



ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Обзорная статья/Review article

УДК 637.073.051:543.42

DOI: 10.36718/1819-4036-2025-9-240-270

Виктория Александровна Пчелкина

ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова РАН, Москва, Россия

v.pchelkina@fncps.ru

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДОВ СПЕКТРОСКОПИИ В АНАЛИЗЕ КАЧЕСТВА МЯСА

Цель исследования – обзор возможностей применения спектроскопических методов для оценки качества и состава мяса, определение их преимуществ и недостатков, а также перспектив дальнейшего использования на предприятиях мясной промышленности. Проблемы оценки качества мяса актуальны и привлекают внимание как производителей, так и потребителей. Традиционные методы, такие как органолептические, физико-химические, биохимические и микробиологические, являются трудоемкими и разрушительными. Поэтому поиск быстрых, неразрушающих и точных методов контроля, к которым относится спектроскопия, особенно важен. Наиболее распространенной является ближняя инфракрасная спектроскопия, которая обладает большой глубиной проникновения и умеренной чувствительностью и позволяет получать информацию о химическом составе и физических свойствах образцов. Менее распространена рамановская спектроскопия, ставшая популярной с развитием современных лазерных спектроскопов. Использование терагерцовой спектроскопии ограничено содержанием в мясе большого количества воды, поглощающей излучение. Применение флуоресцентной спектроскопии ограничено наличием собственных флуорофоров в анализируемых образцах, а результат анализа зависит от места измерения. Импедансная спектроскопия анализирует электрические свойства и применима при исследованиях мяса в процессе созревания и замораживания-размораживания. Спектроскопия ядерного магнитного резонанса позволяет получить данные о «химическом отпечатке» образцов и метаболических изменениях, произошедших в мясе во время хранения и технологической обработки, а электронный парамагнитный резонанс эффективен для определения окислительного / антиоксидантного статуса. Несмотря на свои недостатки, спектроскопические методы, представленные в статье, имеют большой потенциал применения непосредственно на производстве, в т. ч. в режиме онлайн.

Ключевые слова: неразрушающий анализ, инфракрасная спектроскопия, рамановская спектроскопия, фурье-спектроскопия, флуоресцентная спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс

Для цитирования: Пчелкина В.А. Возможности методов спектроскопии в анализе качества мяса // Вестник КрасГАУ. 2025. № 9. С. 240–270. DOI: 10.36718/1819-4036-2025-9-240-270.

Финансирование: исследование проведено в рамках Государственного задания № FGUS-2024-0002 ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Victoria Aleksandrovna Pchelkina

V.M. Gorbatov FSC of Food Systems of the RAS, Moscow, Russia

v.pchelkina@fncps.ru

POSSIBILITIES OF SPECTROSCOPIC METHODS IN MEAT QUALITY ANALYSIS

The aim of the study is to review the possibilities of using spectroscopic methods to assess the quality and composition of meat, to determine their advantages and disadvantages, as well as the prospects for further use in meat industry enterprises. The problems of meat quality assessment are relevant and attract the attention of both producers and consumers. Traditional methods, such as organoleptic, physicochemical, biochemical and microbiological, are labor-intensive and destructive. Therefore, the search for fast, non-destructive and accurate control methods, which include spectroscopy, is especially important. The most common is near infrared spectroscopy, which has a large penetration depth and moderate sensitivity and allows you to obtain information about the chemical composition and physical properties of samples. Less common is Raman spectroscopy, which has become popular with the development of modern laser spectrometers. The use of terahertz spectroscopy is limited by the content of a large amount of water in meat, which absorbs radiation. The use of fluorescence spectroscopy is limited by the presence of intrinsic fluorophores in the analyzed samples, and the analysis result depends on the location of measurement. Impedance spectroscopy analyzes electrical properties and is applicable to studies of meat during maturation and freeze-thaw processes. Nuclear magnetic resonance spectroscopy provides data on the "chemical fingerprint" of samples and metabolic changes that have occurred in meat during storage and processing, while electron paramagnetic resonance is effective for determining the oxidative/antioxidant status. Despite their shortcomings, the spectroscopic methods presented in the paper have great potential for use directly in production, including online.

Keywords: non-destructive analysis, infrared spectroscopy, Raman spectroscopy, Fourier spectroscopy, fluorescence spectroscopy, electron paramagnetic resonance

For citation: Pchelkina VA. Possibilities of spectroscopic methods in meat quality analysis. *Bulletin of KSAU*. 2025;(9):240-270. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2025-9-240-270.

Funding: this research was funded by state assignment of the V.M. Gorbатов Federal Research Center for Food Systems, № FGUS-2024–0002.

Введение. Мясо – это сложная многокомпонентная структура, на качество которой влияют как ряд внутренних факторов самого скота и птицы (порода, возраст, пол и др.), так и внешние условия (система выращивания, способ убоя, температура хранения). Мясо является источником полноценного белка, витаминов и микроэлементов, а его качество и безопасность напрямую влияют на состояние здоровья человека [1]. К основным определяемым показателям относят органолептические характеристики, химический состав и пищевую ценность, физическо-химические свойства и показатели безопасности. Традиционные методы анализа, применяемые для оценки данных показателей, являются трудоемкими и разрушительными, то есть изучение образцов предполагает их повреждение или уничтожение (частичное или полное).

В последние годы приоритетным направлением исследований в мясной промышленности является применение для контроля качества быстрых и неразрушающих методов, к которым в том числе относятся различные варианты спектроскопии. Особенностью этих методов является возможность оценивать характеристики

образцов, не подвергая их повреждению, таким образом, образец может быть использован далее в производстве (при анализе сырья) или реализации (при анализе готового продукта) без экономических потерь, а сам анализ можно осуществлять не только в лабораторных условиях, но и непосредственно на технологической линии в непрерывном режиме.

К спектроскопическим методам относят инфракрасную спектроскопию, рамановскую спектроскопию (комбинационного рассеяния), флуоресцентную спектроскопию, спектроскопию диффузного отражения, электронный парамагнитный резонанс, лазерно-индуцированную эмиссионную спектроскопию (атомно-эмиссионную), импедансную спектроскопию и другие [2]. В основе данных методов лежит зависящее от длины волны взаимодействие света с образцом. По диапазону длин волн спектр различают γ -лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолет, видимый свет, инфракрасные, микроволновые и радиоволны. Спектроскопия является междисциплинарным предметом, который объединяет физику, химию и информативный инструмент качественного и количественного анализа био-

логических объектов. Процедура анализа обычно включает в себя этапы сбора спектральных данных, их предварительную обработку, калибровку, разработку модели прогнозирования и ее валидацию. В настоящее время для обработки спектров и извлечения сложной химической информации о составе образца специалисты применяют различные компьютерные и интеллектуальные технологии, сочетая их с методами хемометрики и многомерного статистического анализа [3, 4].

Большинство спектроскопических измерений можно проводить в нескольких режимах в зависимости от положения источника освещения и детектора. Например, когда источник освещения и детектор расположены друг напротив друга, свет, прошедший через образец, улавливается, и режим называется пропусканием, в то время как источник освещения и детектор размещаются параллельно друг другу в режим взаимодействия. Эти различные режимы измерения позволяют получить ценную информацию о внешних и внутренних параметрах качества исследуемого образца. Взаимодействие света с биологической тканью является результатом сложного взаимодействия между рассеянием и поглощением света. Рассеяние связано со структурными и физическими свойствами образца, тогда как поглощение в основном связано с химическим составом и концентрацией различных компонентов, которые по-разному поглощают свет разных длин волн [5].

Цель исследования – обзор возможностей применения спектроскопических методов для оценки качества и состава мяса, определение их преимуществ и недостатков, а также перспектив дальнейшего использования на предприятиях мясной промышленности.

Задачи: провести обзор отечественной и зарубежной научно-технической литературы и систематизировать полученную информацию по разным методам спектроскопии; провести сравнительный анализ их преимуществ и недостатков; обозначить актуальные направления применения указанных методов в анализе мяса; сформировать рекомендации по их онлайн-применению в условиях производства.

Объекты и методы. Поиск публикаций включал в себя следующие этапы: отбор релевантных источников в российских и зарубежных электронных базах данных (Web of Science, Scopus, ResearchGate, Национальной медицин-

ской библиотеки США (pubmed.org), Научной электронной библиотеки РФ (elibrary.ru), Государственной публичной научно-технической библиотеки России), а также в открытых интернет-источниках, изданных за период времени с 2010 по 2024 г.; анализ рефератов и исключение публикаций, не удовлетворяющих критериям поиска; анализ полных текстов статей и включение публикаций в обзор, систематизация и обобщение результатов. Особое внимание уделяли полнотекстовым публикациям, изданным за последние 5 лет. При отборе публикаций приоритет имели высокоцитируемые источники. Ключевые слова для поиска на русском языке: спектроскопия / инфракрасная спектроскопия в ближнем/среднем диапазоне / спектроскопия с преобразованием Фурье / рамановская спектроскопия / флуоресцентная спектроскопия / электронный парамагнитный резонанс / атомно-эмиссионная спектроскопия / импедансная спектроскопия & мясо; на английском языке – spectroscopy / near- /medium- infrared spectroscopy / fourier spectroscopy / Raman spectroscopy / fluorescence spectroscopy / electron paramagnetic resonance / atomic emission spectroscopy / Impedance spectroscopy & meat.

Из каждой включенной в обзор публикации последовательно извлекали следующую информацию: автор(ы), год публикации, страна; цель и методы исследования; статистическая обработка; полученные результаты. Дальнейший анализ публикаций проводили с учетом цели обзора и конкретных исследовательских вопросов.

Все полученные данные использовали для анализа и систематизации результатов. Общее количество проанализированных источников составило 716, из них 140 вошли в окончательный вариант статьи.

Результаты и их обсуждение

Инфракрасная спектроскопия. Инфракрасную область электромагнитного спектра делят на ближнюю, среднюю и дальнюю, при этом для контроля качества мяса используют в основном ближний и средний диапазоны [6–8].

Для спектроскопии в среднем инфракрасном диапазоне (MIRS) (длина волн от 2,5 до 50 мкм) характерна высокая чувствительность при небольшой глубине проникновения. Получаемые спектры отличаются четкими пиками, характеризующими отдельные молекулы, предоставляющие химическую информацию о структуре и

составе мяса. MIRS также можно применять для определения микробиологической порчи, аутентификации сырья и выявления фальсификации [9]. В работе M. Ruiz, et al. [10] метод использовали для оценки химического состава и качественных параметров мяса жеребят разных возрастов и откормочных рационов. Хорошие результаты были получены для показателя влажности и общего содержания липидов – точность 82 и 66 % соответственно, по отдельным жирным кислотам – более 65 %. Классификация образцов по возрасту составила 78 %, а рациона откорма – 72 %.

Ближняя инфракрасная спектроскопия (NIRS) использует ближнюю инфракрасную области электромагнитного спектра (длина волны от 0,78 до 3 мкм) и основана на принципе взаимодействия излучения с образцом в форме поглощения, отражения, пропускания и рассеяния [11, 12]. Спектральная область NIR находится в диапазоне 700–2500 нм. Различные органические вещества часто содержат разные водородсодержащие группы, например, связи -ОН в воде, связи -NH в белках и связи -CH в жирах, которые способны возбуждаться в резонанс и поглощать энергию под воздействием инфракрасного спектра. Поглощая каждую длину волны с определенной скоростью, молекулы создают на спектре характерные пики и впадины. В основе NIRS лежит измерение поглощения с последующим проведением качественного или количественного анализа компонентов в зависимости от положения и интенсивности полученного спектра [13]. Это позволяет связать полосы поглощения в спектрах, полученных из образца мяса, с конкретными функциональными группами входящих в состав соединений [14]. NIRS имеет умеренную чувствительность и большую глубину проникновения по сравнению с MIRS, а получаемая информация отражает не только химический состав образца, но и его физические свойства. Спектроскопические датчики обычно получают спектры из ограниченного поля зрения, что ограничивает их применимость для быстрого анализа безопасности партий большого объема или анализа разнородных образцов.

Методы на основе NIRS способны регистрировать спектры как твердых, так и жидких веществ, а их применение в исследованиях мяса началось с 1960-х гг. с определения воды и жира в мясной эмульсии прямой спектрофотометрией [15]. С этого момента ближняя инфракрас-

ная спектроскопия достаточно быстро развивалась, а появление современных спектрометров на основе волоконно-оптических зондов и компьютерной обработки данных позволило ей стать одним из наиболее широко изученных спектроскопических методов анализа [16].

Установление взаимосвязи между спектральной информацией и физико-химическими характеристиками образцов начинают с выбора спектральной области, учитывая, что чем шире диапазон, тем больше информации. При этом одновременно с увеличением данных увеличивается и ошибка измерения. Таким образом, тщательный выбор анализируемой области спектра позволяет, с одной стороны, избежать недостатка информации, а с другой – минимизировать искажения [17]. Для повышения точности прогнозирования применяют увеличение количества сканирований, а также расширение интервала выборки. Чтобы снизить влияние, вызванное перекрытием спектральных пиков и помехами фона, вся информация должна быть применена в процессе дальнейшего моделирования. Обычно используют такие алгоритмы обработки данных, как анализ главных компонентов (PCA), линейный дискриминантный анализ (LDA), машину опорных векторов (SVM), регрессию с частичными наименьшими квадратами (PLSR) и т. д. Для оценки точности прогнозирования применяют перекрестную проверку: если коэффициент корреляции близок к 1, а скорректированное стандартное отклонение – к измеренному стандартному отклонению, производительность системы считается наилучшей; когда производительность системы максимальна, ее можно применять для анализа спектров неизвестных образцов [18].

N. Prieto et al. успешно использовали NIRS для оценки химического состава говядины [19]. Другие исследования подтвердили возможности метода в анализе характеристик качества образцов мяса [20, 21]. Авторы работы [4] заявили, что NIRS является наиболее развитой системой, когда речь идет об инструментарии и совместимости программного обеспечения по сравнению с другими спектроскопическими методами. В сочетании с хемометрикой этот метод можно использовать для одновременного определения различных параметров качества и состава мяса (белки, жиры, углеводы) [22].

Для оценки качества свинины авторы [23] разработали оптическое устройство, совме-

шающее спектроскопию в видимом и в ближнем инфракрасном диапазонах, и имеющее потенциал практического промышленного применения для контроля качества мяса в режиме реального времени. Созданные модели прогноза показали коэффициент корреляции более 0,9 для всех анализируемых показателей.

В своей работе S. Weng et al. [24] применяли NIRS для выявления фальсификации говядины свининой и говяжьим сердцем, получив точность анализа выше 96 %. Схожие результаты были получены другими исследователями [25] при определении свинины и мяса утки в говяжьем фарше – точность классификации на основе дискриминантного анализа для бинарных систем составила 100 %, для тройных – 91,50, на основе метода частичных наименьших квадратов – 95,80 и 95,69 % соответственно.

В работе [26] оценивали свежесть свинины по содержанию общего летучего основного азота с использованием интеграции методов NIRS, компьютерного зрения и электронного носа (E-nose), а также анализа главных компонент для объединения результатов. По результатам анализа 90 образцов был получен коэффициент детерминации 0,9527 в наборе прогнозов.

Ряд исследований посвящен прогнозированию качества мяса после различных методов и

условий приготовления (термообработки). A. González-Mohino et al. использовали NIRS для прогнозирования сенсорных свойств свиной корейки, подвергнутой различным условиям приготовления (в духовке при 150 и 180 °C в течение 45, 60 и 75 мин и в конфи в течение 120, 180 и 240 мин) [27]. Применение анализа главных компонент показало довольно четкое разделение образцов в зависимости от температуры и условий приготовления. Кроме того, наблюдалась корреляция от умеренной до высокой между некоторыми органолептическими характеристиками образцов, особенно приготовленных в конфи (коэффициент корреляции R был выше 0,8 для большинства показателей), и данными спектроскопии. Используя аналогичный подход, авторы [28] подтвердили возможность использования NIRS для классификации образцов свинины в зависимости от условий приготовления, получив R более 0,5 между спектральными данными и традиционными параметрами качества (нежность, потери при термообработке).

В таблице приведены некоторые результаты применения NIRS в сочетании с многомерными алгоритмами анализа данных для оценки качества мяса.

Применение ближней инфракрасной спектроскопии в исследованиях качества мяса The use of near-infrared spectroscopy in meat quality analysis

Образец	Исследуемый показатель	Алгоритм анализа данных	Полученный результат	Источник
1	2	3	4	5
Свинина	Содержание внутримышечного жира, белка и воды, показатель pH и нежность	PLSR	R^2 для всех признаков > 0,757	[29]
Свинина	Цвет, показатель pH и потери при варке	PLSR	$R_{cv} = 0,9469, 0,9495, 0,9180, 0,9054$ и $0,8789$ для L^*, a^*, b^* , показателя pH и потерь при варке соответственно	[30]
Свинина	Влажность, активность воды (a_w) и содержание NaCl	PLSR	$R^2 = 0,93, 0,62$ и $0,91$ и RPD 3,74, 1,63 и 3,33 для влажности, a_w и содержания NaCl соответственно	[31]
Свинина	Содержание влаги, соли, белка, небелкового азота, внутримышечного жира и свободных аминокислот	PLSR	$R^2_{cv} > 0,90$, RPD > 3,0 для содержания соли, $R^2_{cv} = 0,75–0,90$ и RPD = 2,0–3,0 для других показателей	[32]

1	2	3	4	5
Свинина	Общее количество жизнеспособных микроорганизмов	PLS	$R_p = 0,95$	[33]
Свинина	Свежесть	LDA и BP-NN	Для модели BP-ANN точность прогноза составила 96,21 %	[34]
Говядина	Фальсификация свининой	PLS и LDA	$R^2 = 0,99$ при проверке моделей на реальных образцах	[35]
Говядина	Содержание белка, жира и влаги	PLSR	$R^2 = 0,85, 0,86$ и $0,90$ для белка, жира и влаги соответственно	[36]
Говядина	Фальсификация другим видом мясного сырья	PLSR, PLS-DA, LDA	Для моделей PLSR точность классификации была выше 94 %, для моделей LDA и PLS-DA – 100 %.	[37]
Говядина	Фальсификация мясом индейки	PCA; LDA; PLSR	Точность классификации 81–99 %	[38]
Свинина и говядина	Фальсификация Растительным и животным белком	PCA, LDA, PLSR	Точность классификации – 69–100 %. Коэффициент корреляции – 0,78–0,86	[39]
Курица	Показатель pH, L^* , водоудерживающая способность	PLSR	$R^2_{cv} = 0,91, 0,81$ и $0,70$ для L^* , Ph и водоудерживающей способности соответственно	[40]
Курица	Содержание отдельных жирных кислот	Модифицированный PLSR	$R^2_{cv} < 0,6$	[41]
Курица	Водоудерживающая способность	LDA	Точность классификации от 74 до 76 % для сырых образцов и от 85 до 86 % для лиофилизированных образцов	[42]

Примечание: PCA (principal component analysis) – анализ главных компонент; PLSR (partial least squares regression) – частичная регрессия методом наименьших квадратов; LDA (linear discriminant analysis) – линейный дискриминантный анализ; PLS-DA (partial least squares discriminant analysis) – частичный дискриминантный анализ методом наименьших квадратов; BP-NN (backpropagation-neuralnetwork) – нейронная сеть по методу обратного распространения; R_{cv} – коэффициент перекрестной проверки; R^2_{cv} – коэффициент детерминации для перекрестной проверки; R_p – коэффициент корреляции прогнозирования.

Отмечено, что подготовка проб может влиять на надежность результатов спектроскопии. Так, например, измельчение мяса высвобождает внутриклеточные вещества, делая их более доступными для анализа химического состава. Поглощенная энергия будет ниже после измельчения, что ведет к более высокому коэффициенту отражения, который, в свою очередь, легче измерить [43]. В случае оценки физических характеристик образцов лучшие результаты достигаются при сохранении целостности структуры [1].

Большинство приведенных исследований проводились в контролируемых лабораторных условиях. Однако в нескольких работах указывается на применимость NIRS в промышленности при поточной переработке мяса [44, 45]. В работе [46] проводили мониторинг внутренней

температуры запеченного паштета из печени. Ошибка определения составила 1,5–4,3 °C. Аналогичный подход использовали для контроля температуры внутри колбасы во время промышленной термообработки в паровой печи [47], получив точность определения $\pm 1,0$ °C. Таким образом, приведенные исследования показывают, что ближняя инфракрасная спектроскопия имеет большой потенциал применения. К преимуществам метода можно отнести небольшой объем спектральных данных, быстроту их обработки и возможность определять несколько показателей одновременно.

Несмотря на достаточно широкое применение ближней инфракрасной спектроскопии в анализе качества мяса, данный метод все еще

имеет некоторые ограничения, среди которых главным является проведение большого количества физических и химических экспериментов перед последующим построением прогностической модели и ее практического применением.

Терагерцовая спектроскопия

Терагерцовое (THz) излучение включает в себя неионизирующие электромагнитные волны и охватывает электромагнитные частоты между инфракрасным и микроволновым диапазонами около 0,1~10 терагерц. Наиболее часто используемый диапазон составляет 0,3~3 ТГц, что соответствует длинам волн от 1 мм до 0,1 мм [48].

Данная спектроскопия обладает уникальным диапазоном излучения и имеет такие преимущества, как высокое соотношение сигнал/шум и широкий динамический диапазон. THz излучение имеет относительно большую глубину проникновения, что делает его пригодным для исследования внутренней структуры образцов. Во-первых, уровень энергии фотонов в терагерцовом диапазоне составляет приблизительно 1~10 мэВ, в этом диапазоне находится множество молекулярных резонансов, и многие химические вещества демонстрируют характерные спектральные отклики на частотах THz. Во-вторых, THz-излучение с умеренным затуханием способно проникать через многие упаковочные материалы, при этом не оказывая повреждающего влияния на биологические ткани. В-третьих, большое количество полярных молекул имеют сильное поглощение в терагерцовом диапазоне. Таким образом, используя THz-спектроскопию, можно получить информацию о пространственной конформации биологических макромолекул, которая напрямую отражает их функцию, что невозможно обнаружить на других диапазонах электромагнитных частот [49].

В ряде исследований данный метод применяли в оценке свежести мяса [50] и рыбы [51]. Было отмечено, что при анализе мяса постные образцы всегда поглощают терагерцовое излучение, тогда как жирные почти прозрачны для него, что можно использовать при определении соотношения жировой и мышечной ткани [52].

В работе [53] терагерцовая спектроскопия использовалась для прогнозирования свежести свинины на основе показателя К (определяется как отношение суммы концентраций инозина и гипоксантина к общей концентрации шести продуктов разложения (АТФ, АДФ, АМФ, ИМФ, инозина и гипоксантина)). Модель прогнозирования,

созданная искусственной нейронной сетью обратного распространения (BP-ANN), показала среднеквадратическую ошибку прогнозирования и коэффициент корреляции 9,89 % и 0,84 соответственно.

Y.M. Wang et al. применили терагерцовую спектроскопию для определения гидрохлорида хлортетрациклина (ССН) и гидрохлорида тетрациклина (ТСН) в курице [54]. Для количественного анализа использовались алгоритмы частичной регрессии наименьших квадратов, и получен коэффициент корреляции R более 0,9089.

В исследовании [55] терагерцовую спектроскопию использовали для анализа разных образцов животного происхождения, включая свежие ткани (жир, кожа и постное мясо) и сублимированное мясо. Результаты показали, что свежие ткани можно быстро распознать по силе терагерцового сигнала во временной и частотной области, а сублимированные образцы эффективно различаются по коэффициенту поглощения, показателю преломления, значению тангенса диэлектрических потерь на частоте 0,6~1,4 ТГц в сочетании с анализом главных компонентов и машиной опорных векторов. Полученные результаты продемонстрировали возможность использования терагерцовой спектроскопии для выявления фальсификации мяса.

Основные ограничивающие факторы широкого применения терагерцовой спектроскопии в анализе мяса следующие: (1) несовершенство экспериментальной платформы для передачи и приема терагерцовых волн; (2) высокое содержание влаги в образцах, которая сильно поглощает THz-излучение и влияет на соотношение сигнал/шум в процессе анализа. В связи с этим теоретические исследования в этой области все еще находятся на ранней стадии и требуют дальнейшего изучения.

Рамановская спектроскопия

Рассеяние классифицируется как неупругое рассеяние, или комбинационное (рамановское), если падающие фотоны обмениваются энергией с молекулами во время столкновения. Спектр комбинационного рассеяния – это тип спектра молекулярных колебаний, основанный на эффекте комбинационного рассеяния. Фактически каждая молекула имеет свой собственный уникальный сигнал спектра комбинационного рассеяния. Поэтому после извлечения молекулярной информации из образца можно успешно реализовать качественное суждение о его

структуре. Рамановская спектроскопия позволяет неинвазивно изучать структуру и молекулярный состав живых клеток и тканей. В настоящее время известно более 25 модификаций метода, направленных на повышение его чувствительности. Более подробно о применении рамановской спектроскопии (RS) в анализе мяса изложено в ранее опубликованной работе [56].

RS позволяет анализировать физико-химические и структурно-механические показатели [57–62], количество внутримышечного жира [63] и жирнокислотный профиль [64, 65]; цветовые характеристики образцов [66]. Метод успешно используется в анализе структуры белков мяса, в том числе при изучении влияния хранения [67] и термообработки [68].

Ряд работ посвящен идентификации мяса разных видов животных [69, 70]. I. H. Boyaci, et al. [71] определяли фальсификацию говядины кониной, применяя для обработки данных анализ главных компонент. В исследовании [72] показана возможность RS выявления конины в мясной смеси. Авторы разработали аналитические зависимости интегральных интенсивностей полос, отвечающих за наличие и концентрацию маркерных аминокислот, от процентного содержания конины в фарше. Дифференциация образцов говядины, баранины и конины представлена в работе [73]. Результаты показали чувствительность более 87 и 90 % с использованием моделей с линейным и нелинейным ядром SVM соответственно. PLSDA модель классификации продемонстрировала точность 92 и 81 % при определении баранины, и 88 и 79 % при определении говядины (для обучающего и для тестового набора соответственно).

Рамановскую спектроскопию можно применять для оценки качества готовых мясных продуктов, например, в работе [74] подтверждали качество вяленой иберийской ветчины, а в [75] оценивали видовой состав мяса во франкфуртских колбасках.

Метод эффективен для определения присутствующих в мясе микроорганизмов [76]. Образцы мяса, хранившиеся в холодильнике при температуре 5 °C, исследовали на портативной рамановской системе в течение 3 нед. после убоя. Для анализа спектральных изменений использовали метод PCA. Результаты работы показали, что рост бактерий вызывает характерные спектральные изменения, что позволяет выявлять образцы, содержащие более 106 КОЕ/см².

S. Meisel et al. [77] сформировали трехуровневую классификационную модель идентификации микроорганизмов посредством анализа данных комбинационного рассеяния с помощью машин опорных векторов. Была создана спектральная база данных 19 видов наиболее важных патогенных и непатогенных бактерий, ассоциированных с мясом убойных животных и птиц. После первого классификатора, который различает спектры комбинационного рассеяния грамположительных и грамотрицательных бактерий, следуют два узла решений относительно рода и вида бактерий. Различные этапы модели классификации достигли точности в диапазоне 90,6–99,5 %. В работе [78] продемонстрировано быстрое (за 3 ч) обнаружение *E. Coli* O157:H7 (~10 КОЕ/мл) в говяжьем фарше с помощью рамановской спектроскопии с усилением поверхности (SERS).

Однако у данного метода есть свои ограничения [56]: отсутствует единая база данных спектров разных образцов мяса, а также унифицированные протоколы записи спектров; спектры содержат большое количество данных, что замедляет скорость их обработки; разработанные прогностические модели затруднено использовать для многофакторного прогноза. Немаловажным является высокая стоимость оборудования.

Флуоресцентная спектроскопия

Данный аналитический метод оценивает флуоресцентные характеристики объекта. Флуоресценция – это испускание света после поглощения энергии в форме ультрафиолетового или видимого света флуоресцентной молекулой или субструктурой (флуорофором). Чаще всего получают двумерные спектры, зафиксировав длину волны возбуждения и наоборот (спектры возбуждения или спектры излучения). В настоящее время возможно одновременно записать несколько спектров излучения (или спектров возбуждения) на разных длинах волн возбуждения (или длинах волн излучения) благодаря созданию ландшафта флуоресценции (матрица возбуждения-эмиссии (ЕЕМ)). При этом существенным недостатком записи спектра флуоресцентного ЕЕМ на современном флуориметре является длительность процедуры – около 30 мин, тогда как классический двумерный спектр можно получить в течение всего нескольких секунд [79].

Фронтальная флуоресцентная спектроскопия (FFS) позволяет исследовать образцы твердых

продуктов в диапазоне длин волн 200–750 нм. В этом случае спектры возбуждения и испускания получаются на фиксированной длине волны, определяемой как функция флуорофоров, присутствующих в анализируемой матрице, а именно триптофана, витамина А, рибофлавина, продуктов окисления липидов и НАДН в мясных продуктах [80]. Существует еще одна форма флуоресцентной спектроскопии, известная как синхронная флуоресцентная спектроскопия (SFS), в которой спектры собираются в результате одновременного сканирования как монохроматоров возбуждения, так и монохроматоров испускания, сохраняя фиксированный интервал длин волн между ними ($\Delta \lambda$) [79].

Излучаемый флуорофором свет содержит информацию о составе, структуре и динамике молекулы. Изучение биологических систем, структуры и функции белков, нуклеиновых кислот и других биомолекул является одним из наиболее важных приложений флуоресцентной спектроскопии [81].

Применение флуоресценции в анализе мяса сосредоточено в основном на измерении коллагена в соединительной и жировой тканях. В 1986 г. было предложено использовать собственную флуоресценцию (автофлуоресценция) мяса при возбуждении образца на 340 нм для анализа его состава [82], поскольку кости, хрящи, соединительные и мышечные ткани обладают различными флуоресцентными свойствами [83]. С 1987 г. была осуществлена серия работ по различным аспектам автофлуоресценции мяса [84, 85]. Установлено, что спектры флуоресценции коллагена можно использовать для анализа нежности [86] и влагоудерживающих свойств сырья [87]. В работе [88] установили корреляцию между флуоресценцией триптофана (возбуждение при 290 нм и эмиссия при 305–400 нм) и текстурой колбас и мясных эмульсий. N. Oto et al. применили FS для анализа содержания АТФ и количества микробных клеток на поверхности свинины, хранившейся в аэробных условиях при 15 °С в течение трех дней [89]. Поскольку флуоресценция триптофана и НАДФН изменялась с течением времени вместе с ростом микроорганизмов, авторы сделали вывод, что по флуоресценции можно обнаружить микробную порчу мяса. Были разработаны прогностические модели на основе PLSR и получены коэффициенты R^2_{cv} от 0,84 до 0,88.

Флуоресцентную спектроскопию использовали для изучения изменений, происходящих при термической обработке мяса. P. Gatellier et al. связали увеличение флуоресценции в спектральной области между 390 и 600 нм при возбуждении на длине волны 360 нм с окислением мяса в процессе приготовления и повышения температуры поверхности выше 141 °С [90]. Авторы объяснили это взаимодействием белков и альдегидных продуктов перекисного окисления липидов с образованием карбонильной группы белка. Полученные результаты согласуются с данными другого исследования [91], в котором сообщается об изменениях в интенсивности флуоресценции и пиковом максимальном выделении триптофана и оснований Шиффа в свинине, подвергнутой различным видам кулинарной обработки.

A. Sahar et al. изучали возможность использования синхронной флуоресцентной спектроскопии в сочетании с хемометрикой для определения влияния термической обработки на качество приготовленной говядины [92]. Полученные результаты анализа ландшафтных спектров в диапазоне длин волн от 250 до 550 нм с использованием модели параллельных факторов (PARAFAC) показали изменения флуоресцентных соединений мяса в зависимости от температуры и времени приготовления.

Потенциал SFS был предложен для идентификации гетероциклических ароматических аминов (НАА) в приготовленной при высоких температурах (гриль) говядине [93]. Четыре НАА и их концентрации были успешно предсказаны на основе данных спектров с использованием двух компонентов PARAFAC. В дальнейшем авторы продолжили работу в этой области [94].

В другом исследовании методы флуоресцентной спектроскопии и микроскопии использовались для иллюстрации тепловых модификаций на макроскопическом и микроскопическом уровнях образцов говяжьего фарша, подвергнутых варке разной продолжительности [95]. Результаты показали быстрое увеличение флуоресценции по мере приготовления в течение первых 30 минут, что было связано с образованием конечных продуктов гликирования (glycation end products).

K. Islam et al. [96] изучали корреляцию между коммерческими сортами говядины и спектральными сигнатурами нативных флуорофоров. Были определены пять заметных автофлуорес-

центных сигнатур в диапазоне возбуждения от 250 до 350 нм, полученных из триптофана и внутримышечного жира, которые отражают сорт мяса и могут быть использованы для его определения.

Флуоресцентную спектроскопию можно применять для прогнозирования состава жирных кислот [80], а также для аутентификации мяса. В работе [97] оценили эффективность классической флуоресцентной спектроскопии фронтальной поверхности и синхронной в сочетании с частичным дискриминантным анализом метода наименьших квадратов, методом опорных векторов, связанным с PLS и PCA для разделения трех мышц говядины (*m. Longissimus thoracis*, *m. Rectus abdominis* и *m. Semitendinosus*). Результаты показали хорошее различие мышц с точностью от 47,82 до 94,34 % и погрешностью от 6,03 до 32,39 % для разных алгоритмов.

Таким образом, SFS является более подходящим методом анализа сложных многокомпонентных образцов мяса по сравнению с обычной фронтальной, поскольку позволяет рассматривать весь ландшафт флуоресценции, связанный с несколькими флуорофорами. Одним из главных недостатков флуоресцентной спектроскопии является то, что не все образцы могут быть возбуждены до флуоресценции из-за отсутствия собственных флуорофоров. С другой стороны, присутствие нескольких флуорофоров может привести к перекрывающимся пикам, что затрудняет их идентификацию. Поскольку мясо является гетерогенной матрицей, могут возникать вариации в анализе флуоресценции в зависимости от места проведения измерений.

Кроме того, поскольку данная спектроскопия является высокочувствительным методом, на измерения флуоресценции влияет ряд как внешних (температура, вибрация), так и внутренних (состав образца, количество флуорофоров) факторов. По этой причине применение флуоресцентной спектроскопии для анализа качества мяса ограничено по сравнению с другими спектроскопическими методами.

Спектроскопия диффузного отражения

Спектроскопия диффузного отражения (DRS) использует свет в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах для количественного определения состава хромофоров с известными коэффициентами поглощения. Система DRS не требует каких-либо обновлений модели калиб-

ровки и использует доступный и легко настраиваемый спектрометр, а не спектрофотометр, который используется в NIRS. В исследовании [98] использовали спектроскопию диффузного отражения для количественного анализа разных окислительно-восстановительных форм миоглобина в говядине. Каждая окислительно-восстановительная форма миоглобина имеет разные коэффициенты поглощения в видимой и ближней ИК-областях, и их пропорции меняются во время хранения. Следовательно, различия между спектрами DRS свежей и несвежей говядины можно использовать для определения ее качества. Между расчетными данными на основе DRS и известной долей мет-Mb авторы получили линейную зависимость с высокой корреляцией ($R^2 = 0,9999$) и низкой ошибкой (0,86 %). Схожие результаты были получены и S. Shin et al. [99], которые для анализа данных спектроскопии говядины трех категорий свежести также применяли информацию о миоглобине, а прогнозирование было основано на глубоком обучении. Точность предложенной модели составила 91,9 %.

Электронный парамагнитный резонанс

Электронный парамагнитный резонанс (EPR) представляет собой тип неинвазивного спектроскопического метода, используемого для изучения молекул или атомов с неспаренными электронами [100]. Принцип EPR похож на принцип ядерного магнитного резонанса (NMR) – оба метода используют взаимодействие магнитных диполей с определенными длинами волн магнитного поля и электромагнитного излучения. EPR касается расщепления электронных спиновых состояний, а NMR более конкретно касается расщепления ядерных спиновых состояний в магнитном поле [101]. Классический EPR-спектрометр включает в свой состав расположенную между двумя большими магнитами и сопровождаемую микроволновым генератором и частотным считывателем камеру для образца. Данная камера способна достигать низких температур (~4 K) за счет протекания через образец, находящийся в камере, жидкого гелия.

Метод применяют для количественной оценки радикалов, антиоксидантной способности, а также механизмов окислительно-восстановительных реакций при анализе качества, стабильности и срока годности пищевых продуктов [102].

В работе [103] изучали окислительный и антиоксидантный статус разных мышц свинины (*m. Subscapularis*, *m. Longissimus dorsi* и *m. Glu-*

teobiceps). На определенных этапах протекания перекисного окисления липидов образуются разные нестабильные виды радикалов, которые можно измерить в режиме реального времени с помощью EPR-спектроскопии в сочетании с методом спинового улавливания. Результаты данного исследования позволили установить, что такие мышцы, как m. Subscapularis и m. Gluteobiceps, имеют высокую продукцию активных форм кислорода, а следовательно, больший риск окислительного повреждения по сравнению с m. Longissimus dorsi ($p < 0,01$). Таким образом, во время хранения и приготовления процессы окисления в этих мышцах могут снизить качество мяса.

T. Volumar, et al. [104] применили электронный парамагнитный резонанс в изучении образования радикалов в говядине и курице во время обработки высоким давлением и антиоксидантами синтетического и природного происхождения. Исследование показало, что образование радикалов было выше в измельченной под давлением говяжьей вырезке, чем в измельченной под давлением куриной грудке. При обработке высоким давлением радикалы образовывались в саркоплазматической и миофибриллярной фракциях, а также во фракции нерастворимого белка. Добавление железа, а также натуральных антиоксидантов (кофейной кислоты, экстракта розмарина и аскорбиновой кислоты) приводило к повышенному образованию радикалов во время обработки высоким давлением, тогда как добавление этилендиаминтетрауксусной кислоты уменьшало их образование.

Электронный парамагнитный резонанс также успешно применяли в анализе влияния антиоксидантов на ингибирование свободных радикалов при обжаривании мяса [105], влияния разных видов упаковки (вакуумная, активная с розмарином, с поглотителем кислорода) на образование радикалов в мясе при хранении [106], для выявления и количественной оценки степени окисления в обезвоженном курином мясе [107].

M. Zhang et al. [108] изучали прямое антиоксидантное действие белка теплового шока Hsp90, полученного из утиной мышцы. Авторы показали, что Hsp90, являясь природным антиоксидантом, может связываться как с фосфолипидами, так и с окисленными фосфолипидами, и предотвращать их дальнейшее окисление и, таким образом, играет важную роль в клеточной защите от окислительного стресса.

В исследовании [109] отмечено потенциальное использование электронного парамагнитного резонанса при изучении структуры, фазового перехода и свойств, связанных с вязкостью пищевых продуктов во время приготовления и хранения, а также окислительной и радиостабильности пищевых компонентов. Кроме того, метод EPR-оксиметрии со спиновой меткой можно применять в исследованиях по изучению взаимодействия отдельных компонентов мяса в процессе технологической обработки, так как предоставляется возможность оценить структурные и динамические свойства клеточных мембран, влияющие на диффузию и транспорт кислорода.

Результаты упомянутых исследований показывают, что электронный парамагнитный резонанс эффективен при оценке качества мяса, особенно при определении его окислительного / антиоксидантного статуса.

Лазерно-индуцированная эмиссионная спектроскопия (атомно-эмиссионная спектроскопия)

Лазерно-индуцированная пробойная спектроскопия (LIBS) является перспективным методом в области атомно-эмиссионной спектроскопии [110]. Данный метод использует мощные лазерные импульсы, сфокусированные на поверхности образца, для генерации плазмы. Внутри этой плазмы атомы и ионы возбуждаются до более высоких энергетических состояний. Возбужденные частицы испускают фотоны с характерными длинами волн, которые указывают на химические элементы, присутствующие в образце. LIBS исследует этот «атомный отпечаток» целевого материала [111]. Метод нашел широкое применение в различных областях, в том числе в пищевом производстве [112]. В работе [113] использовали лазерно-индуцированную пробойную спектроскопию для обнаружения меди в говяжьих субпродуктах. В ходе дальнейшего исследования по оценке пространственных возможностей LIBS удалось успешно картировать содержание меди в образце, что указывает на пригодность LIBS для предоставления пространственной информации и следовательно, потенциального использования на гетерогенных образцах.

G. Bilge et al. [114] использовали LIBS в сочетании с PCA для классификации мяса (свинины, говядины и курицы) после измельчения и прессования, достигнув уровня распознавания

83,37 %. Кроме того, авторы провели количественный анализ методом частичных наименьших квадратов для фальсифицированных мясных продуктов, получив значения коэффициента детерминации и предела обнаружения 0,994 и 4,4 % для говядины, фальсифицированной свиной, и 0,999 и 2,0% для говядины, фальсифицированной курицей, соответственно. В работе [115] при анализе фальсификации говядины R^2 составил 0,947, а предел обнаружения – 3,8 %, схожие результаты были получены и в исследовании [116]. Y.W. Chu et al. применили мультипликативную коррекцию рассеяния для первой предварительной обработки спектра и модель К-ближайшего соседа (KNN) для его дальнейшего анализа, повысив точность идентификации образцов мяса с 94,17 до 100 %, снизив коэффициент дисперсии предсказания с 5,16 до 0,56 % [117].

Для повышения точности определения сортов свежего мяса с помощью лазерно-индуцированной эмиссионной спектроскопии авторы [118] использовали модель LightGBM в сочетании с алгоритмом Optuna. Процедура включала в себя выравнивание ломтиков свежего мяса с помощью стеклянных предметных стекол и сбор спектральных данных плазмы с поверхностей тканей свежего мяса (свиной, говядины и курицы). В конечном итоге модель LightGBM достигла точности более 93 % для разных видов мяса.

Таким образом, технологии LIBS имеют хороший потенциал в области классификации и выявления фальсификации мяса, предоставляя быстрые и точные результаты в различных приложениях и моделях статистической обработки данных спектров.

Импедансная спектроскопия

Электрохимическая импедансная спектроскопия (EIS) – это неразрушающий и высокочувствительный метод анализа электрических свойств образцов путем возбуждения переменных электрических сигналов на разных частотах и измерения соответствующих сигналов [119]. Метод измеряет электрический импеданс электрохимической системы путем фиксации небольшого синусоидального напряжения на определенной частоте и измерения результирующего переменного тока. Отношение тока к напряжению соответствует импедансу, который является комплексным числом, представленным модулем $|Z|$ и фазовым сдвигом θ ; в качестве альтернативы импеданс может быть пред-

ставлен действительной частью Z_R и мнимой частью Z_I . Другими словами, результаты импеданса могут быть представлены двумя различными способами, а именно – в виде графика Боде, который отображает импеданс и фазовый сдвиг как функцию частоты, и графика Найквиста, который отображает Z_R в зависимости от Z_I .

Таким образом, данная спектроскопия анализирует электрические свойства мяса, в частности его проводимость и диэлектрическую проницаемость. Устанавливается функция импеданса в зависимости от частот, которая далее коррелируется с физическими параметрами и свойствами мяса с целью анализа и дальнейшей оценки. Изменения мышечной ткани в процессе созревания оказывают влияние на сильноанизотропный характер структуры. Отслеживая изменения импеданса в соответствии с углом между направлением электрического поля и основным направлением волокон, можно получить измерение структурного состояния и, следовательно, состояния созревания. В работе [120] было показано, что индекс линейного импеданса и контактный импеданс тесно взаимосвязаны с прочностью мясных волокон. Была получена высокая корреляция ($R^2 = 0,79$) на основе линейного индекса и сделан вывод, что эти два параметра можно использовать для прогнозирования состояния созревания мяса.

L. Buwen et al. измерили фазу и модуль импеданса охлажденной баранины с различным временем хранения и температурой, используя 2 и 4 электрода соответственно, а затем сгенерировали карту импеданса высокого разрешения. Результаты показали, что модель на основе ансамблевого обучения в стеке демонстрирует наивысшую производительность с точностью 0,960, 0,986 для 2- и 4-электродов соответственно, что намного выше, чем у алгоритма одиночного машинного обучения [121]. В исследовании [122] предложен аналогичный подход для различения глубокой порчи вяленых окороков с использованием частотного диапазона от 100 Гц до 1 МГц.

Авторы статьи [123] применяли импеданс для различения свежих и замороженных-размороженных мышц куриной грудки и установили, что жевательность и выраженная потеря мясного сока положительно коррелировали с параметрами импеданса, тогда как твердость – отрицательно. F.C. Schmidt et al. изучали содержание влаги в курином мясе грудки во время

процесса приготовления с различным временем нагрева, получив точность прогнозирования влажности 0,9388 [124].

EIS также можно применять для определения изменений в мясе в процессе созревания. Авторы [125] использовали модель эквивалентной цепи для моделирования спектра импеданса. Говядина показала более высокое внеклеточное сопротивление и более высокую мембранную емкость, чем телятина, из-за более толстых и менее сочных мышечных волокон. Были получены следующие результаты для разных параметров: внеклеточная жидкость уменьшается с 6-го по 14-й день примерно на 7–25 %, внутриклеточная жидкость увеличивается с 6-го по 14-й день примерно на 3–12 % в зависимости от типа мышц.

В исследовании [126] достигли 90 %-го разделения говядины в зависимости от степени созревания на основе модели прогнозирования внутриклеточного сопротивления. Авторы отметили, что включение дополнительных признаков, связанных с физической характеристикой мышц, улучшает разделяемость образцов, в конечном итоге 99,6 %-е разделение может быть достигнуто путем выбора соответствующих признаков.

J. Qiu, et al. изучали возможности EIS для быстрой идентификации говядины, фальсифицированной каррагинаном, а также повторных циклов замораживания-оттаивания, применяя различные методы предварительной обработки спектров, достигнув точности классификации 84 % [127].

Спектроскопия ядерного магнитного резонанса

В основе спектроскопии ядерного магнитного резонанса (NMR) лежит поглощение радиочастотного электромагнитного излучения ядром образца с ненулевым магнитным моментом при помещении его в постоянное магнитное поле. В настоящее время наиболее распространены два вида NMR: ^1H и ^{13}C . В анализе мяса применяют спектроскопию протонного ядерного магнитного резонанса (^1H NMR). При анализе пищевых продуктов подходы метаболомики нацелены на метаболиты животного или растительного происхождения гидрофильной и/или гидрофобной природы с низкой молекулярной массой ≤ 1000 Да. С помощью ^1H NMR можно получить характерную картину метаболитов, называемую «химическим отпечатком пальца», в

пределах одного спектра [128]. Применение метаболомики на основе ^1H NMR в пищевом секторе в последние годы постоянно расширяется, особенно в сочетании с многомерными статистическими методами.

В работе [129] метод применяли для различения говядины из четырех стран путем анализа водных экстрактов мяса. Основными метаболитами, ответственными за дифференциацию, были сукцинат и различные аминокислоты, включая изолейцин, лейцин, метионин, тирозин и валин. Авторы отметили, что метаболомика на основе ЯМР является эффективным методом выявления различий в отпечатках пальцев между образцами сырой говядины, а несколько метаболитов, включая различные аминокислоты и сукцинат, могут являться биомаркерами для определения географического происхождения сырья.

Другое исследование [130] посвящено проверке подлинности говядины и конины на частоте 60 МГц для выявления различий в сигнатурах триацилглицеридов. В статье [131] авторы показали, что анализ неполярных метаболитов мяса с помощью ^1H NMR в сочетании с многомерной статистикой позволяет успешно дифференцировать виды мяса (свинина, говядина, птица и баранина): 98 % проанализированных образцов сырого мяса и 97 % мясных продуктов были правильно классифицированы. Кроме того, описаны соответствующие спектральные области для идентификации потенциальных химических маркеров (неполярных метаболитов), таких как линолевые кислоты, трансжирные кислоты и холестерин. В работе [128] вероятность правильного прогнозирования вида мяса также составила 99 % для сырых образцов, а для мясных продуктов – 93 %. Авторы провели идентификацию спектральных областей, соответствующих полярным химическим маркерам.

Спектроскопию ядерного магнитного резонанса применяли при оценке влияния возраста на химический состав мяса утки [132]. Комплексный многомерный анализ данных показал значительные различия между образцами, которые выдерживались в течение четырех различных периодов времени: лактат и ансерин увеличивались с возрастом, фумарат, бетаин, таурин, инозин и алкилзамещенные свободные аминокислоты уменьшались.

A.B. García-García et al. в своем исследовании показали, что метаболомика на основе ^1H NMR

дает ценную информацию о метаболических изменениях, произошедших в мясе во время хранения, и о том, как эти изменения могут быть затронуты обработкой образцов электронным пучком [133]. Особенностью данной работы является то, что в качестве образцов для анализа авторы использовали мясной экссудат (мясной сок), который является легкодоступным без изменения или разрушения образца, из которого он получен, и присутствует в небольших количествах в коммерческих упаковках мяса.

Фурье-спектроскопия

Этот метод спектроскопии (FTS) использует алгоритм Фурье (FT) для преобразования необработанных данных в оптический спектр, который вычисляется по отклику во временной или пространственной области. FT применяют с разными спектроскопическими методами (оптическая, рамановская, магнитно-резонансная визуализация, масс-спектрометрия и электронный спиновой резонанс) [134], однако чаще всего – при работе с инфракрасной спектроскопией (FTIR, FT-NIRS).

Системы FTS представляют собой спектрофотометры, в которых используются интерферометры для модуляции электромагнитного сигнала, и компьютер для получения спектров. В этих приборах все длины волн взаимодействуют с детектором одновременно, и к данным применяется FT для получения типичного спектра [135]. Световые лучи расщепляются и затем рекомбинируются в интерферометре, что достигается за счет использования зеркал. Данный метод является быстрым благодаря одновременному измерению длин волн и показывает оптимальное для последующей обработки отношение сигнал/шум.

ИК-Фурье-спектроскопия пищевых продуктов применяется для исследования химической структуры, молекулярного взаимодействия, их изменения вследствие различного технологического воздействия [14]. Образцы мяса многокомпонентны, так как содержат белки, липиды, углеводы, нуклеиновые кислоты и т. д., а ИК-Фурье спектр отражает суперпозицию всех составляющих и позволяет идентифицировать их по специфическим полосам поглощения. Для анализа качественного и оценки количественного состава образцов, определения конформации макромолекул используют такие показатели спектра, как интенсивность, форма, а также волновое число полосы. В работе [136] показа-

но, что FTIR является быстрым инструментом мониторинга ферментативного гидролиза белка.

Авторы исследования [137] применяли FT-NIRS в сочетании с многомерным анализом для выявления и количественной оценки фальсификации говяжьего фарша мясом индейки. Образцы анализировали в сыром, замороженно-размороженном и вареном виде. Разработанные регрессионные модели PLS показали точность определения 87–89 %, а модели PLS-DA позволили точно различать низкий (< 20 %) и высокий (≥ 20 %) уровни фальсификации.

M. Schmutzler et al. [135] сравнили результаты по выявлению свинины в говяжьей колбасе (уровень внесения 10–50 %) с применением трех разработанных установок на основе FT-NIR: настольной лабораторной (800–2500 нм), промышленной с волоконно-оптическим зондом (800–2500 нм) и портативного спектрофотометра (1596–2396 нм). Измерения проводили как напрямую, так и через полимерную упаковку и кварцевые кюветы. Для анализа полученных данных применяли машину опорных векторов и PCA. Авторы сообщили, что лабораторная и промышленная установки способны выявлять фальсификацию с пределом обнаружения 10 %. Обе установки с измерениями через кварцевые кюветы имели точность классификации 100 %. Сканирование образцов непосредственно через полимерную упаковку с помощью оптоволоконного зонда привело к снижению точности классификации до 91,7 %. Портативное устройство также успешно различало чистые и фальсифицированные образцы. В отличие от результатов, полученных с использованием кварцевых кювет, снижение точности характеристик наблюдалось для измерений, полученных при сканировании полимерной упаковки. Из-за перекрытия различных кластеров PCA и потери интенсивности сигнала точность классификации SVM снизилась до 83,3 %.

Авторы [138] изучали структурные изменения макромолекул в свинине, вызванные обработкой высоким давлением. FTIR-спектры показали зависящее от давления и времени уменьшение числа α -спиралей и конформаций β -слоев белков. Авторы отметили, что уменьшение интенсивности полос поглощения при 1655 и 1454 cm^{-1} , относящихся к типу коллагена I, было прямо пропорционально давлению и времени обработки, что свидетельствует о высвобождении денатурированного коллагена в мясной сок.

В спектрах мясного сока изменение формы, частот и интенсивности полос амида I и II по сравнению с контролем свидетельствовало об изменении вторичной структуры белка и соотношения α -спирали и β -слоя. Интенсивность полос 1394 и 1124 см^{-1} увеличивалась пропорционально увеличению давления и времени обработки. Авторы пришли к выводу, что FTIR-анализ мясного сока – значительно более быстрый и простой метод, чем анализ мяса.

В работе [139] сравнивали ИК-Фурье спектроскопию со спектроскопией комбинационного рассеяния, чтобы предсказать микробиологическую порчу образцов говяжьего фарша, хранившихся в различных условиях упаковки (аэробная упаковка и упаковка в модифицированной атмосфере). Отмечено, что модели FTIR в целом лучше предсказывали общее количество микроорганизмов, *Lactic acid bacteria* и *Enterobacteriaceae* по сравнению с моделями RS.

Онлайн-применение методов спектроскопии в мясной промышленности

Для онлайн-измерений важнейшим условием является пригодность конструкции спектрометра для интеграции в технологический процесс [140]. Для этой цели устройство должно быть достаточно компактным и иметь возможность удаленного управления через Ethernet или оптоволоконные датчики. В зависимости от условий применения приборы должны быть взрывозащищенными, водонепроницаемыми и легкоочищаемыми. Кроме того, они должны выдерживать суровые технологические условия, такие как высокие или низкие температуры, вибрация, пыль и влажность. Также немаловажной характеристикой является прочность и небольшое количество движущихся частей. Материалы, находящиеся в прямом контакте, должны быть безопасны для мясных продуктов и инертны в потенциально химически сложных условиях. Требуется точный результат в режиме реального времени в сочетании с быстрой обработкой, анализом и хранением данных. При проведении измерений на линии подготовка проб невозможна, поэтому используются неповрежденные образцы в том виде, в котором они встречаются в технологическом процессе. Несмотря на суровые условия работы спектрометров, сбор репрезентативных и надежных спектров в промышленных условиях остается сложной задачей из-за колебаний температуры, перемещения образцов, внешнего вида образцов и их

неоднородности. Для практического использования спектрометры должны быть быстрыми и простыми в обслуживании с минимальными нарушениями производственного процесса. Наконец, крайне желательна простота использования, не требующая специальных знаний обслуживающего персонала во время повседневной работы.

В ряде работ [23, 41, 45–47, 140] сообщается об успешном применении методов спектроскопии непосредственно на производстве.

В зависимости от реализации процесса можно выделить офлайн, оперативные (на линии) и поточные (онлайн) измерения [16]:

- офлайн: анализ проб, отобранных с перерывами, в удаленной или централизованной лаборатории;

- на линии: использование специального прибора, установленного в непосредственной близости от технологической линии, с возможностью кондиционирования пробы;

- онлайн: исследование не непосредственно в производственном потоке/технологической линии, может быть с использованием контура рециркуляции или автоматизированной системы отбора проб, интегрированной в технологический поток для подачи и подготовки проб к прибору для анализа или с прямым подключением прибора к производственному потоку/технологической линии.

Несмотря на быстрое развитие, широкое применение спектроскопических методов в промышленных условиях все еще ограничено. Это обусловлено в первую очередь сложностями калибровки прогностических моделей. Также значение имеют параметры сбора данных и условия окружающей среды, которые могут влиять на надежность модели. К таким параметрам относятся время сканирования, расстояние от образца до детектора, температура образца, температура в помещении, влажность, условия освещения и другие. Большинство мясоперерабатывающих предприятий в связи с требованиями пищевой безопасности работают при низких температурах, что также необходимо учитывать. Для корректного анализа спектров и снижения проблемы мультиколлинеарности необходимо исключать избыточные признаки, применяя различные алгоритмы обработки, так как первоначальные данные содержат большое количество информации. Несмотря на представленные в статье недостатки, спектроскопические

методы имеют большой потенциал применения непосредственно на мясном производстве.

Заключение. Мясная промышленность, в связи с быстрым развитием, в настоящее время нуждается в экологически чистых и быстрых методах анализа, обеспечивающих качество поступающего мясного сырья и выпускаемых готовых продуктов. Хотя большинство применяемых традиционных методов обладают высокой точностью, они являются разрушительными, трудоемкими и дорогостоящими. В качестве альтернативы современные неразрушающие спектроскопические методы могут обеспечить последовательную и объективную оценку исследуемых образцов.

Спектроскопические методы активно развиваются по мере совершенствования приборной базы, появления высокоскоростных компьютеров и разработки соответствующих хемометри-

ческих алгоритмов. Перспективным является создание систем контроля качества мясного сырья и продуктов, способных работать в режиме онлайн/реального времени непосредственно на производстве. Первоначальные попытки применения портативных спектроскопических приборов неразрушающего контроля достигли относительного успеха, однако их масштабное применение требует дальнейших, более углубленных исследований и разработки устройств с более высокой чувствительностью и разрешением. Поскольку мясная система является достаточно сложной, а объем получаемой информации велик, практический интерес представляет сочетание методов спектроскопии с методами визуализации для комплексной оценки образцов за счет полного использования многомерной информации.

Список источников

1. Wu X., Liang X., Wang Y., et al. Non-Destructive Techniques for the Analysis and Evaluation of Meat Quality and Safety: A Review // *Foods* (Basel, Switzerland). 2022. Vol. 11, N 22. P. 3713. DOI: 10.3390/foods11223713.
2. Kutsanedzie F.Y.H., Guo Z., Chen Q. Advances in nondestructive methods for meat quality and safety monitoring // *Food Reviews International*. 2019. Vol. 35, N 6. P. 536–562. DOI: 10.1080/87559129.2019.1584814.
3. Alander J.T., Bochko V., Martinkauppi B., et al. A review of optical non-destructive visual and near-infrared methods for food quality and safety // *International Journal of Spectroscopy*. 2013. Article 341402. DOI: 10.1155/2013/341402.
4. Sanchez P.D.C., Hashim N., Shamsudin R., et al. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2020. N 96. P. 208–221. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.027.
5. Hassoun A., Crobotova J., Rustad T., et al. Use of spectroscopic techniques for a rapid and non-destructive monitoring of thermal treatments and storage time of sous-vide cooked cod fillets // *Sensors* (Switzerland). 2020. Vol. 20, N 8. P. 2410. DOI: 10.3390/s20082410.
6. Su H., Sha K., Zhang L., et al. Development of near Infrared Reflectance Spectroscopy to Predict Chemical Composition with a Wide Range of Variability in Beef // *Meat Science*. 2014. Vol. 98, N 2. P. 110–114. DOI: 10.1016/j.meatsci.2013.12.019.
7. Nunes K.M., Andrade M.V., Santos Filho A.M., et al. Detection and Characterisation of Frauds in Bovine Meat in Natura by Non-Meat Ingredient Additions Using Data Fusion of Chemical Parameters and ATR-FTIR Spectroscopy // *Food Chemistry*. 2016. N 205. P. 14–22. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.02.
8. Peng Y., Wang W. Application of Near-Infrared Spectroscopy for Assessing Meat Quality and Safety // *Infrared Spectroscopy – Anharmonicity of Biomolecules, Crosslinking of Biopolymers, Food Quality and Medical Applications*. InTech, 2015. DOI: 10.5772/58912.
9. Karoui R., Downey G., Blecker C. Mid-infrared spectroscopy coupled with chemometrics: a tool for the analysis of intact food systems and the exploration of their molecular structure-quality relationships – a review // *Chemical reviews*. 2010. Vol. 110, N 10. P. 6144–6168. DOI: 10.1021/cr100090k.
10. Ruiz M., Beriain M.J., Beruete M., et al. Application of MIR spectroscopy to the evaluation of chemical composition and quality parameters of foal meat: a preliminary study // *Foods*. 2020. N 9. P. 583. DOI: 10.3390/foods9050583.

11. Chen Q., Zhang C., Zhao J., et al. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety // *Trends in Analytical Chemistry*. 2013. N 52. P. 261–274. DOI: 10.1016/j.trac.2013.09.007.
12. Kutsanedzie F.Y., Chen Q., Hassan M.M., et al. Near Infrared System coupled chemometric algorithms for enumeration of total fungi count in cocoa beans neat solution // *Food Chemistry*. 2018. N 240. P. 231–238. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.07.117.
13. Wu Z.S., Ouyang G.Q., Shi X.Y., et al. Absorption and quantitative characteristics of C-H bond and O-H bond of NIR // *Optics and Spectroscopy*. 2014. N 117. P. 703–709. DOI: 10.1134/S0030400X1411023X.
14. Hussain N., Sun D.W., Pu H. Classical and emerging non-destructive technologies for safety and quality evaluation of cereals: A review of recent applications // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. N 91. P. 598–608. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.07.018.
15. Ben-Gera I., Norris K.H. Direct Spectrophotometric Determination of Fat and Moisture in Meat Products // *Journal of Food Science*. 1968. Vol. 33, N 1. P. 64–67. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1968.tb00885.x.
16. Porep J.U., Kammerer D.R., Carle R. On-Line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production // *Trends Food Science & Technology*. 2015. Vol. 46, N 2. P. 211–230. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.10.002.
17. Prevolnik M., Čandek-Potokar M., Škorjanc D., et al. Predicting Intramuscular Fat Content in Pork and Beef by near Infrared Spectroscopy // *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2005. Vol. 13, N 2. P. 77–85. DOI: 10.1255/jnirs.460.
18. Liao Y.-T., Fan Y.-X., Cheng F. On-line prediction of fresh pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy // *Meat Science*. 2010. Vol. 86, N 4. P. 901–907. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.07.011.
19. Prieto N., Andrés S., Giráldez F.J., et al. Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples // *Meat Science*. 2006. Vol. 74, N 3. P. 487–496. DOI: 10.1016/j.meatsci.2006.04.030.
20. Viljoen M., Hoffman L.C., Brand T.S. Prediction of the chemical composition of mutton with near infrared reflectance spectroscopy // *Small Ruminant Research*. 2007. Vol. 69, N 1-3. P. 88–94. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.12.019.
21. Berzaghi P., Dalla Zotte A., Jansson L.M., et al. Near-infrared reflectance spectroscopy as a method to predict chemical composition of breast meat and discriminate between different n-3 feeding sources // *Poultry Science*. 2005. Vol. 84, N 1. P. 128–136. DOI: 10.1093/ps/84.1.128.
22. Narsaiah K., Biswas A.K., Mandal P.K. Nondestructive methods for carcass and meat quality evaluation // *Meat Quality Analysis*. 2020. P. 37–49. DOI: 10.1016/B978-0-12-819233-7.00003-3.
23. Wang W., Zhang C., Zhang F., et al. Real-time and online inspection of multiple pork quality parameters using dual-band Visible/Near-Infrared Spectroscopy // *Food Analytical Methods*. 2020. N 13. P. 1764–1773. DOI: 10.1007/s12161-020-01801-8.
24. Weng S., Guo B., Tang P., et al. Rapid detection of adulteration of minced beef using Vis/NIR reflectance spectroscopy with multivariate methods // *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2020. N 230. Article 118005. DOI: 10.1016/j.saa.2019.118005.
25. Leng T., Li F., Xiong L., et al. Quantitative detection of binary and ternary adulteration of minced beef meat with pork and duck meat by NIR combined with chemometrics // *Food Control*. 2020. N 113. Article 107203. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107203.
26. Huang L., Zhao J., Chen Q., et al. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques // *Food chemistry*. 2014. N 145. P. 228–236. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.06.073.
27. González-Mohino A., Antequera T., Ventanas S., et al. Near-infrared spectroscopy-based analysis to study sensory parameters on pork loins as affected by cooking methods and conditions // *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018. N 98. P. 4227–4236. DOI: 10.1002/jsfa.8944.
28. Perez-Palacios T., Caballero D., González-Mohino A., et al. Near infrared reflectance spectroscopy to analyse texture related characteristics of sous vide pork loin // *Journal of Food Engineering*. 2019. N 263. P. 417–423. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.07.028.

29. Liao Y.-T., Fan Y.-X., Cheng F. On-Line Prediction of Fresh Pork Quality Using Visible / Near-Infrared Reflectance Spectroscopy // *Meat Science*. 2010. Vol. 86, N 4. P. 901–907. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.07.011.
30. Wang W., Peng Y., Li Y., et al. Nondestructive detection of pork quality based on dual-band VIS/NIR spectroscopy // *Proc. SPIE 9488, Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety VII*. Article 201594880T. DOI: 10.1117/12.2176831.
31. Collell C., Gou P., Arnau J., et al. Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy // *Food chemistry*. 2011. Vol. 129, N 2. P. 601–607. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.04.073.
32. Prevolnik M., Skrlep M., Janes L., et al. Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham // *Meat science*. 2011. Vol. 88, N 2. P. 299–304. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.01.007.
33. Pan W., Zhao J., Chen Q. Classification of foodborne pathogens using near infrared (NIR) laser scatter imaging system with multivariate calibration // *Scientific reports*. 2015. N 5. Article 9524. DOI: 10.1038/srep09524.
34. Chen Q., Cai J., Wan X., et al. Application of Linear and Non-Linear Classification Algorithms in Discrimination of Pork Storage Time Using Fourier Transform near Infrared (FT-NIR) Spectroscopy // *LWT – Food Science and Technology*. 2011. Vol. 44, N 10. P. 2053–2058. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.05.015.
35. Kuswandi B., Cendekiawan K.A., Kristiningrum N., et al. Pork adulteration in commercial meatballs determined by chemometric analysis of NIR Spectra // *Journal of food measurement and characterization*. 2015. N 9. P. 313–323. DOI: 10.1007/s11694-015-9238-3.
36. Prieto N., Lopez-Campos O., Aalhus J.L., et al. Use of near infrared spectroscopy for estimating meat chemical composition, quality traits and fatty acid content from cattle fed sunflower or flaxseed // *Meat science*. 2014. Vol. 98, N 2. P. 279–288. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.005.
37. Morsy N., Sun D.W. Robust linear and non-linear models of NIR spectroscopy for detection and quantification of adulterants in fresh and frozen-thawed minced beef // *Meat science*. 2013. Vol. 93, N 2. P. 292–302. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.09.005.
38. Alamprese C., Casale M., Sinelli N., et al. Detection of minced beef adulteration with turkey meat by UV-vis, NIR and MIR spectroscopy // *LWT – Food Science and Technology*. 2013. Vol. 53, N 1. P. 225–232. DOI: 10.1016/j.lwt.2013.01.027.
39. Rady A., Adedeji A. Assessing different processed meats for adulterants using visible-near-infrared spectroscopy // *Meat science*. 2018. N 136. P. 59–67. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.10.014.
40. Barbin D.F., Kaminishikawahara C.M., Soares A.L., et al. Prediction of chicken quality attributes by near infrared spectroscopy // *Food chemistry*. 2015. N 168. P. 554–560. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.101.
41. De Marchi M., Riovanto R., Penasa M., et al. At-line prediction of fatty acid profile in chicken breast using near infrared reflectance spectroscopy // *Meat science*. 2012. Vol. 90, N 3. P. 653–657. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.10.009.
42. Bowker B., Hawkins S., Zhuang H. Measurement of water-holding capacity in raw and freeze-dried broiler breast meat with visible and near-infrared spectroscopy // *Poultry science*. 2014. Vol. 93, N 7. P. 1834–1841. DOI: 10.3382/ps.2013-03651.
43. Tøgersen G., Arnesen J.F., Nilsen B.N., et al. On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy // *Meat Science*. 2003. N 63. P. 515–523. DOI: 10.1016/S0309-1740(02)00113-4.
44. Tschudi J., O'Farrell M., Hestnes Bakke K.A. Inline spectroscopy: from concept to function // *Applied Spectroscopy*. 2018. Vol. 72, N 9. P. 1298–1309. DOI: 10.1177/0003702818788374.
45. Dixit Y., Casado-Gavaldà M.P., Cama-Moncunill R., et al. Developments and challenges in online NIR spectroscopy for meat processing // *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017. Vol. 16, N 6. P. 1172–1187. DOI: 10.1111/1541-4337.12295.
46. O'Farrell M., Bakke K.A.H., Tschudi J., et al. Near-infrared (NIR) interactance system for non-contact monitoring of the temperature profile of baked liver pâté // *Applied Spectroscopy*. 2011. Vol. 65, N 12. P. 1372–1379. DOI: 10.1366/11-06277.

47. Wold J.P., O'Farrell M., Tschudi J., et al. In-line and non-destructive monitoring of core temperature in sausages during industrial heat treatment by NIR interaction spectroscopy // *Journal of Food Engineering*. 2020. N 277. P. 109921. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2020.109921.
48. Han C., Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band // *IEEE Communications Magazine*. 2018. Vol. 56, N 6. P. 96–101. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700898.
49. Zhang C., Yuan Y., Wu K., et al. Driving DNA origami assembly with a terahertz wave // *Nano Letters*. 2022. Vol. 22, N 1. P. 468–475. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04369.
50. Huang X.B., Hou D.B., Huang P.J., et al. The meat freshness detection based on terahertz wave // *Selected papers of the photoelectronic technology committee conferences*. 2015. N 9795. P. 748–753.
51. Zhang N., Lim S.J., Toh J.M., et al. Investigation of spoilage in salmon by electrochemical impedance spectroscopy and time-domain terahertz spectroscopy // *ChemPhysMater*. 2022. Vol. 1, N 2. P. 148–154. DOI: 10.1016/j.chphma.2021.12.003.
52. Xiong H.T., Sun H.Y., Zhou J.P., et al. Terahertz anisotropy in fascia and lean meat tissues // *Biomedical Optics Express*. 2022. Vol. 13, N 5. P. 2605–2615. DOI: 10.1364/BOE.454338.
53. Qi L., Zhao M.C., Zhao J., et al. Preliminary investigation of terahertz spectroscopy to predict pork freshness non-destructively // *Food Science and Technology*. 2019. N 39. P. 563–570. DOI: 10.1590/fst.25718.
54. Wang Y.M., Wang Q., Zhao Z.S., et al. Rapid qualitative and quantitative analysis of chlortetracycline hydrochloride and tetracycline hydrochloride in environmental samples based on terahertz frequency-domain spectroscopy // *Talanta*. 2018. N 190. P. 284–291. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.08.008.
55. Yang S., Li C., Li C., et al. Study of meat identification based on terahertz spectroscopy // *Food and Fermentation Industries*. 2021. Vol. 47, N 11. P. 227–235. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025489.
56. Pchelkina V.A., Chernukha I.M., Fedulova L.V., et al. Raman spectroscopic techniques for meat analysis: A review // *Theory and Practice of Meat Processing*. 2022. Vol. 7, N 2. P. 97–111. DOI: 10.21323/2414-438X-2022-7-2-97-111.
57. Cama-Moncunill R., Cafferky J., Augier C., et al. Prediction of Warner-Bratzler shear force, intramuscular fat, drip-loss and cook-loss in beef via Raman spectroscopy and chemometrics // *Meat science*. 2020. N 167. P. 108157. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108157.
58. Fowler S.M., Schmidt H., Scheier R., et al. Raman spectroscopy for predicting meat quality traits. In: *Advanced Technologies for Meat Processing*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2018.
59. Schmidt H., Scheier R., Hopkins D.L. Preliminary investigation on the relationship of Raman spectra of sheep meat with shear force and cooking loss // *Meat Science*. 2013. Vol. 93, N 1. P. 138–143. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.08.019.
60. Yang H., Hopkins D.L., Zhang Y., et al. Preliminary investigation of the use of Raman spectroscopy to predict beef spoilage in different types of packaging // *Meat science*. 2020. N 165. Article 108136. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108136.
61. Nache M., Hinrichs J., Scheier R., et al. Prediction of the pH as indicator of porcine meat quality using Raman spectroscopy and metaheuristics // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2016. N 154. P. 45–51. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.03.011.
62. Andersen P.V., Afseth N.K., Gjerlaug-Enger E., et al. Prediction of water holding capacity and pH in porcine longissimus lumborum using Raman spectroscopy // *Meat Science*. 2021. N 172. Article 108357. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108357.
63. Fowler S.M., Ponnampalam E.N., Schmidt H., et al. Prediction of intramuscular fat content and major fatty acid groups of lamb m. Longissimus lumborum using Raman spectroscopy // *Meat Science*. 2015. N 110. P. 70–75. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.06.016.
64. Chernukha I., Kotenkova E., Pchelkina V., et al. Pork fat and meat: a balance between consumer expectations and nutrient composition of four pig breeds // *Foods*. 2023. Vol. 12, N 4. Article 690. DOI: 10.3390/foods12040690.
65. Logan B.G., Hopkins D.L., Schmidtke L., et al. Preliminary investigation into the use of Raman spectroscopy for the verification of Australian grass and grain fed beef // *Meat Science*. 2020. N 160. Article 107970. DOI: 10.1016/j.meatsci.2019.107970.

66. Scheier R., Bauer A., Schmidt H. Early postmortem prediction of meat quality traits of porcine semi-membranosus muscles using a portable Raman system // *Food and Bioprocess Technology*. 2014. Vol. 7, N 9. P. 2732–2741. DOI: 10.1007/s11947-013-1240-3.
67. Herrero A.M. Raman Spectroscopy for Monitoring Protein Structure in Muscle Food Systems // *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2008. Vol. 48, N 6. P. 512–523. DOI: 10.1080/10408390701537385.
68. Berhe D.T., Lawaetz A.J., Engelsen S.B., et al. Accurate determination of endpoint temperature of cooked meat after storage by Raman spectroscopy and chemometrics // *Food Control*. 2015. N 52. P. 119–125. DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.12.011.
69. Saleem M., Amin A., Irfan M. Raman spectroscopy based characterization of cow, goat and buffalo fats // *Journal of Food Science and Technology*. 2021. N 58. P. 234–243. DOI: 10.1007/s13197-020-04535-x.
70. Lee J.Y., Park J.H., Mun H., et al. Quantitative analysis of lard in animal fat mixture using visible Raman spectroscopy // *Food chemistry*. 2018. N 254. P. 109–114. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.185.
71. Boyaci I.H., Uysal R.S., Temiz T., et al. A rapid method for determination of the origin of meat and meat products based on the extracted fat spectra by using of Raman spectroscopy and chemometric method // *European Food Research and Technology*. 2014. N 238. P. 845–852. DOI: 10.1007/s00217-014-2168-1.
72. Zając A., Hanuza J., Dymińska L. Raman spectroscopy in determination of horse meat content in the mixture with other meats // *Food chemistry*. 2014. N 156. P. 333–338. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.02.002.
73. Robert C., Fraser-Miller S.J., Jessep W.T., et al. Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy // *Food chemistry*. 2021. N 343. Article 128441. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128441.
74. Martín-Gómez A., Arroyo-Manzanares N., García-Nicolás M., et al. Portable Raman spectrometer as a screening tool for characterization of Iberian dry-cured ham // *Foods*. 2021. Vol. 10, N 6. Article 1177. DOI: 10.3390/foods10061177.
75. Tomasevic I., Nedeljkovic A., Stanisic N., et al. Authenticity assessment of cooked emulsified sausages using Raman spectroscopy and chemometrics // *Fleischwirtschaft – Frankfurt*. 2016. N 3. P. 70–73.
76. Sowoidnich K., Schmidt H., Kronfeldt H.-D., et al. A portable 671 nm Raman sensor system for rapid meat spoilage identification // *Vibrational Spectroscopy*. 2012. N 62. P. 70–76. DOI: 10.1016/j.vibspec.2012.04.002.
77. Meisel S., Stöckel S., Rösch P., et al. Identification of meat-associated pathogens via Raman microspectroscopy // *Food microbiology*. 2014. N 38. P. 36–43. DOI: 10.1016/j.fm.2013.08.007.
78. Cho I.H., Bhandari P., Patel P., et al. Membrane filter-assisted surface enhanced Raman spectroscopy for the rapid detection of *E. coli* O157:H7 in ground beef // *Biosensors & bioelectronics*. 2015. N 64. P. 171–176. DOI: 10.1016/j.bios.2014.08.063.
79. Hassoun A., Sahar A., Lakhal L., et al. 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 – Food Science and Technology*. 2019. N 103. P. 279–292. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.01.021.
80. Ait-Kaddour A., Thomas A., Mardon J., et al. Potential of fluorescence spectroscopy to predict fatty acid composition of beef // *Meat science*. 2016. N 113. P. 124–131. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.11.020.
81. Karoui R., Blecker C. Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems – a review // *Food and Bioprocess Technology*. 2011. N 4. P. 364–386. DOI: 10.1007/s11947-010-0370-0.
82. Jensen S.A., Reenberg S., Munck L. A.D. Francisko, editor. United State patent US 4631413, 1986.
83. Jensen S.A., Reenberg S., Munck L. Fluorescence analysis in fish and meat technology. In: *Fluorescence analysis in foods*. London: Longman Group, 1989. P. 181–192.
84. Swatland H.J., Barbut S. Optical prediction of processing characteristics of turkey meat using UV fluorescence and NIR birefringence // *Food Research International*. 1995. Vol. 28, N 4. P. 325–330. DOI: 10.1016/0963-9969(95)00048-Q.

85. Swatland H.J., Findlay C.J. On-line probe prediction of beef toughness, correlating sensory evaluation with fluorescence detection of connective tissue and dynamic analysis of overall toughness // *Food Quality and Preference*. 1997. Vol. 8, N 3. P. 233–239. DOI: 10.1016/S0950-3293(96)00053-5.
86. Egelandsdal B., Wold J.P., Spornich A., et al. On attempts to measure the tenderness of Longissimus Dorsi muscles using fluorescence emission spectra // *Meat science*. 2002. Vol. 60, N 2. P. 187–202. DOI: 10.1016/S0309-1740(01)00121-8.
87. Brøndum J., Munck L., Henckel P., et al. Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy // *Meat science*. 2000. Vol. 55, N 2. P. 177–185. DOI: 10.1016/S0309-1740(99)00141-2.
88. Allais I., Viaud C., Pierre A., et al. A rapid method based on front-face fluorescence spectroscopy for the monitoring of the texture of meat emulsions and frankfurters // *Meat science*. 2004. Vol. 67, N 2. P. 219–229. DOI: 10.1016/j.meatsci.2003.10.009.
89. Oto N., Oshita S., Makino Y., et al. Non-destructive evaluation of ATP content and plate count on pork meat surface by fluorescence spectroscopy // *Meat science*. 2013. Vol. 93, N 3. P. 579–585. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.11.010.
90. Gatellier P., Santé-Lhoutellier V., Portanguen S., et al. Use of meat fluorescence emission as a marker of oxidation promoted by cooking // *Meat Science*. 2009. Vol. 83, N 4. P. 651–656. DOI: 10.1016/J.MEATSCI.2009.07.015.
91. Mitra B., Lametsch R., Akcan T., et al. Pork proteins oxidative modifications under the influence of varied time-temperature thermal treatments: a chemical and redox proteomics assessment // *Meat Science*. 2018. N 140. P. 134–144. DOI: 10.1016/J.MEATSCI.2018.03.011.
92. Sahar A., Boubellouta T., Portanguen S., et al. Synchronous front-face fluorescence spectroscopy coupled with parallel factors (PARAFAC) analysis to study the effects of cooking time on meat // *Journal of Food Science*. 2009. Vol. 74, N 9. P. E534–E539. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01365.x.
93. Sahar A., Portanguen S., Dufour A.K.É. Potential of synchronous fluorescence spectroscopy coupled with chemometrics to determine the heterocyclic aromatic amines in grilled meat // *European Food Research and Technology*. 2010. N 231. P. 803–812. DOI: 10.1007/s00217-010-1323-6.
94. Sahar A., Rahman U., Kondjoyan A., et al. Monitoring of thermal changes in meat by synchronous fluorescence spectroscopy // *Journal of Food Engineering*. 2016. N 168. P. 160–165. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2015.07.038.
95. Deb-Choudhury S., Haines S., Harland D., et al. Effect of cooking on meat proteins: mapping hydrothermal protein modification as a potential indicator of bioavailability // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014. Vol. 62, N 32. P. 8187–8196. DOI: 10.1021/jf502668w.
96. Islam K., Mahbub S.B., Clement S., et al. Autofluorescence excitation-emission matrices as a quantitative tool for the assessment of meat quality // *Journal of biophotonics*. 2020. Vol. 13, N 1. Article 201900237. DOI: 10.1002/jbio.201900237.
97. Aït-Kaddour A., Loudiyi M., Ferlay A., et al. Performance of fluorescence spectroscopy for beef meat authentication: Effect of excitation mode and discriminant algorithms // *Meat science*. 2018. N 137. P. 58–66. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.11.002.
98. Nguyen T., Kim S., Kim J.G. Diffuse reflectance spectroscopy to quantify the met-myoglobin proportion and meat oxygenation inside of pork and beef // *Food chemistry*. 2019. N 275. P. 369–376. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.121.
99. Shin S., Lee Y., Kim S., et al. Rapid and non-destructive spectroscopic method for classifying beef freshness using a deep spectral network fused with myoglobin information // *Food chemistry*. 2021. N 352. Article 129329. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129329.
100. Danyal K., Yang Z.Y., Seefeldt L.C. Electron paramagnetic resonance spectroscopy // *Methods in molecular biology*. 2011. N 766. P. 191–205. DOI: 10.1007/978-1-61779-194-9_13.
101. Roessler M.M., Salvadori E. Principles and applications of EPR spectroscopy in the chemical sciences // *Chemical Society reviews*. 2018. Vol. 47, N 8. P. 2534–2553. DOI: 10.1039/c6cs00565a.
102. Iravani S., Soufi G.J. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy: food, biomedical and pharmaceutical analysis // *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 2020. Vol. 9, N 3-4. P. 165–182. DOI: 10.3233/BSI-200206.

103. Gadjeva V., Stankov I.V.I., Nikolova G., et al. Oxidative/antioxidant status of different muscles of fresh pork meat // *International Journal of Science and Research*. 2015. Vol. 4, N 3. P. 155–160.
104. Bolumar T., Andersen M.L., Orlie V. Mechanisms of radical formation in beef and chicken meat during high pressure processing evaluated by electron spin resonance detection and the addition of antioxidants // *Food chemistry*. 2014. N 150. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.10.161.
105. Bolumar T., LaPeña D., Skibsted L.H., et al. Rosemary and oxygen scavenger in active packaging for prevention of high-pressure induced lipid oxidation in pork patties // *Food Packaging and Shelf Life*. 2016. N 7. P. 26–33. DOI: 10.1016/j.fpsl.2016.01.002.
106. Bao Y., Zhu Y., Ren X., et al. Formation and inhibition of lipid alkyl radicals in roasted meat // *Foods*. 2020. Vol. 9, N 5. P. 572. DOI: 10.3390/foods9050572.
107. Nissen L.R., Månsson L., Bertelsen G., et al. Protection of dehydrated chicken meat by natural antioxidants as evaluated by electron spin resonance spectrometry // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2000. Vol. 48, N 11. P. 5548–5556. DOI:10.1021/jf0003552.
108. Zhang M., Wang D., Xu X., et al. Evaluation of antioxidant property of heat shock protein 90 from duck muscle // *Animal bioscience*. 2021. Vol. 34, N 4. P. 724–733. DOI: 10.5713/ajas.19.0854.
109. Yu L.L., Cheng Z. Application of electron spin resonance (ESR) spectrometry in nutraceutical and food research // *Molecular nutrition & food research*. 2008. Vol. 52, N 1. P. 62–78. DOI: 10.1002/mnfr.200700395.
110. Zou Z., Deng Y., Hu J., et al. Recent trends in atomic fluorescence spectrometry towards miniaturized instrumentation-A review // *Analytica chimica acta*. 2018. Vol. 1019. P. 25–37. DOI: 10.1016/j.aca.2018.01.061.
111. Pagnotta S., Lezzerini M., Ripoll-Seguer L., et al. Micro-Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (Micro-LIBS) Study on Ancient Roman Mortars // *Applied spectroscopy*. 2017. Vol. 71, N 4. P. 721–727. DOI: 10.1177/0003702817695289.
112. Tian Y., Chen Q., Lin Y., et al. Quantitative determination of phosphorus in seafood using laser-induced breakdown spectroscopy combined with machine learning // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021. N 175. Article 106027. DOI: 10.1016/j.sab.2020.106027.
113. Casado-Gavaldà M.P., Dixit Y., Geulen D., et al. Quantification of copper content with laser induced breakdown spectroscopy as a potential indicator of offal adulteration in beef // *Talanta*. 2017. N 169. P. 123–129. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.03.071.
114. Bilge G., Velioglu H.M., Sezer B., et al. Identification of meat species by using laser-induced breakdown spectroscopy // *Meat science*. 2016. N 119. P. 118–122. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.04.035.
115. Velioglu H.M., Sezer B., Bilge G., et al. Identification of offal adulteration in beef by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) // *Meat Science*. 2018. N 138. P. 28–33. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.12.003.
116. Chen C., Zhang Q., Ma Q., et al. LightGBM-PPI: Predicting protein-protein interactions through LightGBM with multi-information fusion // *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2019. N 191. P. 54–64. DOI: 10.1016/j.chemolab.2019.06.003.
117. Chu Y.W., Tang S.S., Ma S.X., et al. Accuracy and stability improvement for meat species identification using multiplicative scatter correction and laser-induced breakdown spectroscopy // *Optics Express*. 2018. Vol. 26, N 8. P. 10119–10127. DOI: 10.1364/OE.26.010119.
118. Mo K., Tang Y., Zhu Y., et al. Fresh Meat Classification Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Assisted by LightGBM and Optuna // *Foods*. 2024. Vol. 13, N 13. Article 2028. DOI: 10.3390/foods13132028.
119. Zhao X., Zhuang H., Yoon S.C., et al. Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances // *Journal of Food Quality*. 2017. Article 6370739. DOI: 10.1155/2017/6370739.
120. Damez J.L., Clerjon S., Abouelkaram S., et al. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing // *Journal of Food Engineering*. 2008. Vol. 85, N 1. P. 116–122. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.026.
121. Buwen L., Wei C., Li X., et al. Incorporating Bioimpedance technique with ensemble learning algorithm for mutton tenderness detection // *Food and Bioprocess Technology*. 2023. N 16. P. 2761–2771. DOI: 10.1007/s11947-023-03065-6.

122. De Jesús C., Hernández-Coronado G., Girón J., et al. Classification of unaltered and altered dry-cured ham by impedance spectroscopy: a preliminary study // *Meat science*. 2014. Vol. 98. N 4. P. 695–700. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.05.014.
123. Chen T., Zhu Y., Han M., et al. Classification of chicken muscle with different freeze–thaw cycles using impedance and physicochemical properties // *Journal of Food Engineering*. 2017. N 196. P. 94–100. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.10.003.
124. Schmidt F.C., Fuentes A., Masot R., et al. Assessing heat treatment of chicken breast cuts by impedance spectroscopy // *Food Science and Technology International*. 2017. Vol. 23. N 2. P. 110–118. DOI: 10.1177/1082013216659609.
125. Guerhazi M., Kanoun O., Derbel N. Investigation of long time beef and veal meat behaviour by bio-impedance spectroscopy for meat monitoring // *IEEE Sensors Journal*. 2014. Vol. 14, N 10. P. 3624–3630. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2328858.
126. Guerhazi M., Kallel A.Y., Kanoun O. Explainable feature engineering for multi-modal tissue state monitoring based on Impedance spectroscopy // *Sensors*. 2024. Vol. 24, N 16. Article 5209. DOI: 10.3390/s24165209.
127. Qiu J., Lin Y., Wu J., et al. Rapid beef quality detection using spectra pre-processing methods in electrical impedance spectroscopy and machine learning // *International Journal of Food Science and Technology*. 2024. Vol. 59. N 3. P. 1624–1634. DOI: 10.1111/ijfs.16915.
128. Decker C., Krapf R., Kuballa T., et al. Differentiation of meat species of raw and processed meat based on polar metabolites using ^1H NMR spectroscopy combined with multivariate data analysis // *Frontiers in Nutrition*. 2022. N 9. Article 985797. DOI: 10.3389/fnut.2022.985797.
129. Jung Y., Lee J., Kwon J., et al. Discrimination of the geographical origin of beef by ^1H NMR-based metabolomics // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010. Vol. 58, N 19. P. 10458–10466. DOI: 10.1021/jf102194t.
130. Jakes W., Gerdova A., Defernez M., et al. Authentication of beef versus horse meat using 60 MHz ^1H NMR spectroscopy // *Food chemistry*. 2015. N 175. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.110.
131. Decker C., Krapf R., Kuballa T., et al. Nontargeted analysis of lipid extracts using ^1H NMR spectroscopy combined with multivariate statistical analysis to discriminate between the animal species of raw and processed meat // *Journal of agricultural and food chemistry*. 2022. Vol. 70, N 23. P. 7230–7239. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c01871.
132. Liu C., Pan D., Ye Y., et al. ^1H NMR and multivariate data analysis of the relationship between the age and quality of duck meat // *Food Chemistry*. 2013. Vol. 141, N 2. P. 1281–1286. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.03.102.
133. García-García A.B., Herrera A., Fernández-Valle M.E., et al. Evaluation of E-beam irradiation and storage time in pork exudates using NMR metabolomics // *Food research international*. 2019. N 120. P. 553–559. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.11.005.
134. McCharthy W.J., Kemeny G.J., Burns D.A., Ciurczak E.W., editors. Fourier transform spectrophotometers in the near-infrared. In: *Handbook of Near-Infrared Analysis*, 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA; 2008. P. 79–91.
135. Schmutzler M., Beganovic A., Böhler G., et al. Methods for detection of pork adulteration in veal product based on FT-NIR spectroscopy for laboratory, industrial and on-site analysis // *Food Control*. 2015. N 57. P. 258–267. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.04.019.
136. Kaffle B., Böcker U., Wubshet S., et al. Fourier-Transform infrared spectroscopy for characterization of liquid protein solutions: a comparison of two sampling techniques // *Vibrational Spectroscopy*. 2022. N 124. Article 103490. DOI: 10.1016/j.vibspec.2022.103490.
137. Alamprese C., Amigo J.M., Casiraghi E., et al. Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics // *Meat Science*. 2016. N 121. P. 175–181. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.06.018.
138. Argyri A.A., Jarvis R.M., Wedge D., et al. A comparison of Raman and FT-IR spectroscopy for the prediction of meat spoilage // *Food Control*. 2013. Vol. 29, N 2. P. 461–470. DOI: 10.1016/j.foodcont.2012.05.040.

139. Shi Y., Wang X., Borhan M.S., et al. A review on meat quality evaluation methods based on non-destructive computer vision and artificial intelligence technologies // *Food Science of Animal Resources*. 2021. Vol. 41, N 4. P. 563–588. DOI: 10.5851/kosfa.2021.e25.
140. Santos C.C., Zhao J., Dong X., et al. Predicting aged pork quality using a portable Raman device // *Meat Science*. 2018. N 145. P. 79–85. DOI: 10.1016/j.meatsci.2018.05.021.

References

1. Wu X, Liang X, Wang Y, et al. Non-Destructive Techniques for the Analysis and Evaluation of Meat Quality and Safety: A Review. *Foods (Basel, Switzerland)*. 2022;11(22):3713. DOI: 10.3390/foods11223713.
2. Kutsanedzie FYH, Guo Z, Chen Q. Advances in nondestructive methods for meat quality and safety monitoring. *Food Reviews International*. 2019;35(6):536-562. DOI: 10.1080/87559129.2019.1584814.
3. Alander JT, Bochko V, Martinkauppi B, et al. A review of optical non-destructive visual and near-infrared methods for food quality and safety. *International Journal of Spectroscopy*. 2013;341402. DOI: 10.1155/2013/341402.
4. Sanchez PDC, Hashim N, ShamsudinR, et al. Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review. *Trends in Food Science & Technology*. 2020;96:208-221. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.12.027.
5. Hassoun A, Crotova J, Rustad T, et al. Use of spectroscopic techniques for a rapid and non-destructive monitoring of thermal treatments and storage time of sous-vide cooked cod fillets. *Sensors (Switzerland)*. 2020;20(8):2410. DOI: 10.3390/s20082410.
6. Su H, Sha K, Zhang L, et al. Development of near Infrared Reflectance Spectroscopy to Predict Chemical Composition with a Wide Range of Variability in Beef. *Meat Science*. 2014;98(2):110-114. DOI: 10.1016/j.meatsci.2013.12.019.
7. Nunes KM, Andrade MV, Santos Filho AM, et al. Detection and Characterisation of Frauds in Bovine Meat in Natura by Non-Meat Ingredient Additions Using Data Fusion of Chemical Parameters and ATR-FTIR Spectroscopy. *Food Chemistry*. 2016;205:14-22. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.02.
8. Peng Y, Wang W. Application of Near-Infrared Spectroscopy for Assessing Meat Quality and Safety. *Infrared Spectroscopy – Anharmonicity of Biomolecules, Crosslinking of Biopolymers, Food Quality and Medical Applications*. InTech. 2015. DOI: 10.5772/58912.
9. Karoui R, Downey G, Blecker C. Mid-infrared spectroscopy coupled with chemometrics: a tool for the analysis of intact food systems and the exploration of their molecular structure-quality relationships – a review. *Chemical reviews*. 2010;110(10):6144-6168. DOI: 10.1021/cr100090k.
10. Ruiz M, Beriain MJ, Beruete M, et al. Application of MIR spectroscopy to the evaluation of chemical composition and quality parameters of foal meat: a preliminary study. *Foods*. 2020;9:583. DOI: 10.3390/foods9050583.
11. Chen Q, Zhang C, Zhao J, et al. Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. *Trends in Analytical Chemistry*. 2013;52:261-274. DOI: 10.1016/j.trac.2013.09.007.
12. Kutsanedzie FY, Chen Q, Hassan MM, et al. Near Infrared System coupled chemometric algorithms for enumeration of total fungi count in cocoa beans neat solution. *Food Chemistry*. 2018;240:231-238. DOI: j.foodchem.2017.07.117.
13. Wu ZS, Ouyang GQ, Shi XY, et al. Absorption and quantitative characteristics of C-H bond and O-H bond of NIR. *Optics and Spectroscopy*. 2014;117:703-709. DOI: 10.1134/S0030400X1411023X.
14. Hussain N, Sun DW, Pu H. Classical and emerging non-destructive technologies for safety and quality evaluation of cereals: A review of recent applications. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;91:598-608. DOI: 10.1016/j.tifs.2019.07.018.
15. Ben-Gera I, Norris KH. Direct Spectrophotometric Determination of Fat and Moisture in Meat Products. *Journal of Food Science*. 1968;33(1):64-67. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1968.tb00885.x.
16. Porep JU, Kammerer DR, Carle R. On-Line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. *Trends Food Science & Technology*. 2015;46(2):211-230. DOI: 10.1016/j.tifs.2015.10.002.

17. Prevolnik M, Čandek-Potokar M, Škorjanc D, et al. Predicting Intramuscular Fat Content in Pork and Beef by near Infrared Spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*. 2005;13(2):77-85. DOI: 10.1255/jnirs.460.
18. Liao Y-T, Fan Y-X, Cheng F. On-line prediction of fresh pork quality using visible/near-infrared reflectance spectroscopy. *Meat Science*. 2010;86(4):901-907. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.07.011.
19. Prieto N, Andrés S, Giráldez FJ, et al. Potential use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) for the estimation of chemical composition of oxen meat samples. *Meat Science*. 2006;74(3):487-496. DOI: 10.1016/j.meatsci.2006.04.030.
20. Viljoen M, Hoffman LC, Brand TS. Prediction of the chemical composition of mutton with near infrared reflectance spectroscopy. *Small Ruminant Research*. 2007;69(1-3):88-94. DOI: 10.1016/j.smallrumres.2005.12.019.
21. Berzaghi P, Dalla Zotte A, Jansson LM, et al. Near-infrared reflectance spectroscopy as a method to predict chemical composition of breast meat and discriminate between different n-3 feeding sources. *Poultry. Science*. 2005;84(1):128-136. DOI: 10.1093/ps/84.1.128.
22. Narsaiah K, Biswas AK, Mandal PK. Nondestructive methods for carcass and meat quality evaluation. *Meat Quality Analysis*. 2020:37-49. DOI: 10.1016/B978-0-12-819233-7.00003-3.
23. Wang W, Zhang C, Zhang F, et al. Real-time and online inspection of multiple pork quality parameters using dual-band Visible/Near-Infrared Spectroscopy. *Food Analytical Methods*. 2020;13:1764-1773. DOI: 10.1007/s12161-020-01801-8.
24. Weng S, Guo B, Tang P, et al. Rapid detection of adulteration of minced beef using Vis/NIR reflectance spectroscopy with multivariate methods. *Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. 2020;230:118005. DOI: 10.1016/j.saa.2019.118005.
25. Leng T, Li F, Xiong L, et al. Quantitative detection of binary and ternary adulteration of minced beef meat with pork and duck meat by NIR combined with chemometrics. *Food Control*. 2020;113:107203. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107203.
26. Huang L, Zhao J, Chen Q, et al. Nondestructive measurement of total volatile basic nitrogen (TVB-N) in pork meat by integrating near infrared spectroscopy, computer vision and electronic nose techniques. *Food chemistry*. 2014;145:228-236. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.06.073.
27. González-Mohino A, Antequera T, Ventanas S, et al. Near-infrared spectroscopy-based analysis to study sensory parameters on pork loins as affected by cooking methods and conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2018;98:4227-4236. DOI: 10.1002/jsfa.8944.
28. Perez-Palacios T, Caballero D, González-Mohino A, et al. Near infrared reflectance spectroscopy to analyse texture related characteristics of sous vide pork loin. *Journal of Food Engineering*. 2019;263:417-423. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.07.028.
29. Liao Y-T, Fan Y-X, Cheng F. On-Line Prediction of Fresh Pork Quality Using Visible/ Near-Infrared Reflectance Spectroscopy. *Meat Science*. 2010;86(4):901-907. DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.07.011.
30. Wang W, Peng Y, Li Y, et al. Nondestructive detection of pork quality based on dual-band VIS/NIR spectroscopy. *Proc. SPIE 9488, Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety VII*. 201594880T. DOI: 10.1117/12.2176831.
31. Collell C, Gou P, Arnau J, et al. Non-destructive estimation of moisture, water activity and NaCl at ham surface during resting and drying using NIR spectroscopy. *Food chemistry*. 2011;129(2):601-607. DOI: 10.1016/j.foodchem.2011.04.073.
32. Prevolnik M, Skrlep M, Janes L, et al. Accuracy of near infrared spectroscopy for prediction of chemical composition, salt content and free amino acids in dry-cured ham. *Meat science*. 2011;88(2):299-304. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.01.007.
33. Pan W, Zhao J, Chen Q. Classification of foodborne pathogens using near infrared (NIR) laser scatter imaging system with multivariate calibration. *Scientific reports*. 2015;5:9524. DOI: 10.1038/srep09524.
34. Chen Q, Cai J, Wan X, et al. Application of Linear and Non-Linear Classification Algorithms in Discrimination of Pork Storage Time Using Fourier Transform near Infrared (FT-NIR) Spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2011;44(10):2053-2058. DOI: 10.1016/j.lwt.2011.05.015.

35. Kuswandi B, Cendekiawan KA, Kristiningrum N, et al. Pork adulteration in commercial meatballs determined by chemometric analysis of NIR Spectra. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2015;9:313-323. DOI: 10.1007/s11694-015-9238-3.
36. Prieto N, Lopez-Campos O, Aalhus JL, et al. Use of near infrared spectroscopy for estimating meat chemical composition, quality traits and fatty acid content from cattle fed sunflower or flaxseed. *Meat science*. 2014;98(2):279-288. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.005.
37. Morsy N, Sun DW. Robust linear and non-linear models of NIR spectroscopy for detection and quantification of adulterants in fresh and frozen-thawed minced beef. *Meat science*. 2013;93(2):292-302. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.09.005.
38. Alamprese C, Casale M, Sinelli N, et al. Detection of minced beef adulteration with turkey meat by UV-vis, NIR and MIR spectroscopy. *LWT – Food Science and Technology*. 2013;53(1):225-232. DOI: 10.1016/j.lwt.2013.01.027.
39. Rady A, Adedeji A. Assessing different processed meats for adulterants using visible-near-infrared spectroscopy. *Meat science*. 2018;136:59-67. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.10.014.
40. Barbin DF, Kaminishikawahara CM, Soares AL, et al. Prediction of chicken quality attributes by near infrared spectroscopy. *Food chemistry*. 2015;168:554-560. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.07.101.
41. De Marchi M, Riovanto R, Penasa M, et al. At-line prediction of fatty acid profile in chicken breast using near infrared reflectance spectroscopy. *Meat science*. 2012;90(3):653-657. DOI: 10.1016/j.meatsci.2011.10.009.
42. Bowker B, Hawkins S, Zhuang H. Measurement of water-holding capacity in raw and freeze-dried broiler breast meat with visible and near-infrared spectroscopy. *Poultry science*. 2014;93(7):1834-1841. DOI: 10.3382/ps.2013-03651.
43. Tøgersen G, Arnesen JF, Nilsen BN, et al. On-line prediction of chemical composition of semi-frozen ground beef by non-invasive NIR spectroscopy. *Meat Science*. 2003;63:515-523. DOI: 10.1016/S0309-1740(02)00113-4.
44. Tschudi J, O'Farrell M, Hestnes Bakke KA. Inline Spectroscopy: From Concept to Function. *Applied Spectroscopy*. 2018;72(9):1298-1309. DOI: 10.1177/0003702818788374.
45. Dixit Y, Casado-Gavaldà MP, Cama-Moncunill R, et al. Developments and challenges in online NIR spectroscopy for meat processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017;16(6):1172-1187. DOI: 10.1111/1541-4337.12295.
46. O'Farrell M, Bakke KAH, Tschudi J, et al. Near-infrared (NIR) interactance system for non-contact monitoring of the temperature profile of baked liver pâté. *Applied Spectroscopy*. 2011;65(12):1372-1379. DOI: 10.1366/11-06277.
47. Wold JP, O'Farrell M, Tschudi J, et al. In-line and non-destructive monitoring of core temperature in sausages during industrial heat treatment by NIR interaction spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. 2020;277:109921. DOI: 10.1016/J.JFOODENG.2020.109921.
48. Han C, Chen Y. Propagation Modeling for Wireless Communications in the Terahertz Band. *IEEE Communications Magazine*. 2018;56(6):96-101. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700898.
49. Zhang C, Yuan Y, Wu K, et al. Driving DNA origami assembly with a terahertz wave. *Nano Letters*. 2022;22(1):468-475. DOI: 10.1021/acs.nanolett.1c04369.
50. Huang XB, Hou DB, Huang PJ, et al. The meat freshness detection based on terahertz wave. *Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences*. 2015;9795:748-753.
51. Zhang N, Lim SJ, Toh JM, et al. Investigation of spoilage in salmon by electrochemical impedance spectroscopy and time-domain terahertz spectroscopy. *ChemPhysMater*. 2022;1(2):148-154. DOI: 10.1016/j.chphma.2021.12.003.
52. Xiong HT, Sun HY, Zhou JP, et al. Terahertz anisotropy in fascia and lean meat tissues. *Biomedical Optics Express*. 2022;13(5):2605-2615. DOI: 10.1364/BOE.454338.
53. Qi L, Zhao MC, Zhao J, et al. Preliminary investigation of terahertz spectroscopy to predict pork freshness non-destructively. *Food Science and Technology*. 2019;39:563-570. DOI: 10.1590/fst.25718.
54. Wang YM, Wang Q, Zhao ZS, et al. Rapid qualitative and quantitative analysis of chlortetracycline hydrochloride and tetracycline hydrochloride in environmental samples based on terahertz frequency-domain spectroscopy. *Talanta*. 2018;190: 284-291. DOI: 10.1016/j.talanta.2018.08.008.

55. Yang S, Li C, Li C, et al. Study of meat identification based on terahertz spectroscopy. *Food and Fermentation Industries*. 2021;47(11):227-235. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025489.
56. Pchelkina VA, Chernukha IM, Fedulova LV, et al. (). Raman spectroscopic techniques for meat analysis: A review. *Theory and Practice of Meat Processing*. 2022;7(2):97-111. DOI: 10.21323/2414-438X-2022-7-2-97-111.
57. Cama-Moncunill R, Cafferky J, Augier C, et al. Prediction of Warner-Bratzler shear force, intramuscular fat, drip-loss and cook-loss in beef via Raman spectroscopy and chemometrics. *Meat science*. 2020;167:108157. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108157.
58. Fowler SM, Schmidt H, Scheier R, et al. *Raman spectroscopy for predicting meat quality traits*. In: Advanced Technologies for Meat Processing. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2018.
59. Schmidt H, Scheier R, Hopkins DL. Preliminary investigation on the relationship of Raman spectra of sheep meat with shear force and cooking loss. *Meat Science*. 2013;93(1):138-143. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.08.019.
60. Yang H, Hopkins DL, Zhang Y, et al. Preliminary investigation of the use of Raman spectroscopy to predict beef spoilage in different types of packaging. *Meat science*. 2020;165:108136. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108136.
61. Nache M, Hinrichs J, Scheier R, et al. Prediction of the pH as indicator of porcine meat quality using Raman spectroscopy and metaheuristics. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2016;154:45-51. DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.03.011.
62. Andersen PV, Afseth NK, Gjerlaug-Enger E, et al. Prediction of water holding capacity and pH in porcine longissimus lumborum using Raman spectroscopy. *Meat Science*. 2021;172:108357. DOI: 10.1016/j.meatsci.2020.108357.
63. Fowler SM, Ponnampalam EN, Schmidt H, et al. Prediction of intramuscular fat content and major fatty acid groups of lamb m. Longissimus lumborum using Raman spectroscopy. *Meat Science*. 2015;110:70-75. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.06.016.
64. Chernukha I, Kotenkova E, Pchelkina V, et al. Pork fat and meat: a balance between consumer expectations and nutrient composition of four pig breeds. *Foods*. 2023;12(4):690. DOI: 10.3390/foods12040690.
65. Logan BG, Hopkins DL, Schmidtke L, et al. Preliminary investigation into the use of Raman spectroscopy for the verification of Australian grass and grain fed beef. *Meat Science*. 2020;160:107970. DOI: 10.1016/j.meatsci.2019.107970.
66. Scheier R, Bauer A, Schmidt H. Early postmortem prediction of meat quality traits of porcine semi-membranosus muscles using a portable Raman system. *Food and Bioprocess Technology*. 2014;7(9):2732-2741. DOI: 10.1007/s11947-013-1240-3.
67. Herrero AM. Raman Spectroscopy for Monitoring Protein Structure in Muscle Food Systems. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2008;48(6):512-523. DOI: 10.1080/10408390701537385.
68. Berhe DT, Lawaetz AJ, Engelsen SB, et al. Accurate determination of endpoint temperature of cooked meat after storage by Raman spectroscopy and chemometrics. *Food Control*. 2015;52:119-125. DOI: 10.1016/j.foodcont.2014.12.011.
69. Saleem M, Amin A, Irfan M. Raman spectroscopy based characterization of cow, goat and buffalo fats. *Journal of Food Science and Technology*. 2021;58:234-243. DOI: 10.1007/s13197-020-04535-x.
70. Lee JY, Park JH, Mun H, et al. Quantitative analysis of lard in animal fat mixture using visible Raman spectroscopy. *Food chemistry*. 2018;254:109-114. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.01.185.
71. Boyaci IH, Uysal RS, Temiz T, et al. A rapid method for determination of the origin of meat and meat products based on the extracted fat spectra by using of Raman spectroscopy and chemometric method. *European Food Research and Technology*. 2014;238:845-852. DOI: 10.1007/s00217-014-2168-1.
72. Zając A, Hanuza J, Dymińska L. Raman spectroscopy in determination of horse meat content in the mixture with other meats. *Food chemistry*. 2014;156:333-338. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.02.002.
73. Robert C, Fraser-Miller SJ, Jessep WT, et al. Rapid discrimination of intact beef, venison and lamb meat using Raman spectroscopy. *Food chemistry*. 2021;343:128441. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128441.
74. Martín-Gómez A, Arroyo-Manzanares N, García-Nicolás M, et al. Portable Raman Spectrometer as a Screening Tool for Characterization of Iberian Dry-Cured Ham. *Foods*. 2021;10(6):1177. DOI: 10.3390/foods10061177.

75. Tomasevic I, Nedeljkovic A, Stanisic N, et al. Authenticity assessment of cooked emulsified sausages using Raman spectroscopy and chemometrics. *Fleischwirtschaft – Frankfurt*. 2016;3:70-73.
76. Sowoidnich K, Schmidt H, Kronfeldt H-D, et al. A portable 671 nm Raman sensor system for rapid meat spoilage identification. *Vibrational Spectroscopy*. 2012;62:70-76. DOI: 10.1016/j.vibspec.2012.04.002.
77. Meisel S, Stöckel S, Rösch P, et al. Identification of meat-associated pathogens via Raman microspectroscopy. *Food microbiology*. 2014;38:36-43. DOI: 10.1016/j.fm.2013.08.007.
78. Cho IH, Bhandari P, Patel P, et al. Membrane filter-assisted surface enhanced Raman spectroscopy for the rapid detection of E. coli O157:H7 in ground beef. *Biosensors & bioelectronics*. 2015;64:171-176. DOI: 10.1016/j.bios.2014.08.063.
79. Hassoun A, Sahar A, Lakhal L, et al. 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 – Food Science and Technology*. 2019;103:279-292. DOI: 10.1016/j.lwt.2019.01.021.
80. Aït-Kaddour A, Thomas A, Mardon J, et al. Potential of fluorescence spectroscopy to predict fatty acid composition of beef. *Meat science*. 2016;113:124-131. DOI: 10.1016/j.meatsci.2015.11.020.
81. Karoui R, Blecker C. Fluorescence spectroscopy measurement for quality assessment of food systems – a review. *Food and Bioprocess Technology*. 2011;4:364-386. DOI: 10.1007/s11947-010-0370-0
82. Jensen SA, Reenberg S, Munck L. AD. Francisko, editor. United State patent US 4631413, 1986.
83. Jensen SA, Reenberg S, Munck L. Fluorescence analysis in fish and meat technology. In: Fluorescence analysis in foods. London: Longman Group; 1989. P. 181–192.
84. Swatland HJ, Barbut S. Optical prediction of processing characteristics of turkey meat using UV fluorescence and NIR birefringence. *Food Research International*. 1995;28(4):325-330. DOI: 10.1016/0963-9969(95)00048-Q.
85. Swatland HJ, Findlay CJ. On-line probe prediction of beef toughness, correlating sensory evaluation with fluorescence detection of connective tissue and dynamic analysis of overall toughness. *Food Quality and Preference*. 1997;8(3):233-239. DOI: 10.1016/S0950-3293(96)00053-5.
86. Egelandsdal B, Wold JP, Sponnich A, et al. On attempts to measure the tenderness of Longissimus Dorsi muscles using fluorescence emission spectra. *Meat science*. 2002;60(2):187-202. DOI: 10.1016/S0309-1740(01)00121-8.
87. Brøndum J, Munck L, Henckel P, et al. Prediction of water-holding capacity and composition of porcine meat by comparative spectroscopy. *Meat science*. 2000;55(2):177-185. DOI: 10.1016/S0309-1740(99)00141-2.
88. Allais I, Viaud C, Pierre A, et al. A rapid method based on front-face fluorescence spectroscopy for the monitoring of the texture of meat emulsions and frankfurters. *Meat science*. 2004;67(2):219-229. DOI: 10.1016/j.meatsci.2003.10.009.
89. Oto N, Oshita S, Makino Y, et al. Non-destructive evaluation of ATP content and plate count on pork meat surface by fluorescence spectroscopy. *Meat science*. 2013;93(3):579-585. DOI: 10.1016/j.meatsci.2012.11.010.
90. Gatellier P, Santé-Lhoutellier V, Portanguen S, et al. Use of meat fluorescence emission as a marker of oxidation promoted by cooking. *Meat Science*. 2009;83(4):651–656. DOI: 10.1016/J.MEATSCI.2009.07.015.
91. Mitra B, Lametsch R, Akcan T, et al. Pork proteins oxidative modifications under the influence of varied time-temperature thermal treatments: a chemical and redox proteomics assessment. *Meat Science*. 2018;140:134-144. DOI: 10.1016/J.MEATSCI.2018.03.011.
92. Sahar A, Boubellouta T, Portanguen S, et al. Synchronous front-face fluorescence spectroscopy coupled with parallel factors (PARAFAC) analysis to study the effects of cooking time on meat. *Journal of Food Science*. 2009;74(9):E534-E539. DOI: 10.1111/j.1750-3841.2009.01365.x.
93. Sahar A, Portanguen S, Dufour AKÉ. Potential of synchronous fluorescence spectroscopy coupled with chemometrics to determine the heterocyclic aromatic amines in grilled meat. *European Food Research and Technology*. 2010;231:803-812. DOI: 10.1007/s00217-010-1323-6.
94. Sahar A, Rahman U, Kondjoyan A, et al. Monitoring of thermal changes in meat by synchronous fluorescence spectroscopy. *Journal of Food Engineering*. 2016;168:160-165. DOI: 10.1016/J.JFOOD-ENG.2015.07.038.

95. Deb-Choudhury S, Haines S, Harland D, et al. Effect of cooking on meat proteins: mapping hydro-thermal protein modification as a potential indicator of bioavailability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2014;62(32):8187-8196. DOI: 10.1021/jf502668w.
96. Islam K, Mahbub SB, Clement S, et al. Autofluorescence excitation-emission matrices as a quantitative tool for the assessment of meat quality. *Journal of biophotonics*. 2020;13(1):e201900237. DOI: 10.1002/jbio.201900237.
97. Aït-Kaddour A, Loudiyi M, Ferlay A, et al. Performance of fluorescence spectroscopy for beef meat authentication: Effect of excitation mode and discriminant algorithms. *Meat science*. 2018;137:58-66. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.11.002.
98. Nguyen T, Kim S, Kim JG. Diffuse reflectance spectroscopy to quantify the met-myoglobin proportion and meat oxygenation inside of pork and beef. *Food chemistry*. 2019;275:369-376. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.121.
99. Shin S, Lee Y, Kim S, et al. Rapid and non-destructive spectroscopic method for classifying beef freshness using a deep spectral network fused with myoglobin information. *Food chemistry*. 2021;352:129329. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.129329.
100. Danyal K, Yang ZY, Seefeldt LC. Electron paramagnetic resonance spectroscopy. *Methods in molecular biology*. 2011;766:191-205. DOI: 10.1007/978-1-61779-194-9_13.
101. Roessler MM, Salvadori E. Principles and applications of EPR spectroscopy in the chemical sciences. *Chemical Society reviews*. 2018;47(8):2534-2553. DOI: 10.1039/c6cs00565a.
102. Iravani S, Soufi GJ. Electron paramagnetic resonance (EPR) spectroscopy: food, biomedical and pharmaceutical analysis. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 2020;9(3-4):165-182. DOI: 10.3233/BSI-200206.
103. Gadjeva V, Stankov IVI, Nikolova G, et al. Oxidative/antioxidant status of different muscles of fresh pork meat. *International Journal of Science and Research*. 2015;4(3):155-160.
104. Bolumar T, Andersen ML, Orlén V. Mechanisms of radical formation in beef and chicken meat during high pressure processing evaluated by electron spin resonance detection and the addition of antioxidants. *Food chemistry*. 2014;150:422-428. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.10.161.
105. Bolumar T, LaPeña D, Skibsted LH, et al. Rosemary and oxygen scavenger in active packaging for prevention of high-pressure induced lipid oxidation in pork patties. *Food Packaging and Shelf Life*. 2016;7:26-33. DOI: 10.1016/j.fpsl.2016.01.002.
106. Bao Y, Zhu Y, Ren X, et al. Formation and inhibition of lipid alkyl radicals in roasted meat. *Foods*. 2020;9(5):572. DOI: 10.3390/foods9050572.
107. Nissen LR, Månsson L, Bertelsen G, et al. Protection of dehydrated chicken meat by natural antioxidants as evaluated by electron spin resonance spectrometry. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2000;48(11):5548-5556. DOI:10.1021/jf0003552.
108. Zhang M, Wang D, Xu X, et al. Evaluation of antioxidant property of heat shock protein 90 from duck muscle. *Animal bioscience*. 2021;34(4):724-733. DOI: 10.5713/ajas.19.0854.
109. Yu LL, Cheng Z. Application of electron spin resonance (ESR) spectrometry in nutraceutical and food research. *Molecular nutrition & food research*. 2008;52(1):62-78. DOI: 10.1002/mnfr.200700395.
110. Zou Z, Deng Y, Hu J, et al. Recent trends in atomic fluorescence spectrometry towards miniaturized instrumentation-A review. *Analytica chimica acta*. 2018;1019:25-37. DOI: 10.1016/j.aca.2018.01.061.
111. Pagnotta S, Lezzerini M, Ripoll-Seguer L, et al. Micro-Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (Micro-LIBS) Study on Ancient Roman Mortars. *Applied spectroscopy*. 2017;71(4):721-727. DOI: 10.1177/0003702817695289.
112. Tian Y, Chen Q, Lin Y, et al. Quantitative determination of phosphorus in seafood using laser-induced breakdown spectroscopy combined with machine learning. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2021;175:106027. DOI: 10.1016/j.sab.2020.106027.
113. Casado-Gavaldà MP, Dixit Y, Geulen D, et al. Quantification of copper content with laser induced breakdown spectroscopy as a potential indicator of offal adulteration in beef. *Talanta*. 2017;169:123-129. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.03.071.
114. Bilge G, Velioglu HM, Sezer B, et al. Identification of meat species by using laser-induced breakdown spectroscopy. *Meat science*. 2016;119:118-122. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.04.035.

115. Veliloglu HM, Sezer B, Bilge G, et al. Identification of offal adulteration in beef by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Meat Science*. 2018;138:28-33. DOI: 10.1016/j.meatsci.2017.12.003.
116. Chen C, Zhang Q, Ma Q, et al. LightGBM-PPI: Predicting protein-protein interactions through LightGBM with multi-information fusion. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 2019;191:54-64. DOI: 10.1016/j.chemolab.2019.06.003.
117. Chu YW, Tang SS, Ma SX, et al. Accuracy and stability improvement for meat species identification using multiplicative scatter correction and laser-induced breakdown spectroscopy. *Optics Express*. 2018;26(8):10119-10127. DOI: 10.1364/OE.26.010119.
118. Mo K, Tang Y, Zhu Y, et al. Fresh Meat Classification Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Assisted by LightGBM and Optuna. *Foods*. 2024;13(13):2028. DOI: 10.3390/foods13132028.
119. Zhao X, Zhuang H, Yoon SC, et al. Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances. *Journal of Food Quality*. 2017;6370739. DOI: 10.1155/2017/6370739.
120. Damez JL, Clerjon S, Abouelkaram S, et al. Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing. *Journal of Food Engineering*. 2008;85(1):116-122. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.07.026.
121. Buwen L, Wei C, Li X, et al. Incorporating Bioimpedance Technique with Ensemble Learning Algorithm for Mutton Tenderness Detection. *Food and Bioprocess Technology*. 2023;16:2761-2771. DOI: 10.1007/s11947-023-03065-6.
122. De Jesús C, Hernández-Coronado G, Girón J, et al. Classification of unaltered and altered dry-cured ham by impedance spectroscopy: a preliminary study. *Meat science*. 2014;98(4):695-700. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.05.014.
123. Chen T, Zhu Y, Han M, et al. Classification of chicken muscle with different freeze-thaw cycles using impedance and physicochemical properties. *Journal of Food Engineering*. 2017;196:94-100. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2016.10.003.
124. Schmidt FC, Fuentes A, Masot R, et al. Assessing heat treatment of chicken breast cuts by impedance spectroscopy. *Food Science and Technology International*. 2017;23(2):110-118. DOI: 10.1177/1082013216659609.
125. Guermazi M, Kanoun O, Derbel N. Investigation of long time beef and veal meat behaviour by bio-impedance spectroscopy for meat monitoring. *IEEE Sensors Journal*. 2014;14(10):3624-3630. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2328858.
126. Guermazi M, Kallel AY, Kanoun O. Explainable Feature Engineering for Multi-Modal Tissue State Monitoring Based on Impedance Spectroscopy. *Sensors*. 2024;24(16):5209. DOI: 10.3390/s24165209.
127. Qiu J, Lin Y, Wu J, et al. Rapid beef quality detection using spectra pre-processing methods in electrical impedance spectroscopy and machine learning. *International Journal of Food Science and Technology*. 2024;59(3):1624-1634. DOI: 10.1111/ijfs.16915.
128. Decker C, Krapf R, Kuballa T. et al. Differentiation of meat species of raw and processed meat based on polar metabolites using ^1H NMR spectroscopy combined with multivariate data analysis. *Frontiers in Nutrition*. 2022;9:985797. DOI: 10.3389/fnut.2022.985797.
129. Jung Y, Lee J, Kwon J, et al. Discrimination of the geographical origin of beef by ^1H NMR-based metabolomics. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010;58(19):10458-10466. DOI: 10.1021/jf102194t.
130. JakesW, Gerdova A, Defomez M, et al. Authentication of beef versus horse meat using 60 MHz ^1H NMR spectroscopy. *Food chemistry*. 2015;175:1-9. DOI: 10.1016/j.foodchem.2014.11.110.
131. Decker C, Krapf R, Kuballa T, et al. Nontargeted Analysis of Lipid Extracts Using ^1H NMR Spectroscopy Combined with Multivariate Statistical Analysis to Discriminate between the Animal Species of Raw and Processed Meat. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2022;70(23):7230-7239. DOI: 10.1021/acs.jafc.2c01871.
132. Liu C, Pan D, Ye Y, et al. ^1H NMR and multivariate data analysis of the relationship between the age and quality of duck meat. *Food Chemistry*. 2013;141(2):1281-1286. DOI: 10.1016/j.foodchem.2013.03.102.

133. García-García AB, Herrera A, Fernández-Valle ME, et al. Evaluation of E-beam irradiation and storage time in pork exudates using NMR metabolomics. *Food research international*. 2019;120:553-559. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.11.005.
134. McCharthy WJ, Kemeny GJ, Burns DA, Ciurczak EW, editors. Fourier transform spectrophotometers in the near-infrared. In: *Handbook of Near-Infrared Analysis*. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group: Boca Raton, FL, USA; 2008. P. 79–91.
135. Schmutzler M, Beganovic A, Böhler G, et al. Methods for detection of pork adulteration in veal product based on FT-NIR spectroscopy for laboratory, industrial and on-site analysis. *Food Control*. 2015;57:258-267. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.04.019.
136. Kafle B, Böcker U, Wubshet S, et al. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy for Characterization of Liquid Protein Solutions: A Comparison of Two Sampling Techniques. *Vibrational Spectroscopy*. 2022;124:103490. DOI: 10.1016/j.vibspec.2022.103490.
137. Alamprese C, Amigo JM, Casiraghi E, et al. Identification and quantification of turkey meat adulteration in fresh, frozen-thawed and cooked minced beef by FT-NIR spectroscopy and chemometrics. *Meat Science*. 2016;121:175-181. DOI: 10.1016/j.meatsci.2016.06.018.
138. Argyri AA, Jarvis RM, Wedge D, et al. A comparison of Raman and FT-IR spectroscopy for the prediction of meat spoilage. *Food Control*. 2013;29(2):461-470. DOI: 10.1016/j.foodcont.2012.05.040.
139. Shi Y, Wang X, Borhan MS, et al. A review on meat quality evaluation methods based on non-destructive computer vision and artificial intelligence technologies. *Food Science of Animal Resources*. 2021;41(4):563-588. DOI: 10.5851/kosfa.2021.e25.
140. Santos CC, Zhao J, Dong X, et al. Predicting aged pork quality using a portable Raman device. *MeatScience*. 2018;145:79-85. DOI: 10.1016/j.meatsci.2018.05.021.

Статья принята к публикации 23.04.2025 / The article accepted for publication 23.04.2025.

Информация об авторах:

Виктория Александровна Пчелкина, ведущий научный сотрудник экспериментальной клиники-лаборатории биологически активных веществ животного происхождения, кандидат технических наук

Information about the authors:

Victoria Aleksandrovna Pchelkina, Leading Researcher at the Experimental Clinic-Laboratory of Biologically Active Substances of Animal Origin, Candidate of Technical Sciences

