротиноидов, определение степени окисления липидов и структуры белков (Velioğlu et al., 2015). Кроме того, метод рамановской спектроскопии применяется для идентификации и аутентификации различных видов рыб (Landry et al., 2020). Несмотря на имеющиеся зарубежные научные исследования, возможности рамановской спектроскопии для оценки качества и определения срока хранения рыбного сырья, в нашей стране остаются неизученными.

Целью данной статьи была оценка потенциала метода рамановской спектроскопии как эффективного и неразрушающего инструмента для быстрого

определения свежести и срока хранения охлажденного филе радужной форели. Для достижения цели была поставлена задача определить ключевые спектральные характеристики, которые позволят отслеживать изменения качества продукта в процессе хранения. Измерения проводились на охлажденном филе радужной форели и фиксировались в течение 16 дней хранения. Полученные спектры позволяют определить химические изменения, происходящие на молекулярном уровне в рыбе. Эти данные расширяют возможности применения спектроскопических методов для контроля качества пищевой продукции и способствует развитию безопасных и эффективных технологий мониторинга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

В качестве объекта исследования была выбрана радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*), выращенная в садковом хозяйстве на озере Ковжское, расположенном в Вытегорском районе Вологодской области. Для исследования было отобрано 16 особей двухлетнего возраста: 4 самца и 12 самок. После вылова в течение 4,5 часов рыбу доставили в лабораторию, засыпав предварительно льдом для сохранения свежести. Перед проведением эксперимента рыбу потрошили и промыли проточной водой. В течение 16 дней (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) форель хранилась в специальных ящиках со льдом при температуре $+2 \pm 2^\circ\text{C}$. Каждый день для анализа случайным образом отбирали одну потрошеную рыбу, которую затем обезглавливали и разделявали на филе.

Методы и инструменты

Перед началом исследования был проведен визуальный осмотр рыбы для выявления признаков порчи, заболеваний и повреждений. Затем проводили измерения массы и длины рыбы, а также была проведена оценка состояния её кожи, плавников и внешнего вида слизи. Все измерения проводились при температуре $+22 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $50 \pm 10\%$.

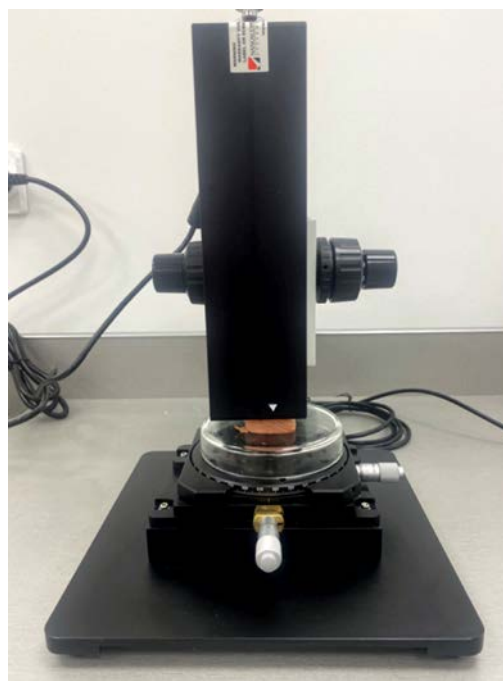
Для проведения спектральных измерений использовали рамановский спектрометр серии NS100

Рисунок 1

Рамановский спектрометр серии NS100 с образцом

Figure 1

Raman Spectrometer (NS100 Series) with a Sample



(NANOSCOPE Systems, Inc, Корея) с длиной волны возбуждения 785 нм с рабочим диапазоном $100\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ и настольный держатель для модуля NS-Raman (модель NS Frame-D) (см. Рисунок 1).

Регистрация спектра образцов выполнялась в течение 5 секунд при усреднении по пяти измерениям. Каждый образец измеряли в трехкратной повторности. Используемая мощность лазера составляла 50–55 % от максимальной мощности (80 мВт), чтобы избежать повреждения образца. Предварительно перед каждым измерением проводили темновое сканирование без лазерного возбуждения, которое регистрировалось и использовалось в качестве фона.

Статистическая обработка данных

Спектры комбинационного рассеяния получали с помощью программного обеспечения NSRamanID. Полученные данные объединялись в общую таблицу Microsoft Office Excel 2019 для формирования датасета. Последующую работу с полученными данными проводили в программе The Unscramble X (V.10.4, Camo Software AS, Осло, Норвегия). Пе-

ред проведением анализа методом частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR) в диапазоне спектров $100\text{--}3200\text{ см}^{-1}$ к исходным данным применялась предобработка — фильтр Савицкого-Голея. Полученный сигнал спектров корректировался путем применения сглаживающего фильтра — скользящей средней (Moving Average). Затем массив данных обрабатывался методом стандартной нормальной переменной (SNV).

Для выявления наиболее информативной области спектра к исходным данным применялся метод частичной регрессии наименьших квадратов (PLSR). Математическое моделирование рамановских спектральных данных радужной форели было выполнено с помощью метода главных компонент (PCA) и факторного дискриминантного анализа (FDA).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка морфо-патологических показателей радужной форели

При вылове рыба проявляла все признаки здоровой особи: в воде занимала нормальное положение, активная, с нормальным движением жаберных крышек.

О безопасности в ветеринарно-санитарном отношении свежей рыбы можно утверждать на основании органолептических показателей и результатов ее вскрытия. Морфологические и патологические исследования рыбы проводились сразу после поступления в лабораторию. Результат визуального осмотра радужной форели показал, что анализируемые особи не имели видимых повреждений, признаков заболеваний и наружных паразитов. Жабры рыбы были красного цвета, прозрачные глаза без повреждений, запах, свойственный живой рыбе. У всех особей наблюдалась хорошо выраженная окоченелость мышц. Чешуя блестящая, плотно прилегает к телу, а слизь прозрачная, без примесей крови и постороннего запаха. Кожа упругая, без посторонних пятен, имела естественную окраску, плотно прилегала к тушке. Плавники цельные и естественной окраски. Глаза всех особей выпуклые, а роговая оболочка прозрачная. Брюшко рыбы не вздутое, анальное отверстие плотно закрыто, без истечения слизи.

Внутренние органы радужной форели хорошо выражены, естественной окраски и структуры, без наличия опухолей, кишечник не вздут, без гнилостного запаха.

Исследуемая форель имела длину в среднем $43,6\text{ см}$ при варьировании показателя от $41,0$ до $46,0\text{ см}$ (Рисунок 2). Средняя масса исследуемых экземпляров составила $950,6\text{ г}$ (от $837,5$ до $1086,0\text{ г}$; $n=16$).

Рисунок 2

Внешний вид рыбы

Figure 2

Fish Morphology



Рамановские спектры

Были получены спектры 16 дней хранения радужной форели в спектральном диапазоне 100–3200 см⁻¹ (см. Рисунок 3). Высокий фон в необработанном рамановском спектре был обусловлен флуоресцентной интерференцией от биологической матрицы в рыбе. После шумоподавления и обработки спектров для снижения базовой линии наблюдались различные характерные пики: около 520, 629, 855, 1070, 1306, 1444, 1659, 2926 см⁻¹ (Таблица 1). Данные пики можно отнести к молекулярному растяжению белков, жирных кислот и нуклеиновых кислот в мышцах рыбы.

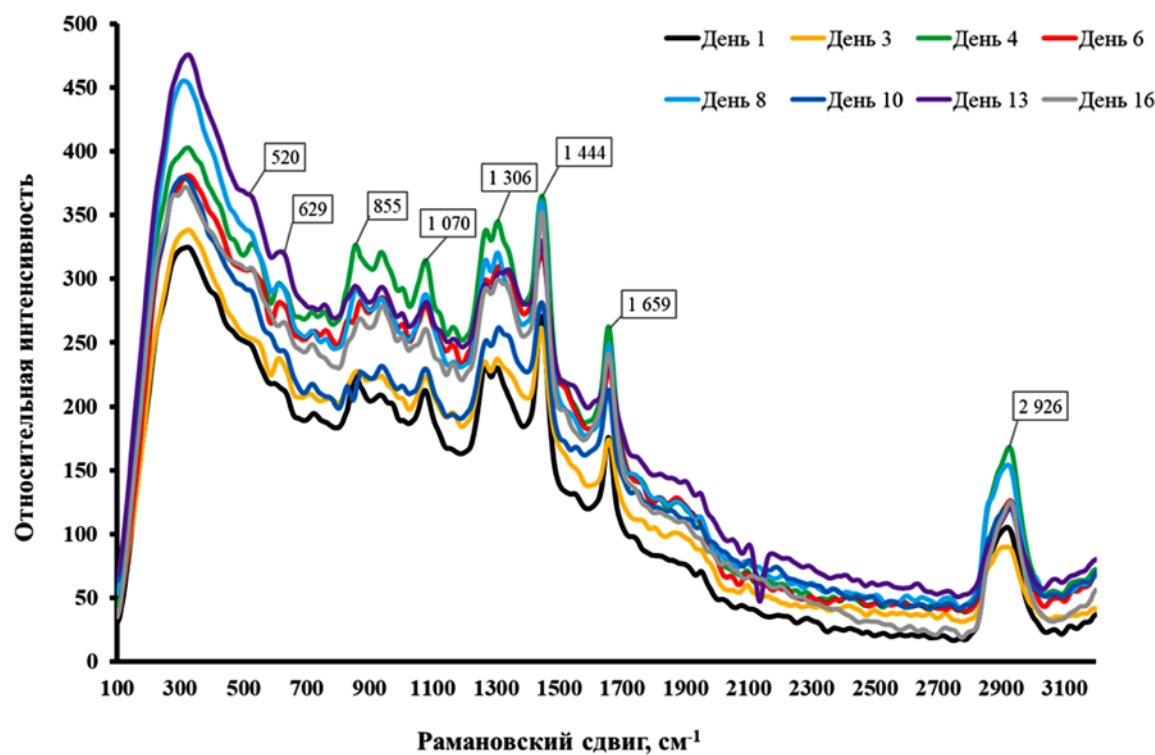
Наиболее значимые области спектра, расположенные в диапазоне от 1000 см⁻¹ до 1700 см⁻¹, а именно в диапазонах волновых чисел от 1000–1100 см⁻¹, 1250–1350 см⁻¹, 1400–1500 см⁻¹ и 1630–1700 см⁻¹.

Таблица 1
Характеристика пиков рамановских спектров радужной форели

Table 1 The Assignment of Raman peaks of Rainbow Trout	
Рамановский сдвиг (см ⁻¹)	Характеристика пика
520	S-S дисульфидное растяжение в белке
629	Маркеры фенилаланина
855	Гликоген, колебаниями бензольного кольца тирозина и растяжение С–С связей кольца пролина
1070	Триптофан, растяжение С–С или С–О связей у фосфолипидов, растяжение С–С или PO ₂ (нуклеиновых кислот)
1306	Жирные кислоты
1444	Деформация CH ₂ -группы (колебания белков), маркер концентрации белка
1659	амидная группа I в белках, двойная связь С=С липидов в нормальных тканях
2926	Растяжение связей С–Н

Рисунок 3
Рамановские спектры радужной форели

Figure 3
Raman Spectra of Rainbow Trout



Хемометрическая обработка данных

При анализе данных методом частичной регрессии наименьших квадратов по 7 факторам был построен график корреляционной нагрузки общего диапазона спектральных данных. По этому графику было выявлено, что нет значимой четкой области.

Для извлечения информации из спектральных наборов данных был применен метод главных компонент к спектрам, зарегистрированным на филе радужной форели. По компоненте 1 и 2 математическая модель была равна 78% в двумерной модели (2D) (Рисунок 4). При введении компоненты 3 трехмерная модель достигла 92% дифференциации.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенное исследование продемонстрировало потенциал применения метода рамановской спектроскопии для оценки срока хранения и свежести филе охлажденной радужной форели. Полученные образцы не имели внешних признаков заболеваний или механических повреждений, что подтверждает репрезентативность данных для дальнейшего анализа.

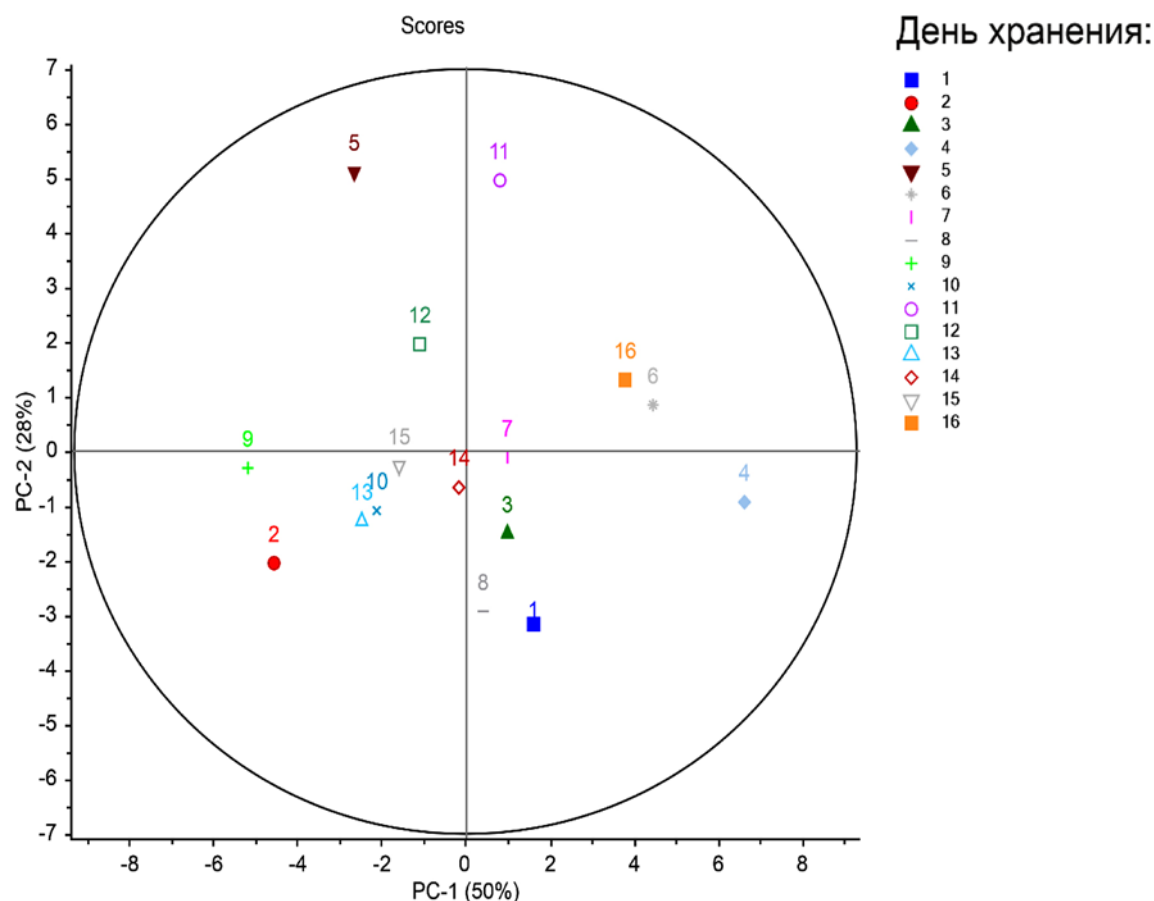
В спектрах филе радужной форели были выявлены характерные пики (около 520, 629, 855, 1070, 1306, 1444, 1659, 2926 см^{-1}), соответствующие различным колебательным режимам в молекулах струк-

Рисунок 4

2D модель анализа главных компонент рамановских спектров

Figure 4

2D Model of Principal Components Analysis of Raman Spectra



турных компонентов образцов. Наиболее низкая интенсивность полученных спектров наблюдалась в период с 0 по 3 день хранения, что позволило четко дифференцировать свежие образцы от тех, которые хранились дольше. Поскольку свежая рыба содержит большее количество воды, а вода слабо рассеивает рамановский сигнал, тем самым его подавляя, то низкая интенсивность спектров объяснима. Выявленные спектральные характеристики совпадают с результатами, представленными ранее для свежих образцов различных видов рыб, таких как лосось, форель, тунец и минтай (Raskovic, 2016).

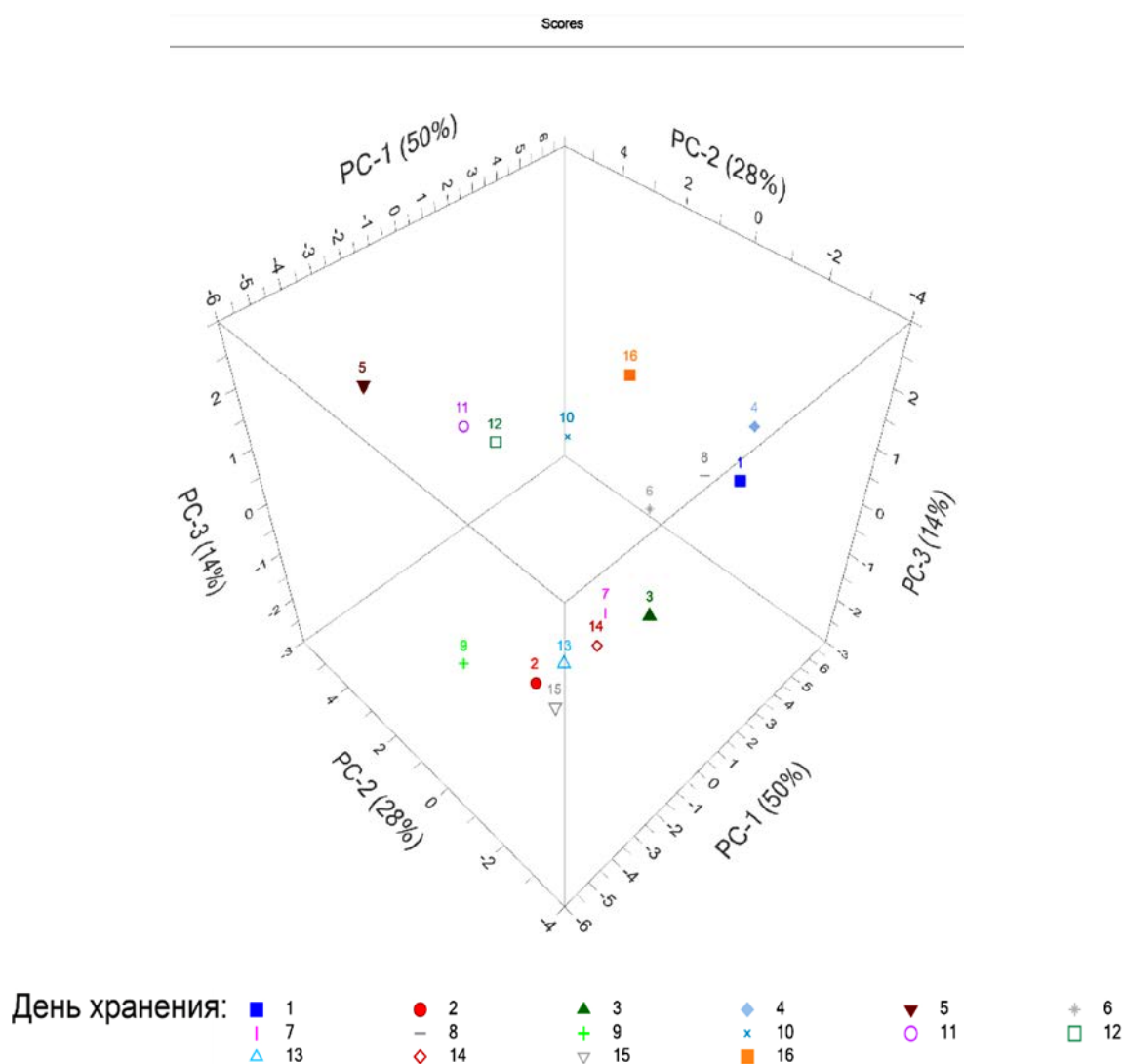
Обнаруженные спектральные полосы у филе форели связанные с амидом I ($1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$), амидом II ($1510\text{--}1560\text{ см}^{-1}$) и амидо III ($1230\text{--}1350\text{ см}^{-1}$), дают важную информацию об изменениях вторичной структуры белка. Амид I отражает изменения вторичной структуры белка: по мере хранения изменяется соотношение между α -спиралями, β -складчатыми листами и случайными катушками (Herrero, 2008). Увеличение интенсивности полос ароматических аминокислот: фенилаланина (1070 см^{-1}), тирозина ($629\text{ и }855\text{ см}^{-1}$) и триптофана (730 см^{-1}), характерные до 13 дня хранения, подтверждает накопление свободных аминокислот и косвенно сви-

Рисунок 5

3D модель анализа главных компонент рамановских спектров

Figure 5

3D Model of Principal Components Analysis of Raman Spectra



детельствует о росте микробного числа (Sowoidnich et al., 2012). Кроме того, полученные данные свидетельствуют о разложении белков во время хранения рыбы, а также о их деградации.

Наряду с изменениями белковых структур наблюдались выраженные спектральные признаки окисления липидов, представленные пиками около 1262, 1306, 1444 и 1659 см^{-1} . Максимальная интенсивность этих пиков на 4 и 8 дни хранения подтверждает наличие процессов окисления жиров, что согласуется с литературными данными (Chen et al., 2019; Zhong et al., 2021). В этот период — на 4 и 8 дни хранения возможно первичное и вторичное окисление липидов рыбы, соответственно. Увеличение интенсивности флуоресценции в области растяжения $\text{C}=\text{C}$ (1659 см^{-1}), начиная с 5 дня хранения, может быть связано с образованием сопряженных диенов и отражает усиление окислительных процессов в липидах (Zhong et al., 2021).

Отмечено возрастание интенсивности полосы S–S (520 см^{-1}), достигающее максимума на 12–13 дни хранения, что свидетельствует о процессах окисления аминокислотных остатков цистеина и метионина, типичных для хранения рыбы (Jaafreh et al., 2018). Поскольку данный пик не является типичным для рыбного сырья, то есть необходимость в точности определения его природы с помощью хроматографических методов и сопоставлении с референсными спектрами.

Анализ спектральных данных с применением методов многомерной статистики показал, что двумерная модель анализа главных компонент (РСА) объясняла 78% данных от общей дисперсии, что недостаточно для надежной дифференциации образцов. Введение третьей компоненты повысило объясненную дисперсию до 92%, обеспечив более четкую дифференциацию отдельных дней хранения (5, 9, 12 и 16 дни) (Рисунок 5). Несмотря на это, модель показала низкую эффективность в прогнозировании срока хранения ($R^2 = 0,74$; точность 0,12), что указывает на необходимость ее совершенствования с учетом гетерогенности филе по содержанию жира и мышечной ткани, а также из-за высокого уровня фонового шума спектров.

Дополнительный факторный дискриминантный анализ (FDA), примененный к пяти первым компонентам РСА, продемонстрировал ограниченную

эффективность с общим показателем правильной классификации 43,75%. Однако для некоторых дней (5, 9, 12, 16 дни) была достигнута 100% точность классификации. Таким образом, полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейшего улучшения модели, включая минимизацию спектрального шума и уточнение классификации по специфическим зонам филе.

Можно утверждать, что метод рамановской спектроскопии перспективен для экспресс-оценки качества и свежести охлажденной радужной форели, однако требует доработки и дополнительных исследований для повышения точности и практической применимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе настоящего исследования была подтверждена перспективность применения метода рамановской спектроскопии для экспресс-оценки свежести и срока хранения филе охлажденной радужной форели. Установлено, что спектральный метод позволяет четко дифференцировать свежие образцы до 4 дня хранения благодаря наименьшей интенсивности спектров комбинационного рассеяния. Наиболее информативными оказались спектральные диапазоны от 1000 до 1700 см^{-1} , отражающие изменения вторичной и третичной структур белков, а также степень окисления липидов.

Однако из-за неоднородной структуры рыбного сырья, включающей области с различным содержанием мышечной и жировой ткани, рекомендуется проводить дальнейшие исследования с разделением филе по отдельным зонам (хвостовая, средняя, головная части, теша). Такой подход позволит повысить точность и информативность спектральных данных. Также выявлена необходимость минимизации фоновой флуоресценции, снижающей точность прогнозирования сроков хранения, что может быть решено с применением соответствующих хемометрических методов.

После решения указанных задач рамановская спектроскопия может быть успешно интегрирована в систему внутреннего контроля качества и свежести рыбного сырья на предприятиях переработки и у поставщиков.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Вилкова Дарья Дмитриевна: руководство исследованием; концептуализация; формулирование исследовательских целей и задач; проведение исследования; создание рукописи и ее редактирование; утверждение окончательного варианта статьи.

Белова Мария Алексеевна: формулирование исследовательских целей и задач; методология; проведение исследования; анализ и интерпретация полученных данных; создание черновика рукописи.

Кутузов Михаил Николаевич: отбор проб; пробоподготовка; формальный анализ; работа с программным обеспечением; визуализация; обработка и верификация данных; редактирование рукописи.

Новиченко Ольга Викторовна: формулирование исследовательских целей и задач; концептуализация; формальный анализ; редактирование рукописи.

Штер Константин Владимирович: отбор проб; пробоподготовка; методология; проведение исследования; обработка данных; редактирование графических изображений.

Никитин Игорь Алексеевич: концептуализация; администрирование данных; ресурсы; утверждение окончательного варианта статьи.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Daria D. Vilkova: project administration; conceptualization; data curation; investigation; writing — review & editing.

Maria A. Belova: data curation; methodology; investigation; formal analysis; writing — original draft.

Mikhail N. Kutuzov: resources; formal analysis; software; visualization; validation; writing — review & editing.

Olga V. Novichenko: data curation; conceptualization; formal analysis; writing — review & editing.

Konstantin V. Shter: resources; methodology; investigation; data curation; visualization.

Igor A. Nikitin: conceptualization; project administration; resources

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Chen, Z., Wu, T., Xiang, C., Xu, X., & Tian, X. (2019). Rapid identification of rainbow trout adulteration in Atlantic salmon by Raman spectroscopy combined with machine learning. *Molecules*, 24(15), 2851. <https://doi.org/10.3390/molecules24152851>
- Cheng, J., Dai, Q., Sun, D., Zeng, X., Liu, D., & Pu, H. (2013). Applications of non-destructive spectroscopic techniques for fish quality and safety evaluation and inspection. *Trends in Food Science & Technology*, 34(1), 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.08.005>
- Chytiri, S., Chouliara, I., Savvaidis, I. N., & Kontominas, M. G. (2004). Microbiological, chemical and sensory assessment of iced whole and filleted aquacultured rainbow trout. *Food Microbiology*, 21(2), 157–165. [https://doi.org/10.1016/S0740-0020\(03\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0740-0020(03)00059-5)
- Czamara, K., Majzner, K., Pacia, M. Z., Kochan, K., Kaczor, A., & Baranska, M. (2015). Raman spectroscopy of lipids: A review. *Journal of Raman Spectroscopy*, 46(1), 4–20. <https://doi.org/10.1002/jrs.4607>
- Hassoun, A., & Karoui, R. (2017). Quality evaluation of fish and other seafood by traditional and nondestructive instrumental methods: Advantages and limitations. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(9), 1976–1998. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1047926>
- Hassoun, A., Sahar, A., Lakhal, L., & Ait-Kaddour, A. (2019). Fluorescence spectroscopy as a rapid and non-destructive method for monitoring quality and authenticity of fish and meat products: Impact of different preservation conditions. *LWT*, 103, 279–292. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.01.021>
- Hernández, M. D., López, M. B., Álvarez, A., Ferrandini, E., García, B. G., & Garrido, M. D. (2009). Sensory, physical, chemical and microbiological changes in aquacultured meagre (*Argyrosomus regius*) fillets during ice storage. *Food Chemistry*, 114(1), 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.045>

- Herrero, A. (2008). Raman spectroscopy a promising technique for quality assessment of meat and fish: A review. *Food Chemistry*, 107, 1642–1651. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.10.014>
- Jaafreh, S., Breuch, R., Günther, K. et al. (2018). Rapid poultry spoilage evaluation using portable fiber-optic Raman spectrometer. *Food Analytical Methods*, 11, 2320–2328. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1223-0>
- Kashani Zadeh, H., Hardy, M., Sueker, M., Li, Y., Tzouchas, A., MacKinnon, N., Bearman, G., Haughey, S. A., Akhbardeh, A., Baek, I., Hwang, C., Qin, J., Tabb, A. M., Hellberg, R. S., Ismail, S., Reza, H., Vasefi, F., Kim, M., Tavakolian, K., & Elliott, C. T. (2023). Rapid assessment of fish freshness for multiple supply-chain nodes using multi-mode spectroscopy and fusion-based Artificial Intelligence. *Sensors*, 23(11), 5149. <https://doi.org/10.3390/s23115149>
- Landry, J.D., Torley, P.J., & Blanch, E.W. (2020). Detection of biomarkers relating to quality and differentiation of some commercially significant whole fish using spatially off-set Raman spectroscopy. *Molecules*, 25, 3776. <https://doi.org/10.3390/molecules25173776>
- Ocaño-Higuera, V. M., Maeda-Martínez, A. N., Marquez-Ríos, E., Canizales-Rodríguez, D. F., Castillo-Yáñez, F. J., Ruíz-Bustos, E., Graciano-Verdugo, A. Z., & Plascencia-Jatomea, M. (2011). Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods. *Food Chemistry*, 125(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.034>
- Poli, B. M., Messini, A., Parisi, G., Scappini, F., Vigiani, V., Giorgi, G., & Vincenzini, M. (2006). Sensory, physical, chemical and microbiological changes in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) fillets packed under modified atmosphere/air or prepared from whole fish stored in ice. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(4), 444–454. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.01094.x>
- Raskovic, B., Heinke, R., Roesch, P., & Popp, J. (2016). The Potential of Raman Spectroscopy for the Classification of Fish Fillets. *Food Analytical Methods*, 9, 1301–1306. <https://doi.org/10.1007/s12161-015-0312-6>
- Rødbotten, M., Lea, P., & Øydis U. (2009). Quality of raw salmon fillet as a predictor of cooked salmon quality. *Food Quality and Preference*, 20, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2008.06.004>
- Sowoidnich, K., Schmidt, H., Kronfeldt, H., & Schwägele, F. (2012). A Portable 671 nm Raman Sensor System for Rapid Meat Spoilage Identification. *Vibrational Spectroscopy*, 62, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2012.04.002>
- Sui, Y., Zhang L., Lu, S., Yang, D., & Zhu, C. (2020). Research on the shrimp quality of different storage conditions based on Raman spectroscopy and prediction model. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 40, 5, 1607–1613. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2020\)05-1607-07](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1607-07)
- Sun, Y., Tang, H., Zou, X., Meng, G., & Wu, N. (2022). Raman spectroscopy for food quality assurance and safety monitoring: A review. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100910. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100910>
- Velioglu, H., Temiz, T., & Boyaci, I. (2015). Differentiation of fresh and frozen-thawed fish samples using Raman spectroscopy coupled with chemometric analysis. *Food Chemistry*, 172, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.073>
- Vilkova, D., Chene, C., Kondratenko, E., & Karoui, R. (2021). A comprehensive review on the assessment of the quality and authenticity of the sturgeon species by different analytical techniques. *Food Control*, 133, 108648. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108648>
- Wu, L. & Pu, H., & Sun, D. (2018). Novel techniques for evaluating freshness quality attributes of fish: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.12.002>
- Xu, K., Yi, Y., Deng, J., Wang, Y., Zhao, B., Sun, Q., Gong, C., Yang, Z., Wan, H., He, R., Wu, X., Yao, B., Zhang, M., & Tang, Y. (2022). Evaluation of the freshness of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets by the NIR, E-nose and SPME-GC-MS. *RSC Advances*, 12(19), 11591–11603. <https://doi.org/10.1039/d2ra00038e>
- Yao, J., Yue, Z., Lin, H., Wang, L., Wang, K., & Li, J. (2023). Non-destructive monitoring the freshness of sea bass fillets using Raman spectroscopy with orthogonal signal correction and multivariate analysis. *Microchemical Journal*, 191, 108859. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.108859>
- Zhong, N., Li, Y., Li, X., Guo, C., & Wu, T. (2021). Accurate prediction of salmon storage time using improved Raman spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 293, 110378. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110378>