

Применение гиперспектральной визуализации и искусственного интеллекта для контроля свежести рыбного сырья при холодильном хранении

¹ Череповецкий государственный университет, Вологодская область, г. Череповец, Российская Федерация

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

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

⁴ Университет Абдула Малика Аль Саади, г. Тетуан, Марокко

М. Н. Кутузов¹, М. А. Белова^{1,2}, О. В. Новиченко^{3,1},
И. А. Никитин^{2,1}, Х. Заруал⁴, Д. Д. Вилкова¹

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Михаил Николаевич Кутузов

E-mail: kutuzov35@gmail.com

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Кутузов, М.Н., Белова, М.А., Новиченко, О.В., Никитин, И.А., Заруал, Х., & Вилкова, Д.Д. (2025). Применение гиперспектральной визуализации и искусственного интеллекта для контроля свежести рыбного сырья при холодильном хранении. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 127-142. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.681>

ПОСТУПИЛА: 04.08.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Материалы подготовлены в рамках 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: Мониторинг свежести охлажденной рыбы остается одной из наиболее сложных задач рыбоперерабатывающей отрасли. Существующие стандартные методы контроля являются деструктивными и не способны отразить пространственную неоднородность распределения маркеров порчи. Перспективным направлением является разработка неразрушающих методов анализа, таких как гиперспектральная визуализация (HSI), позволяющая получать пространственную и спектральную информацию для каждого пикселя изображения.

Цель: Целью настоящего исследования является оценка эффективности использования гиперспектральной визуализации для бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по признаку раннего (до 48 ч) и позднего (более 48 ч) срока хранения.

Материалы и методы: Исследование проводилось на образцах филе радужной форели, хранившихся при температуре $+2 \pm 2$ °C в течение 16 суток. Для получения гиперспектральных изображений использовалась камера FigSpec FS-23 (диапазон 400–1000 нм). Проводился анализ главных компонент (PCA), а для бинарной классификации образцов была разработана нейросетевая модель на основе фреймворка TensorFlow и высокоуровневого API Keras.

Результаты: Выявлена характерная нелинейная динамика коэффициента отражения в процессе хранения. Метод PCA показал, что первая главная компонента объясняет 93,8 % дисперсии данных. Нейросетевая модель продемонстрировала 90 % точности при бинарной классификации образцов.

Выводы: Подтверждена эффективность метода гиперспектральной визуализации для неразрушающего контроля свежести рыбного сырья. Разработанный подход позволяет достоверно дифференцировать свежие и несвежие образцы и может быть рекомендован для внедрения в систему входного контроля на рыбоперерабатывающих предприятиях.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

радужная форель; гиперспектральная визуализация; хранение; качество; анализ главных компонент; нейронные сети; бинарная классификация



Application of Hyperspectral Imaging and Artificial Intelligence for Freshness Assessment of Fish Raw Material during Refrigerated Storage

¹ Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda region, Russian Federation

² Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

³ Astrakhan Tatishchev State University, Astrakhan, Astrakhan region, Russian Federation

⁴ Abdelmalek Essaadi University, Tétouan, Morocco

Mikhail N. Kutuzov¹, Maria A. Belova^{1,2}, Olga V. Novichenko^{3,1}, Igor A. Nikitin^{2,1}, Hicham Zaroual⁴, Daria D. Vilkova¹

CORRESPONDENCE:

Mikhail N. Kutuzov

E-mail: kutuzov35@gmail.com

FOR CITATIONS:

Kutuzov, M.N., Belova, M.A., Novichenko, O.V., Nikitin, I.A., Zaroual, H., & Vilkova, D.D. (2025). Application of Hyperspectral Imaging and Artificial Intelligence for Freshness Assessment of Fish Raw Material during Refrigerated Storage. *Storage and Processing of Farm Products*, 33(4), 127-142. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.681>

RECEIVED: 04.08.2025

ACCEPTED: 15.12.2025

PUBLISHED: 30.12.2025

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

ACKNOWLEDGMENT

This research was funded by Russian Science Foundation, grant number 23-76-10038, Project title: Development of rapid methods to determine the shelf-life and safety of edible fish raw material based on spectral analysis big data (access: <https://rscf.ru/en/project/23-76-10038/>)

ABSTRACT

Introduction: Monitoring the freshness of refrigerated fish remains one of the persistent difficulties in the fish processing industry. Existing reference methods for assessing refrigerated fish freshness are destructive and inherently unable to reflect the spatial distribution of spoilage markers. Hyperspectral imaging (HSI) has emerged as a powerful non-destructive tool that captures both spatial and spectral data at the pixel scale.

Purpose: The aim of this study is to evaluate the effectiveness of hyperspectral imaging for the binary classification of refrigerated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets into early (≤ 48 h) and late (> 48 h) storage stages.

Materials and Methods: The study was conducted on rainbow trout fillets stored at $+2 \pm 2$ °C for 16 days. Hyperspectral images were acquired using a FigSpec FS-23 camera (spectral range 400–1000 nm). Principal component analysis (PCA) was performed, and a neural network model for binary classification of samples was developed using the TensorFlow framework and the high-level Keras API.

Results: A characteristic nonlinear dynamics of reflectance was observed during storage. PCA showed that the first principal component accounted for 93.8% of the data variance. The neural network model achieved 90% accuracy in binary classification of the samples.

Conclusion: The results demonstrate the potential of hyperspectral imaging as a non-destructive tool for assessing fish freshness. The developed method provides accurate discrimination between fresh and non-fresh samples and can be recommended for adoption in industrial incoming inspection protocols.

KEYWORDS

rainbow trout; hyperspectral imaging; storage; quality; principal component analysis; neural networks; binary classification



ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг свежести охлажденной рыбы в режиме реального времени остается одной из наиболее сложных задач для рыбоперерабатывающей отрасли. Высокая скорость порчи, обусловленная активностью аутохтонной микрофлоры и ферментативными процессами, приводит к значительным экономическим потерям и создает риски для потребителей. Согласно ГОСТ 814-2019¹, рекомендуемый срок хранения охлажденной рыбы во льду составляет не более 10–12 суток в зависимости от сезона, способа разделки и типа упаковки, однако фактический период сохранения свежести является динамической величиной. Он зависит от ряда факторов: исходного состояния сырья, соблюдения холодовой цепи и микробиологических показателей.

Процессы порчи носят гетерогенный характер, приводя к образованию зон с различной степенью деградации. Локальные очаги бактериального обсеменения или окислительной деградации липидов могут возникать быстрее глобального ухудшения качества продукта. Как отмечают Tahsin et al. (2017) и Абрамова et al., (2018), традиционные методы оценки свежести рыбы, такие как микробиологические посеvy, определение летучих оснований, перекисного числа и др., являются деструктивными, требуют много времени и не отражают пространственную неоднородность продукта. Важность учета пространственной неоднородности порчи была продемонстрирована в исследовании на филе лосося, где гиперспектральная визуализация выявила значительные различия в скорости деградации между головной и хвостовой частями, причем периферийные области хвоста подвергались порче быстрее (Hardy et al., 2024). Это приводит к принятию решений на основе усредненных данных и повышает риски поставки небезопасной продукции (Донскова, 2023). По данным Роспотребнадзора, около 18% рыбной продукции на рынке не соответствует санитарным требованиям (Воробьев, 2021). В связи с вышесказанным актуальной задачей является разработка неинвазивных методов, позволяющих оперативно оценивать качество и безопасность рыбной продукции на всех этапах логистической цепочки.

В последние годы активно развиваются программно-аппаратные системы на основе биосенсоров, компьютерного зрения и искусственного интеллекта, позволяющие сократить время анализа с нескольких суток до минут (García et al., 2022; Hardy et al., 2024). Как отмечено в недавнем обзоре, к таким перспективным «искусственным чувствам» относятся гиперспектральная визуализация (HyperSpectral Imaging, HSI), электронные носы и языки, причем компьютерное зрение (включая HSI) является единственным методом, обеспечивающим полностью неразрушающий контроль (Madhubhashini et al., 2024; M.-F. Cheng et al., 2025). Особый интерес представляют портативные устройства, сочетающие простоту эксплуатации с высокой аналитической надежностью.

Метод гиперспектральной визуализации интегрирует возможности визуализации и спектроскопии, позволяя получать пространственную и спектральную информацию для каждого пикселя изображения. В отличие от точечной абсорбционной спектроскопии, HSI обеспечивает визуализацию композиционного распределения в образце с высоким разрешением, что особенно эффективно для анализа гетерогенных объектов, таких как охлажденная рыба (Pulcini et al., 2021; Sun et al., 2023). Как отмечено в обзоре (Zhang et al., 2022), гиперспектральная визуализация демонстрирует большой потенциал для быстрого и неинвазивного анализа свежести и общего качества рыбы.

HSI успешно применяется для оценки качества и безопасности различных пищевых продуктов, включая мясо (Jiang et al., 2019; Cheng et al., 2019), морепродукты (Dai et al., 2016; Chen et al., 2021; Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019a), фрукты и овощи (Lu et al., 2020; Naqvi et al., 2025). Для рыбного сырья продемонстрирована высокая корреляция спектральных данных с ключевыми показателями свежести, такими как содержание летучих оснований (TVB-N), величина ТВАРС, количество мезофильных микроорганизмов (КМАФАнМ), сенсорные характеристики (Kim et al., 2024; Moosavi-Nasab et al., 2021; Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c). Однако детальное изучение пространственно-временной динамики этих изменений на протяжении всего срока хранения, а также разработка на её основе точных

¹ Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. (2019). *Рыба охлажденная. Технические условия (ГОСТ 814–2019)*. <https://docs.cntd.ru/document/1200167776>

прогностических моделей остаются актуальными направлениями исследований. Кроме того, данный метод перспективен для создания портативных систем в условиях реального времени при непосредственном использовании на производстве и в магазинах розничной торговли.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности использования гиперспектральной визуализации для бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по признаку раннего (до 48 ч) или позднего (более 48 ч) срока хранения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Исследование проводилось на филе радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), выращенной в условиях аквакультуры на одном из рыбноводных предприятий Подмосковья. Транспортировка рыбы в лабораторию осуществлялась в изотермических контейнерах со льдом в течение 2 ч. После доставки образцы промывали проточной водой для удаления слизи и разделявали на филе. Подготовленные образцы филе помещали в изотермические контейнеры со льдом и хранили в холодильной камере при температуре $+2 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 16 суток. Методы и инструменты

Для получения изображений использовали гиперспектральную камеру FigSpec FS-23 (Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd, Китай). Съемка проводилась в спектральном диапазоне 400–1000 нм. Согласно технической спецификации, камера регистрирует данные в 1200 спектральных каналах с разрешением (FWHM) 2,5 нм и использует CMOS-детектор. Угол поля зрения объектива составлял 25° . Расстояние от объектива камеры до образца устанавливалось в диапазоне 65–70 см. Для равномерного освещения использовали галогенный прожектор мощностью 500 Вт (Рисунок 1).

Управление камерой, сбор и предварительная обработка данных осуществлялись с помощью специализированного программного обеспечения FigSpec Cam (Hangzhou CHNSpec Technology Co., Ltd, Китай). Гиперспектральные изображения регистрировались ежедневно в течение 16 дней эксперимента.

Рисунок 1

Гиперспектральная камера FigSpec FS-23

Figure 1

Hyperspectral Camera FigSpec FS-23



Примечание. А – внешний вид камеры FigSpec FS-23; Б – тестирование камеры на пробном объекте для подбора параметров съемки

Note. A – External view of the FigSpec FS-23 camera. B – Camera calibration on a test specimen for imaging parameter optimization

Перед каждой сессией съемки выполнялась калибровка по белому эталону.

Для снижения вычислительной нагрузки и упрощения последующей обработки объем данных уменьшали. Количество спектральных каналов в исходных гиперспектральных изображениях было уменьшено с 1200 до 300 путем усреднения данных каждых четырех соседних каналов.

Предобработка спектральных данных

Для исключения фонового сигнала и шума при анализе данных для каждого гиперспектрального изображения создавалась маска области интереса (Region of Interest – ROI), соответствующая мышечной ткани без учета краевых артефактов и фона. На основе выделенной ROI для каждого образца строилась тепловая карта с единой шкалой интенсивности отражения, визуализирующая про-

странственное распределение спектрального отклика. Обработка данных выполнялась с использованием библиотек Matplotlib, Spectral и NumPy для языка программирования Python 3.

Метод главных компонент

Для снижения размерности спектральных данных и выявления скрытых закономерностей, связанных с изменением свежести, был применен метод главных компонент (PCA). Входная матрица данных формировалась следующим образом: для каждого образца (отдельное филе в конкретный день хранения) на основе гиперспектрального куба и маски области интереса (ROI) рассчитывался усредненный спектр отражения. Все пиксели внутри ROI усредняли по каждому спектральному каналу, в результате чего получался вектор размерности 300 после объединения исходных 1200 каналов.

С целью удаления шумовых участков, не несущих полезной информации, исключались первые и последние 10% спектральных каналов (по 30 с каждого края). Таким образом, рабочий диапазон сокращался до 240 каналов, соответствующих приблизительно интервалу 440–950 нм. Для подавления высокочастотного шума оставшиеся спектры сглаживались с помощью фильтра Савицкого — Голея со следующими параметрами: длина окна — 11, полином — 2-го порядка.

В результате для каждого из 64 снимков был получен вектор усредненного сглаженного спектра длиной 240. Все векторы объединялись в матрицу X размером 64×240 , где строки соответствовали снимкам, а столбцы — спектральным каналам.

Перед проведением PCA матрица X центрировалась и масштабировалась к единичной дисперсии с помощью метода стандартизации данных StandardScaler библиотеки Scikit-learn для языка программирования Python 3. Это обеспечило равный вклад всех спектральных каналов независимо от абсолютной интенсивности сигнала.

PCA выполнялся с использованием сингулярного разложения (SVD); число сохраняемых компонент было установлено равным 5. Для каждой компоненты вычисляли долю объясненной дисперсии, матрицу счетов (scores) и матрицу нагрузок (loadings).

Машинное обучение

Для бинарной классификации образцов по степени свежести была разработана нейросетевая модель на основе фреймворка TensorFlow и высокоуровневого API Keras. В качестве входных признаков использовались первые пять главных компонент, объясняющие совокупно более 99% общей дисперсии нормализованных данных.

Модель имела следующую архитектуру: входной слой (5 нейронов, соответствующих первым пяти главным компонентам), два скрытых полносвязных слоя (64 и 32 нейрона) с активацией ReLU, слой пакетной нормализации (BatchNormalization) и исключения (Dropout = 0,3). Выходной слой состоял из одного нейрона с сигмоидальной активацией для бинарной классификации.

Обучение проводилось с оптимизатором Adam (learning_rate = 0,001) в течение 100 эпох. Для предотвращения переобучения использовались: ранняя остановка (patience = 10), динамическое уменьшение скорости обучения (ReduceLROnPlateau) и регуляризация (Dropout, BatchNormalization). Данные разделялись на обучающую (70%), валидационную (15%) и тестовую (15%) выборки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка морфологических и физических показателей

Все особи радужной форели соответствовали требованиям, предъявляемым к свежей рыбе. Наружные покровы без повреждений: чешуя блестящая, плотно прилегающая; слизь прозрачная, без крови и постороннего запаха; кожа упругая, с естественной пигментацией; плавники целые. Жабры равномерно красные, чистые; глаза прозрачные, выпуклые, без помутнений. Брюшная стенка не деформирована, анальное отверстие плотно закрыто. Мышечная ткань находилась в стадии выраженного окоченения, что свидетельствует о недавнем забое. Висцеральный жир присутствовал в незначительном количестве, внутренние органы без видимых патологий. Таким образом, исследуемые образцы признаны пригодными для проведения эксперимента.

Динамика спектральных характеристик

В течение 16-дневного эксперимента при хранении в холодильных условиях ежедневно регистрировали гиперспектральные изображения филе радужной форели. Для каждого образца рассчитывали усредненный коэффициент отражения в пределах области интереса (ROI), исключая фоновые участки и краевые артефакты. На Рисунке 2 представлена динамика коэффициента отражения образцов в процессе хранения (диапазон 400–1000 нм).

Установлено, что динамика коэффициента отражения имеет выраженный нелинейный характер. В начальный период хранения (0–1-й день) зафиксированы минимальные значения отражательной способности. В последующие два дня (2–3-й дни) наблюдался интенсивный рост показателя, достигший абсолютного максимума к 4-му дню. В интервале с 5-го по 7-й день спектральная зависимость коэффициента отражения оставалась на относительно стабильном уровне с незначительной тенденцией к снижению. Наиболее существенный спад коэффициента отражения пришелся на 8–10-й день. В заключительной фазе эксперимента (11–15-й день) вновь было зафиксировано устойчивое

увеличение спектральной зависимости коэффициента отражения, приближающееся к значениям, характерным для 4–5-го дня.

Описанная динамика воспроизводилась для всех исследованных образцов, что свидетельствует о типичности выявленных спектральных изменений для филе радужной форели в условиях холодильного хранения.

Метод главных компонент

Для снижения размерности спектральных данных и выявления скрытых закономерностей, связанных с изменением свежести, был применен метод главных компонент (РСА). Входная матрица размером 64×240 формировалась из усредненных и сглаженных спектров отражения всех гиперспектральных изображений.

На Рисунке 3 представлено пространственное распределение образцов. Было установлено, что первая главная компонента (PC1) объясняет 93,8% общей дисперсии нормализованных данных; вторая

Рисунок 2

Динамика коэффициента отражения филе радужной форели в процессе хранения

Figure 2

Change in Reflectance of Rainbow Trout Fillets during storage

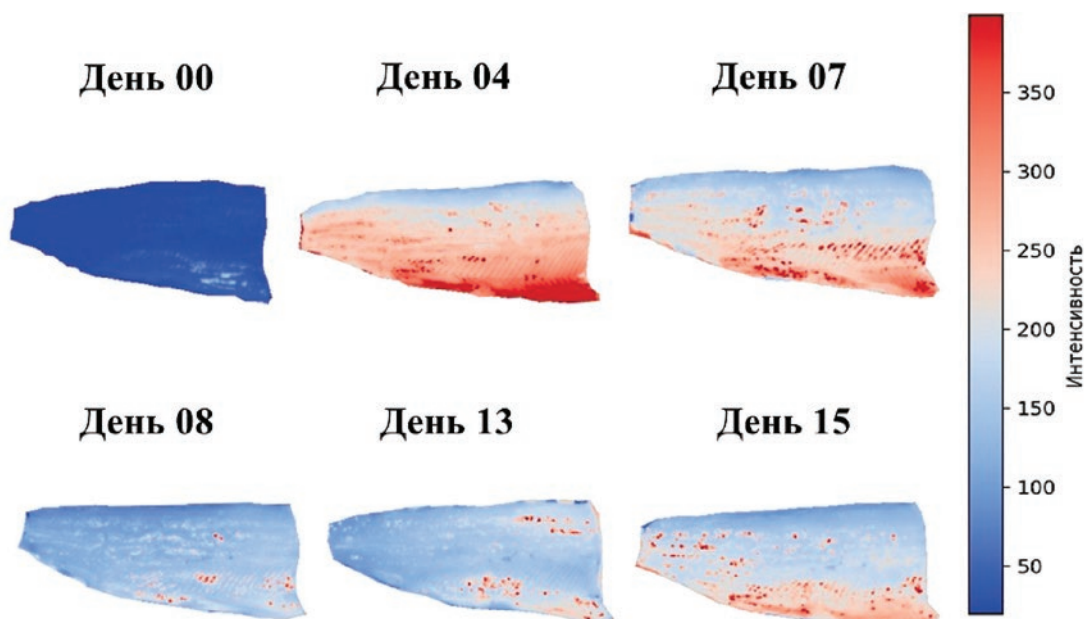
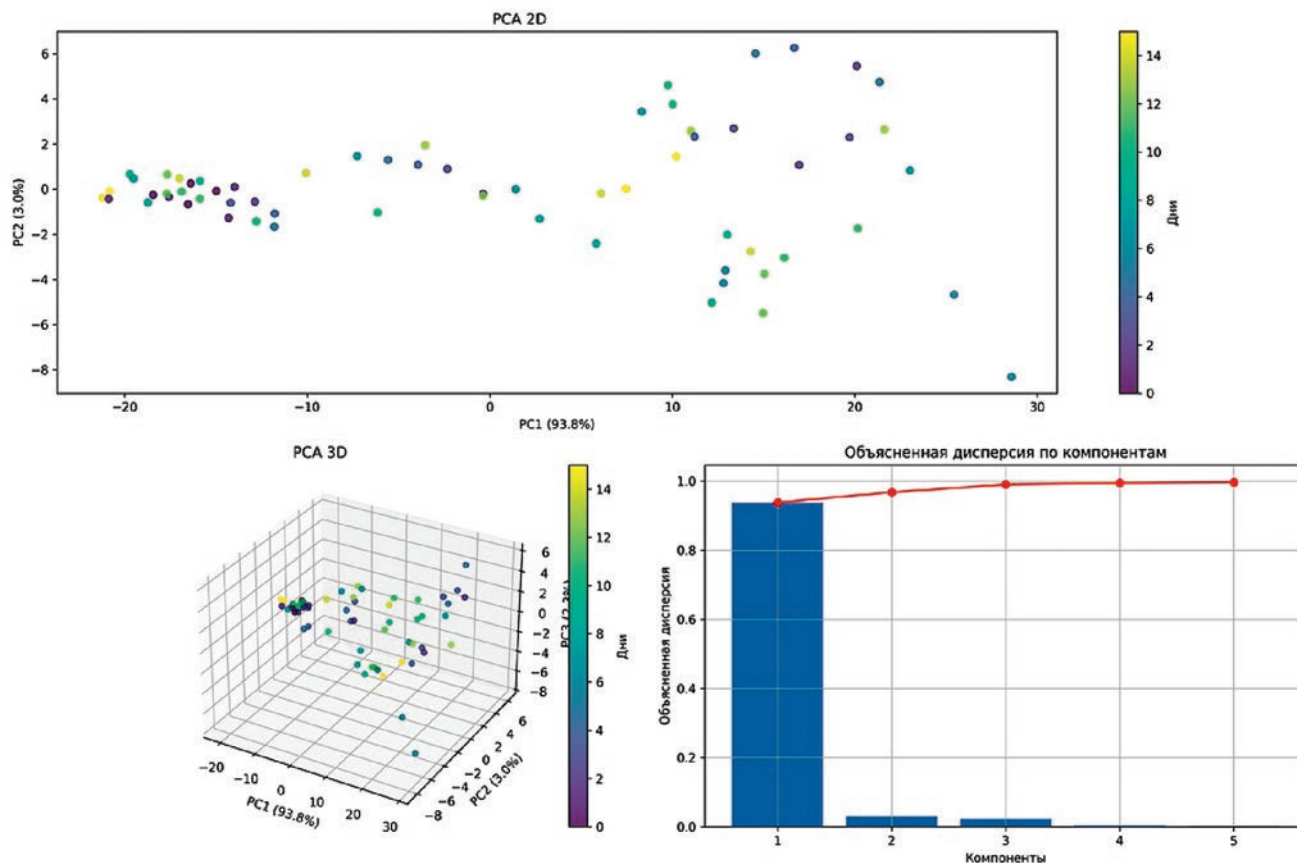


Рисунок 3

PCA-анализ филе радужной форели

Figure 3

Principal Component Analysis (PCA) of Rainbow Trout Fillets



(PC2) и третья (PC3) компоненты вносят вклад 3,0% и 2,3% соответственно.

Совокупный вклад первых трех компонент превышает 99%, что позволяет использовать их для компактного представления исходной спектральной информации без существенных потерь.

Анализ матрицы нагрузок позволил идентифицировать длины волн с наибольшим вкладом в каждую из первых трех главных компонент (Таблица 1). Положительные и отрицательные пики нагрузок соответствуют спектральным диапазонам, где изменения коэффициента отражения максимально коррелируют с данной компонентой.

На Рисунке 4 приведены графики нагрузок первых трех главных компонент, демонстрирующие зависимость весовых коэффициентов от длины волны.

Таблица 1

Длины волн с наибольшими нагрузками в модели PCA

Table 1

Wavelengths with the highest PCA loadings

Компонента	Положительные нагрузки, нм	Отрицательные нагрузки, нм
PC1	668, 670, 672, 690, 692	635, 637, 639, 756, 758
PC2	637, 639, 641, 758, 760	580, 582, 823, 825, 945
PC3	604, 606, 608, 610, 851	542, 544, 546, 548, 910

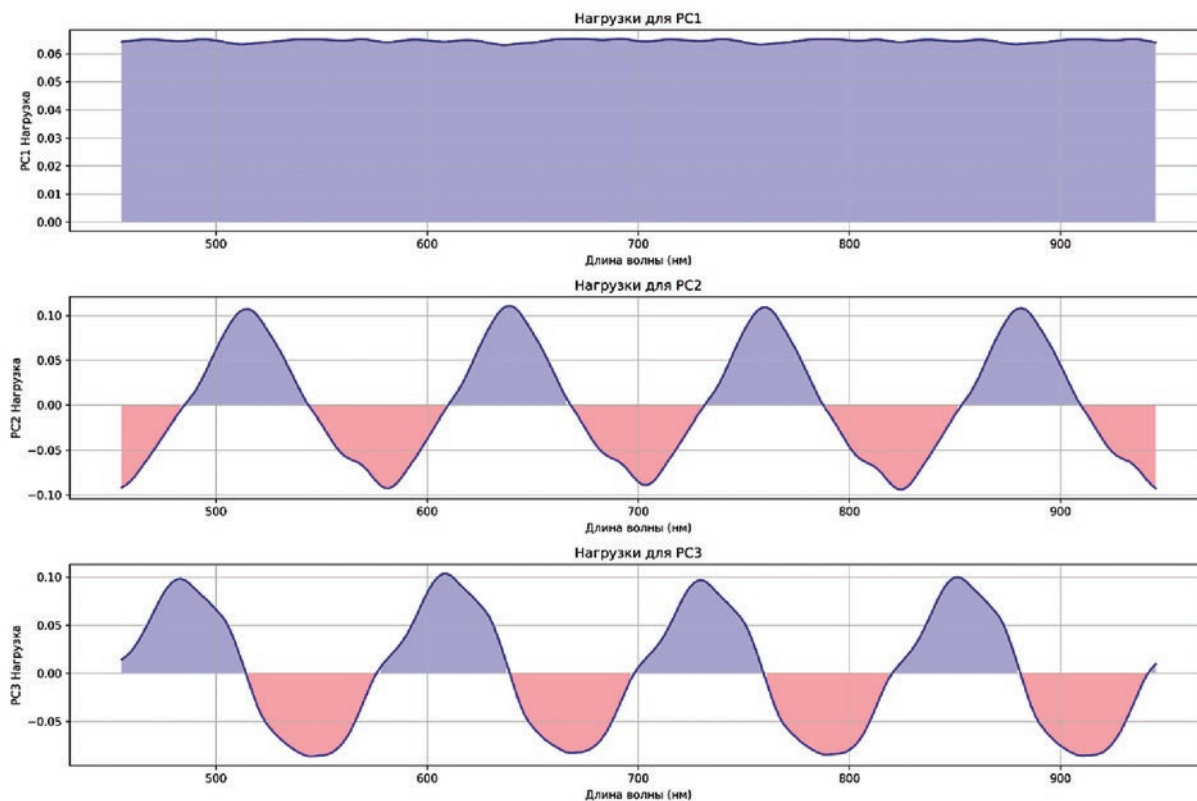
Анализ показал, что наиболее значимые для дифференциации образцов спектральные области сосредоточены в диапазонах 540–700 нм (видимый свет) и 750–950 нм (ближний инфракрасный диапазон).

Рисунок 4

График нагрузок первых трех главных компонент

Figure 4

Loadings of the First Three Principal Components



Нейросетевая модель

Для автоматизации определения свежести филе на основе спектральных данных была разработана нейросетевая модель бинарной классификации. В качестве входных признаков использовались первые пять главных компонент (PC1–PC5), полученные в результате PCA и объясняющие более 99 % дисперсии исходных спектров. Выборка из 64 образцов была разделена на обучающую (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) выборки. Архитектура модели включала два скрытых полносвязных слоя (64 и 32 нейрона) с активацией ReLU, слой пакетной нормализации и dropout (0,3) для предотвращения переобучения.

На тестовой выборке при дифференциации образцов раннего (0–1 сутки) и позднего (2–15 суток) сроков хранения модель достигла 90 % точности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Настоящее исследование демонстрирует потенциал гиперспектральной визуализации для отслеживания биохимических изменений в филе радужной форели в процессе холодильного хранения. Ключевые изменения спектральных характеристик были зафиксированы и статистически интерпретированы с помощью анализа главных компонент (PCA).

Наблюдаемая нелинейная динамика коэффициента отражения (Рисунок 2) показывает сложные посмертные процессы в мышечной ткани. Первоначально низкие значения (0–1 сутки), вероятно, связаны с доминированием поглощения света миоглобином в его восстановленной форме и высокой общей влажностью поверхности, минимизирующей рассеяние света. Последующий резкий рост коэффициента отражения, достигший пика к 4-м суткам, может быть обусловлен комплексом факторов: начальным окислением миоглобина в метмиогло-

бин, изменением светорассеяния из-за деградации белкового матрикса и, что наиболее существенно, первичным окислением липидов с образованием гидропероксидов, которые влияют на оптические свойства тканей (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019a). Снижение показателя на 8–10-е сутки, за которым следует новый рост на 11–15-е сутки, соответствует переходу к стадии вторичного окисления липидов, характеризующейся накоплением карбонильных соединений (альдегидов, кетонов), и активным развитием микробиологической порчи, что приводит к значительному изменению химического состава и, соответственно, спектрально-го отклика продукта.

Аналогичные изменения спектральных характеристик в видимой и ближней ИК-областях, связанные с микробной порчей, были ранее зафиксированы при исследовании филе радужной форели (Khoshnoudi-Nia et al., 2018). Авторы этой работы также отмечали высокую корреляцию отдельных длин волн с содержанием КМАФАнМ.

Наблюдаемые нами изменения согласуются с данными других исследований, где основным дискриминатором между свежими и испорченными участками филе лосося также было ослабление полосы поглощения в области ~600 нм, связанное с изменениями в пигментации (Hardy et al., 2024).

Анализ главных компонент подтвердил, что основная спектральная изменчивость (93,8%) описывается первой компонентой (PC1). Столь высокий вклад PC1 указывает на доминирование одного фактора, определяющего изменения при хранении. С высокой долей вероятности им является процесс окисления липидов (Xu et al., 2016). Значимость второй и третьей компонент (3,0% и 2,3% соответственно), несмотря на их малый вклад, свидетельствует о наличии дополнительных, более тонких процессов, таких как изменения в гидратации ткани и микробная активность (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b).

Выявленные диапазоны длин волн с наибольшими нагрузками (Таблица 1) соответствуют известным биохимическим маркерам порчи. Положительные нагрузки PC1 в области 668–692 нм с высокой вероятностью связаны с окислением миоглобина (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b). Спектральные изменения в видимой об-

ласти (400–600 нм), зафиксированные в нашем исследовании, перекрываются с зонами поглощения ключевых пигментов рыбы, таких как астаксантин. Данная область ранее использовалась для его количественного определения с помощью мультиспектральной визуализации (Dissing et al., 2011). Это подтверждает, что наблюдаемые нами спектральные сдвиги являются комплексным откликом на несколько взаимосвязанных процессов порчи, включая изменения в пигментации.

Отрицательные нагрузки PC2 в областях ~825 нм и ~945 нм могут указывать на вторичные продукты окисления липидов и валентные колебания связей O—H и C—H (Qin et al., 2020). Данное предположение подтверждается исследованиями, проведенными на образцах рыбного филе, где пики в близких спектральных областях (~930 нм и ~1220 нм) были однозначно идентифицированы как третья гармоника растяжения C—H растяжения в метиленовой группе жира и вторая гармоника растяжения связи C—H жира соответственно (Chen et al., 2021). Диапазоны, ассоциированные с PC3, возможно, отражают изменения, связанные с содержанием влаги и микробной активностью (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019b).

Пространственный анализ гиперспектральных изображений выявил четкую корреляцию между распределением липидов и спектральной зависимостью коэффициента отражения, при этом периферийные области образцов подвергались порче быстрее. Аналогичные данные с использованием мультиспектральной визуализации фиксировали авторы других исследований (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c). Полученные результаты согласуются с фундаментальными исследованиями, демонстрирующими тесную связь между спектральными свойствами поверхности форели и ее биохимическим составом, включая текстуру мышечной ткани, которая также может быть оценена с помощью гиперспектральной визуализации, что подтверждает возможность косвенной оценки сложных показателей свежести через анализ оптических характеристик (Dissing et al., 2011).

Установлено, что зоны с максимальным коэффициентом отражения соответствуют участкам с высоким содержанием жира, в частности теще. Это согласуется с оптическими свойствами тканей: липиды, как правило, обладают более высоким

коэффициентом отражения по сравнению с мышечными белками (Qin et al., 2020; Rye, 1991). Наличие жировых включений формирует характерный «мраморный» рисунок на тепловых картах, при этом именно в этих зонах, вероятно, протекают наиболее интенсивные процессы окисления.

Полученные результаты достоверны и согласуются с данными других исследований. Так, в работе на группе (Chen et al., 2021) была продемонстрирована высокая эффективность HSI в сочетании с методами PLS-DA и регрессии для классификации свежести и предсказания времени хранения, что подтверждает универсальность подхода для разных видов рыб. Это косвенно подтверждает, что наблюдаемые нами изменения коэффициента отражения являются универсальным индикатором биохимических преобразований в рыбном сырье.

Высокая точность бинарной классификации на уровне 90%, полученная с помощью нейросетевой модели, подтверждает, что метод гиперспектральной визуализации в сочетании с PCA позволяет выявить релевантные изменения в спектральных характеристиках между свежими и несвежими образцами. Разработанная нейросетевая модель демонстрирует потенциал глубокого обучения для задач контроля качества рыбной продукции, что совпадает с исследованиями, где глубокие нейронные сети успешно применялись для регрессионного прогнозирования показателей свежести (Moosavi-Nasab et al., 2021).

Полученный результат имеет важное прикладное значение, поскольку задача оперативного разделения сырья по сроку хранения является одной из наиболее востребованных при входном контроле на перерабатывающих предприятиях.

Ограничения исследования

Представленные результаты получены в лабораторных условиях на ограниченной выборке образцов филе радужной форели, полученных от одного аквакультурного предприятия, что не позволяет в полном объеме оценить влияние варибельности сырья и производственных факторов на воспроизводимость классификационной модели. Нейросетевая модель продемонстрировала точность 90% на тестовой выборке, однако её обобщающая спо-

собность требует дополнительной валидации на независимых данных. Прямая корреляция спектральных признаков с референтными биохимическими и микробиологическими показателями в работе не устанавливалась, поэтому интерпретация изменений как маркеров порчи носит предварительный характер. Метод отработан в стабильных лабораторных условиях; для внедрения в производство необходима адаптация к технологической среде (скорость конвейера, освещение, температурный режим) и разработка промышленного прототипа мультиспектральной системы. Перечисленные ограничения обозначают направления дальнейших исследований: расширение выборки, внешняя валидация, верификация референтными методами и опытно-промышленная апробация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокий потенциал метода гиперспектральной визуализации в сочетании с хемометрическим анализом для неразрушающего контроля свежести охлажденного филе радужной форели.

Установлено, что в процессе хранения наблюдается характерная динамика коэффициента отражения, имеющая нелинейный характер. Наименьшие значения были зафиксированы в начальный период до 48 ч (0–1-е сутки), что позволяет уверенно дифференцировать свежие образцы. Последующие изменения коэффициента отражения (рост к 4-м суткам, спад и новый рост на поздних этапах) статистически значимо связаны с ключевыми стадиями порчи: первичным и вторичным окислением липидов, денатурацией белков и развитием микробной активности, что согласуется с исследованиями, демонстрирующими тесную связь между спектральными свойствами и биохимическим составом рыбного сырья (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-Nasab, 2019c).

Метод главных компонент (PCA) позволил идентифицировать ключевые спектральные диапазоны, несущие наибольшую информацию для дифференциации образцов. Высокий вклад первой главной компоненты (93,8%) свидетельствует о доминировании единого фактора, определяющего изменения при хранении, — процесса окисления липидов. При этом вклад последующих компонент подтверждает наличие дополнительных, хотя и менее выражен-

ных, процессов, таких как изменение влажности и микробная порча.

Для решения задачи экспресс-контроля качества была разработана нейросетевая модель бинарной классификации образцов охлажденного филе радужной форели по сроку хранения. Модель продемонстрировала точность 90% в дифференциации объектов с периодом хранения до 48 ч и более 48 ч, что подтверждает её прикладную ценность для использования в технологическом цикле.

Результаты работы позволяют рекомендовать метод гиперспектральной визуализации для внедрения в систему входного контроля на предприятиях рыбоперерабатывающей отрасли, особенно в случаях, когда срок от вылова до переработки не должен превышать 48 ч. Использование данной технологии позволит перейти от выборочного деструктивного анализа к неразрушающему мониторингу качества сырья. Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие разработанного подхода в сторону мультиспектральной системы, способной одновременно оценивать несколько показателей свежести, что позволит перейти к комплексной автоматизированной оценке качества сырья.

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Кутузов Михаил Николаевич: Формальный анализ; Разработка программного обеспечения; Визуализация; Валидация результатов; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

Белова Мария Алексеевна: Разработка методологии; Проведение исследования; Написание черновика рукописи

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамова, Л. С., Козин, А. В., Погребисская (Азарова), А. Л. (2018). Методы оценки качества пищевой рыбной продукции. *Контроль Качества Продукции*, 6, 25–31.
- Воробьев, В. В. (2021). Стратегические аспекты устойчивого развития рыбохозяйственного комплекса России. *Рыбное Хозяйство*, 5, 23–29. <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-5-23-29>
- Донскова, Л. А. (2023). Потери в рыбном секторе в контексте устойчивого развития: обеспечение качества и безопасности как факторы снижения. *Экономика и Бизнес: Теория и Практика*, 2 (96), 136–141. <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-2-136-141>

Новиченко Ольга Викторовна: Формальный анализ; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

Никитин Игорь Алексеевич: Разработка концепции; Курирование данных

Хишам Заруал: Формальный анализ; Разработка методологии; Разработка концепции

Вилкова Дарья Дмитриевна: Административное руководство исследовательским проектом; Получение финансирования; Разработка методологии; Проведение исследования; Написание рукописи – рецензирование и редактирование

AUTHOR'S CONTRIBUTION

Kutuzov Mikhail Nikolaevich: Formal Analysis; Software; Visualization; Validation; Writing – Review & Editing

Belova Maria Alexeevna: Methodology; Investigation; Writing – Original Draft Preparation

Novichenko Olga Victorovna: Formal Analysis; Writing – Review & Editing

Nikitin Igor Alexeevich: Conceptualization; Data Curation

Zaroual Hicham: Formal Analysis; Methodology; Conceptualization

Vilkova Daria Dmitrievna: Project Administration; Funding Acquisition; Methodology; Investigation; Writing – Review & Editing

- Chen, Z., Wang, Q., Zhang, H., & Nie, P. (2021). Hyperspectral imaging (HSI) technology for the non-destructive freshness assessment of pearl gentian grouper under different storage conditions. *Sensors*, 21(2), 583. <https://doi.org/10.3390/s21020583>
- Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., & Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), 170. <https://doi.org/10.3390/technologies13050170>
- Cheng, W., Sørensen, K. M., Engelsens, S. B., Sun, D.-W., & Pu, H. (2019). Lipid oxidation degree of pork meat during frozen storage investigated by near-infrared hyperspectral imaging: Effect of ice crystal growth and distribution. *Journal of Food Engineering*, 263, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.013>
- Dai, Q., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Pu, H. (2016). Prediction of total volatile basic nitrogen contents using wavelet features from visible/near-infrared hyperspectral images of prawn (*Metapenaeus ensis*). *Food Chemistry*, 197, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.073>
- Dissing, B. S., Nielsen, M. E., Ersbøll, B. K., & Frosch, S. (2011). Multispectral Imaging for determination of astaxanthin concentration in salmonids. *PLoS ONE*, 6(5), e19032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019032>
- García, M. R., Ferez-Rubio, J. A., & Vilas, C. (2022). Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: A review. *Foods*, 11(15), 2312. <https://doi.org/10.3390/foods11152312>
- Hardy, M., Moser, B., Haughey, S. A., & Elliott, C. T. (2024). Does the fish rot from the head? Hyperspectral imaging and machine learning for the evaluation of fish freshness. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 245(105059). <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.105059>
- Jiang, H., Wang, W., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Yang, Y., & Zhao, X. (2019). Hyperspectral imaging for a rapid detection and visualization of duck meat adulteration in beef. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2205–2215. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01577-6>
- Kamani, M. H., Safari, O., Mortazavi, S. A., Mehraban Sang Atash, M., & Azghadi, N. M. (2017). Using an image processing based technique and predictive models for assessing lipid oxidation in rainbow trout fillet. *Food Bioscience*, 19, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.05.005>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019a). Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1875–1883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1043>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019b). Nondestructive determination of microbial, biochemical, and chemical changes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage using hyperspectral imaging technique. *Food Analytical Methods*, 12, 1635–1647. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01494-8>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019c). Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Scientific Reports*, 9, 14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
16. Khoshnoudi-Nia, S., Moosavi-Nasab, M., Nassiri, S. M., & Azimifar, Z. (2018). Determination of total viable count in rainbow-trout fish fillets based on hyperspectral imaging system and different variable selection and extraction of reference data methods. *Food Analytical Methods*, 11(8), 2220–2233. <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1320-0>
- Khoshtaghaza, M. H., Khojastehnazhand, M., Mojaradi, B., Goodarzi, M., & Saeys, W. (2016). Texture quality analysis of rainbow trout using hyperspectral imaging method. *International Journal of Food Properties*, 19(5), 974–983. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042111>
- Kim, S. S., Yun, D.-Y., Lee, G., Park, S.-K., Lim, J.-H., Choi, J.-H., Park, K.-J., & Cho, J. S. (2024). Prediction and visualization of total volatile basic nitrogen in yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) using shortwave infrared hyperspectral imaging. *Foods*, 13(20), 3228. <https://doi.org/10.3390/foods13203228>
- Lu, Y., Saeys, W., Kim, M., Peng, Y., & Lu, R. (2020). Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>

- Madhubhashini, M. N., Liyanage, C. P., Alahakoon, A. U., & Liyanage, R. P. (2024). Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness determination: A review. *Journal of Food Science*, 89(1), 33–50. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16865>
- Moosavi-Nasab, M., Khoshnoudi-Nia, S., Azimifar, Z., & Kamyab, S. (2021). Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 5094. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y>
- Naqvi, L. H., Balasubramaniam, B., Li, J., Liu, L., & Li, B. (2025). Four-dimensional hyperspectral imaging for fruit and vegetable grading. *Agriculture*, 15(15), 1702. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151702>
- Pulcini, D., Capoccioni, F., Franceschini, S., Martinoli, M., Faccenda, F., Secci, G., Perugini, A., Tibaldi, E., & Parisi, G. (2021). Muscle pigmentation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets rich in natural carotenoids from microalgae and crustaceans. *Aquaculture*, 543. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de34e46eef00c2ce9ff25b>
- Qin, J., Vasefi, F., Hellberg, R. S., Akhbardeh, A., Isaacs, R. B., Yilmaz, A. G., Hwang, C., Baek, I., Schmidt, W. F., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish fillet substitution and mislabeling using multimode hyperspectral imaging techniques. *Food Control*, 114, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107234>
- Rye, M. (1991). Prediction of carcass composition in Atlantic salmon by computerized tomography. *Aquaculture*, 99(1), 35–48. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90286-G](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90286-G)
- Sun, D., Zhou, C., Hu, J., Li, L., & Ye, H. (2023). Off-flavor profiling of cultured salmonids using hyperspectral imaging combined with machine learning. *Food Chemistry*, 408, 135166. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135166>
- Tahsin, K.N., Soad, A.R., Ali, A.M., & Moury, I.J. (2017). A review on the techniques for quality assurance of fish and fish products. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7), 4190–4206. <https://www.ijarset.com/upload/2017/july/5-IJARSET-KAZI.pdf>
- Wang, C., Wang, S., He, X., Wu, L., Li, Y., & Guo, J. (2020). Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction and visualization of palmitic acid and oleic acid contents in lamb meat. *Meat Science*, 169, 108194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108194>
- Xu, J.-L., Riccioli, C., & Sun, D.-W. (2016). Efficient integration of particle analysis in hyperspectral imaging for rapid assessment of oxidative degradation in salmon fillet. *Journal of Food Engineering*, 169, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.015>
- Yao, K., Sun, J., Zhou, X., Nirere, A., Tian, Y., & Wu, X. (2020). Nondestructive detection for egg freshness grade based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7) <https://doi.org/10.1111/jfpe.13422>
- Zhang, Z., Sun, Y., Sang, S., Jia, L., & Ou, C. (2022). Emerging approach for fish freshness evaluation: Principle, application and challenges. *Foods*, 11(13), 1897. <https://doi.org/10.3390/foods11131897>

REFERENCES

- Abramova, L. S., Kozin, A. V., Pogrebisskaya (Azarova), A. L. (2018). Metody` ochenki kachestva pishhevoj ry`bnoj produkcii. *Kontrol` Kachestva Produkcii*, 6, 25–31. (In Russ.).
- Vorobyov, V. V. (2021). Strategic aspects of sustainable development fisheries complex of Russia. *Fisheries*, 5, 23–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.37663/0131-6184-2021-5-23-29>
- Donskova, L.A. (2023). Losses in the fishing sector in the context of sustainable development: Ensuring quality and safety as factors of reduction. *Economy and Business: Theory and Practice*, 2(96), 136–141. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2411-0450-2023-2-136-141>
- Chen, Z., Wang, Q., Zhang, H., & Nie, P. (2021). Hyperspectral imaging (HSI) technology for the non-destructive freshness assessment of pearl gentian grouper under different storage conditions. *Sensors*, 21(2), 583. <https://doi.org/10.3390/s21020583>

- Cheng, M.-F., Mukundan, A., Karmakar, R., Valappil, M. A. E., Jouhar, J., & Wang, H.-C. (2025). Modern trends and recent applications of hyperspectral imaging: A review. *Technologies*, 13(5), 170. <https://doi.org/10.3390/technologies13050170>
- Cheng, W., Sørensen, K. M., Engelsen, S. B., Sun, D.-W., & Pu, H. (2019). Lipid oxidation degree of pork meat during frozen storage investigated by near-infrared hyperspectral imaging: Effect of ice crystal growth and distribution. *Journal of Food Engineering*, 263, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.013>
- Dai, Q., Cheng, J.-H., Sun, D.-W., Zhu, Z., & Pu, H. (2016). Prediction of total volatile basic nitrogen contents using wavelet features from visible/near-infrared hyperspectral images of prawn (*Metapenaeus ensis*). *Food Chemistry*, 197, 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.073>
- Dissing, B. S., Nielsen, M. E., Ersbøll, B. K., & Frosch, S. (2011). Multispectral Imaging for determination of astaxanthin concentration in salmonids. *PLoS ONE*, 6(5), e19032. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019032>
- García, M. R., Ferez-Rubio, J. A., & Vilas, C. (2022). Assessment and prediction of fish freshness using mathematical modelling: A review. *Foods*, 11(15), 2312. <https://doi.org/10.3390/foods11152312>
- Hardy, M., Moser, B., Haughey, S. A., & Elliott, C. T. (2024). Does the fish rot from the head? Hyperspectral imaging and machine learning for the evaluation of fish freshness. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 245(105059). <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2023.105059>
- Jiang, H., Wang, W., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Yang, Y., & Zhao, X. (2019). Hyperspectral imaging for a rapid detection and visualization of duck meat adulteration in beef. *Food Analytical Methods*, 12(10), 2205–2215. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01577-6>
- Kamani, M. H., Safari, O., Mortazavi, S. A., Mehraban Sang Atash, M., & Azghadi, N. M. (2017). Using an image processing based technique and predictive models for assessing lipid oxidation in rainbow trout fillet. *Food Bioscience*, 19, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2017.05.005>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019a). Comparison of various chemometric analysis for rapid prediction of thiobarbituric acid reactive substances in rainbow trout fillets by hyperspectral imaging technique. *Food Science & Nutrition*, 7(4), 1875–1883. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1043>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019b). Nondestructive determination of microbial, biochemical, and chemical changes in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during refrigerated storage using hyperspectral imaging technique. *Food Analytical Methods*, 12, 1635–1647. <https://doi.org/10.1007/s12161-019-01494-8>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019c). Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Scientific Reports*, 9, 14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
- Khoshtaghaza, M. H., Khojastehnazhand, M., Mojaradi, B., Goodarzi, M., & Saeys, W. (2016). Texture quality analysis of rainbow trout using hyperspectral imaging method. *International Journal of Food Properties*, 19(5), 974–983. <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1042111>
- Kim, S. S., Yun, D.-Y., Lee, G., Park, S.-K., Lim, J.-H., Choi, J.-H., Park, K.-J., & Cho, J.-S. (2024). Prediction and visualization of total volatile basic nitrogen in yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) using shortwave infrared hyperspectral imaging. *Foods*, 13(20), 3228. <https://doi.org/10.3390/foods13203228>
- Lu, Y., Saeys, W., Kim, M., Peng, Y., & Lu, R. (2020). Hyperspectral imaging technology for quality and safety evaluation of horticultural products: A review and celebration of the past 20-year progress. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111318. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111318>

- Madhubhashini, M. N., Liyanage, C. P., Alahakoon, A. U., & Liyanage, R. P. (2024). Current applications and future trends of artificial senses in fish freshness determination: A review. *Journal of Food Science*, 89(1), 33–50. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16865>
- Moosavi-Nasab, M., Khoshnoudi-Nia, S., Azimifar, Z., & Kamyab, S. (2021). Evaluation of the total volatile basic nitrogen (TVB-N) content in fish fillets using hyperspectral imaging coupled with deep learning neural network and meta-analysis. *Scientific Reports*, 11(1), 5094. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84659-y>
- Naqvi, L. H., Balasubramaniam, B., Li, J., Liu, L., & Li, B. (2025). Four-dimensional hyperspectral imaging for fruit and vegetable grading. *Agriculture*, 15(15), 1702. <https://doi.org/10.3390/agriculture15151702>
- Pulcini, D., Capoccioni, F., Franceschini, S., Martinoli, M., Faccenda, F., Secci, G., Perugini, A., Tibaldi, E., & Parisi, G. (2021). Muscle pigmentation in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets rich in natural carotenoids from microalgae and crustaceans. *Aquaculture*, 543. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de34e46eef00c2ce9ff25b>
- Qin, J., Vasefi, F., Hellberg, R. S., Akhbardeh, A., Isaacs, R. B., Yilmaz, A. G., Hwang, C., Baek, I., Schmidt, W. F., & Kim, M. S. (2020). Detection of fish fillet substitution and mislabeling using multimode hyperspectral imaging techniques. *Food Control*, 114, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107234>
- Rye, M. (1991). Prediction of carcass composition in Atlantic salmon by computerized tomography. *Aquaculture*, 99(1), 35–48. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(91\)90286-G](https://doi.org/10.1016/0044-8486(91)90286-G)
- Sun, D., Zhou, C., Hu, J., Li, L., & Ye, H. (2023). Off-flavor profiling of cultured salmonids using hyperspectral imaging combined with machine learning. *Food Chemistry*, 408, 135166. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135166>
- Tahsin, K.N.; Soad, A.R.; Ali, A.M.; Moury, I.J. (2017). A review on the techniques for quality assurance of fish and fish products. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 4(7), 4190–4206. <https://www.ijarset.com/upload/2017/july/5-IJARSET-KAZI.pdf>
- Wang, C., Wang, S., He, X., Wu, L., Li, Y., & Guo, J. (2020). Combination of spectra and texture data of hyperspectral imaging for prediction and visualization of palmitic acid and oleic acid contents in lamb meat. *Meat Science*, 169, 108194. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108194>
- Xu, J.-L., Riccioli, C., & Sun, D.-W. (2016). Efficient integration of particle analysis in hyperspectral imaging for rapid assessment of oxidative degradation in salmon fillet. *Journal of Food Engineering*, 169, 259–271. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.015>
- Yao, K., Sun, J., Zhou, X., Nirere, A., Tian, Y., & Wu, X. (2020). Nondestructive detection for egg freshness grade based on hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, 43(7) <https://doi.org/10.1111/jfpe.13422>
- Zhang, Z., Sun, Y., Sang, S., Jia, L., & Ou, C. (2022). Emerging approach for fish freshness evaluation: Principle, application and challenges. *Foods*, 11(13), 1897. <https://doi.org/10.3390/foods11131897>

ОБ АВТОРАХ

Михаил Николаевич Кутузов, научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-9782>, Scopus ID: 58868237500, SPIN-код: 6578-1392, kutuzov35@gmail.com

Мария Алексеевна Белова, младший научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), аспирант Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова (115054, Российская Федерация, Московская область, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6466-3854>, Scopus ID: 58164533700, Researcher ID: HKN-1441-2023, SPIN-код: 4562-1661, mabelova@chsu.ru

Ольга Викторовна Новиченко, канд. технич. наук, доцент кафедры биотехнологии, аквакультуры, почвоведения и управления земельными ресурсами Астраханского государственного университета им. В. Н. Татищева (414056, Российская Федерация, Астраханская область, г. Астрахань, ул. Татищева, д. 20А), ведущий научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4282-9728>, Scopus ID: 55996873800, Researcher ID: AAU-9650-2021, SPIN-код: 7656-9566, ollevi@bk.ru

Игорь Алексеевич Никитин, д-р технич. наук, заведующий кафедрой пищевых технологий и биоинженерии Российского экономического университета им. Г. В. Плеханова (115054, Российская Федерация, Москва, Стремянный переулок, д. 36), главный научный сотрудник кафедры биологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-5911>, Scopus ID: 57208018552, Researcher ID: B-3266-2017, SPIN-код: 9342-6517, nikito.igor@gmail.com

Хишам Заруал, PhD, проф., доцент факультета наук и технологий университета Абдула Малика Аль Саади (93000, Марокко, г. Тетуан, Quartier M'haneche II, avenue 9 Avril, B.P. 2117), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-5354>, Scopus ID: 57211598033, aa.hzaroual@gmail.com

Вилкова Дарья Дмитриевна, PhD инженер биологических систем, ведущий научный сотрудник кафедры биологии, заведующий лабораторией прикладной биотехнологии Череповецкого государственного университета (162600, Российская Федерация, Вологодская область, г. Череповец, пр. Советский, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-8709>, Scopus ID: 57212526679, Researcher ID: GVT-8608-2022, SPIN-код: 1912-6020, dariavilkova333@gmail.com

ABOUT THE AUTHORS

Mikhail Nikolaevich Kutuzov, Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1330-9782>, Scopus ID: 58868237500, SPIN-код: 6578-1392, kutuzov35@gmail.com

Maria Alexeevna Belova, Junior Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), postgraduate student, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny Lane, Moscow, Moscow region, 115054, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6466-3854>, Scopus ID: 58164533700, Researcher ID: HKN-1441-2023, SPIN-код: 4562-1661, mabelova@chsu.ru

Olga Victorovna Novichenko, Cand. Techn. Sci., Associate Professor of Chair of Biotechnology, Aquaculture, Soil Science and Land Management, Astrakhan Tatishchev State University (20A, Tatischev str., Astrakhan, Astrakhan region, 414056, Russian Federation), Leading Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4282-9728>, Scopus ID: 55996873800, Researcher ID: AAU-9650-2021, SPIN-код: 7656-9566, ollevi@bk.ru

Igor Alexeevich Nikitin, Doctor of Technical Sciences; Head of the Chief of Food Technologies and Bioengineering, Plekhanov Russian University of Economics (36, Stremyanny Lane, Moscow, Moscow region, 115054, Russian Federation), Chief Researcher of Chair of Biology, Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8988-5911>, Scopus ID: 57208018552, Researcher ID: B-3266-2017, SPIN-код: 9342-6517, nikito.igor@gmail.com

Hicham Zaroual, PhD, Professor, Assistant Professor at Faculty of Sciences and Technologies, Abdelmalek Essaadi University (Quartier M'haneche II, avenue 9 Avril, B.P. 2117, Tétouan, 93000, Morocco), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1571-5354>, Scopus ID: 57211598033, aa.hzaroual@gmail.com

Vilkova Daria Dmitrievna, PhD of Engineering of Biological Functions, Leading Researcher of Chair of Biology, Head of the Laboratory of Applied Biotechnology Cherepovets State University (8, Sovetsky Ave., Cherepovets, Vologda region, 162600, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2869-8709>, Scopus ID: 57212526679, Researcher ID: GVT-8608-2022, SPIN-код: 1912-6020, dariavilkova333@gmail.com