

УДК 543.424.4

Спектроскопия отражения в исследовании мышечной ткани животного происхождения. Часть I

Л.В. Плотникова, д-р хим. наук А.П. Нечипоренко, С.М. Орехова,
д-р техн. наук М.В. Успенская, П.П. Плотников, д-р техн. наук А.Л. Ишевский

*Университет ИТМО
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
E-mail: allanech2512@yandex.ru*

Методами электронной спектроскопии диффузного отражения (ЭСДО) и инфракрасной спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (ИКС НПВО) впервые проведено сравнительное исследование мышечной ткани животного происхождения и влияния последовательных водной, солевой и щелочной экстракций на спектральные характеристики поверхности ее основных составляющих – мышечного волокна, стромы, контрактильных белков и белков стромы, а также дисперсности, низких отрицательных температур (-18°C) и микробиальных процессов. Новизну работы составляет использование различий в растворимости основных составляющих мышечной ткани, впервые примененных при исследовании биологического материала спектральными методами. Полученные данные позволили идентифицировать в инфракрасном спектре мышечной ткани полосы валентных колебаний карбонильных группировок белковых, липидных и мукополисахаридных структурных элементов и соотнести их с результатами, полученными методом ЭСДО, что и являлось целью данного эксперимента.

Ключевые слова: спектроскопия отражения; электронная и инфракрасная спектроскопия; мышечные ткани животного происхождения; биологические материалы.

DOI: 10.17586/2310-1164-2017-10-2-29-39

Reflection spectroscopy in the study of muscle tissue of animal origin. Part I

Lyudmila V. Plotnikova, D.Sc. Alla P. Nechiporenko, Svetlana M. Orehova,
D.Sc. Maya V. Uspenskaya, Petr P. Plotnikov, D.Sc. Aleksandr L. Ishevskiy

*ITMO University
9, Lomonosov str., St. Petersburg, 191002, Russia
E-mail: allanech2512@yandex.ru*

The article deals with the first comparative research concerning muscular tissue of animal origin and the impact of consecutive water, salt and alkali extractions on the spectral characteristics of the surface of its main components - the muscle fibers, the stroma, the contracting proteins, and proteins of the stroma by electron spectroscopy of diffuse reflection (ESDO) and infrared spectroscopy of frustrated total internal reflection (FTIR X). The impact dispersion, low negative temperatures (-18°C) and microbial processes were also analyzed. The novelty of this research is the use of differences in solubility of muscle tissue main components, used for the study of biological materials by spectral methods for the first time. The data obtained allowed to identify the bands of stretching vibrations for carbonyl groups of protein, lipid and the structural elements of mucopolysaccharides in the IR spectra of muscle tissue and compare them with the results obtained by the ESDO method that was the purpose of this experiment.

Keywords: reflection spectroscopy; electronic and infrared spectroscopy; the muscle tissue of animal origin; biological materials.

Введение

Методы спектроскопии отражения в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной (ИК) областях электромагнитного спектра – современные неразрушающие методы исследования свойств поверхности твердофазных и жидких систем разной природы [1, 2]. В течение последних 40–50 лет ИК спектроскопия является одним из ведущих аналитических методов в решении самых разнообразных прикладных и научных задач [3, 4]. Однако ее применение в пищевой промышленности весьма ограничено, поскольку, во-первых, все биологические материалы, к которым относится и мышечная ткань животного происхождения, представляют собой чрезвычайно сложные как по строению, так и химическому составу

(разнообразные белки, липиды, углеводы и их комплексы) объекты исследования [5]. Во-вторых, колебательная спектроскопия – это метод, исследующий функциональный состав материала, а одноименные функциональные группировки проявляются в одном и том же частотном интервале [6], независимо от того, к какому классу веществ относятся его компоненты. Это вносит определенные сложности при расшифровке спектров биологических тканей.

Как известно, возможности ЭСДО намного скромнее ИК спектроскопии, но в ряде случаев, относясь к категории методов тестирования компонентного состава органических материалов, он позволяет получать недоступную другим методам информацию [7, 8]. Аналитические особенности метода, при исследовании биологических систем, определяют преимущественно карбонильные группы (C=O). Они же обеспечивают методу ЭСДО и разрешающую способность, благодаря энергетической дискретности и индивидуальности неподеленных пар электронов их кислорода, принадлежащих разным, но практически всем классам веществ всех составных частей биологических тканей [9, 10]. В данном случае вода, максимум поглощения которой находится в области вакуумного ультрафиолета (<200 нм), практически не мешает проведению анализа. Именно карбонилы, являющиеся в обоих случаях высоко характеристическими функциональными группировками с особым статусом, могут служить связующим звеном между этими двумя спектральными методами.

Ранее [11–13] нами показана возможность использования метода электронной спектроскопии диффузного отражения в исследовании оптических свойств поверхности мышечного волокна, измельченной и цельномышечной ткани животного происхождения при электронно-лучевой и водно-спиртовой обработках.

Целью данной работы явилось сравнительное исследование влияния различного вида обработок на инфракрасный и электронный спектры отражения поверхности измельченной мышечной ткани животного происхождения и ее основных составляющих. Это позволяет расширить практические возможности обоих методов при исследовании и экспресс-контроле биологических материалов, поскольку оба метода просты и не требуют специальной пробоподготовки для проведения анализа.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования в данной работе являлась измельченная ($d = 2,5$ мм) свежееохлажденная мышечная ткань говядины, свинины и баранины, а также ее основные составляющие – мышечное волокно, строма и белки стромы, полученные путем последовательной водной, солевой (раствор Вебера) и щелочной (0,6 М раствор NaOH) экстракции, соответственно: саркоплазмы (водорастворимой части мышечной ткани, содержащей вещества всех классов), актомиозинового комплекса (контрактильных белков – актина, миозина, тропомиозина) и мукополисахаридов (углеводного структурного элемента соединительной ткани) [5, 14]. В качестве вспомогательных объектов исследования использованы биологические компоненты разных классов – кристаллический яичный альбумин и глюкоза, гиалуроновая кислота, составляющая основу мукополисахаридов, и топленые животные жиры (свиной и бараний).

Электронные спектры диффузного отражения снимали на спектрофотометре Specord M-200 (AIZ Engineering GmbH, Germany) относительно эталона Spectrolon в диапазоне длин волн 200–700 нм с компьютерной обработкой данных в координатах $A = f(\lambda)$, где A – поглощение, а λ – длина волны в нанометрах (нм).

ИК спектры НПВО получали на ИК Фурье спектрометре Tensor 37 фирмы Bruker, управляемом программным пакетом OPUS™ со стандартными градуировочными возможностями, в диапазоне частот 4000–600 см⁻¹ в формате поглощения.

Результаты и их обсуждение

Метод ИКС НПВО. При подготовке образцов к исследованию была использована способность составных частей мышечной ткани растворяться в «иерархической» последовательности [5, 14]. На рисунке 1 приведены ИК спектры, отражающие изменение оптических характеристик поверхности измельченных образцов мышечной ткани говядины и свинины в результате последовательных водно-солевой и щелочной обработок. Согласно литературным данным [6], обе интенсивные высокочастотные полосы в спектрах исходной (интактной) мышечной ткани (рисунок 1, кривые 1) с максимумами при

3350 см⁻¹ могут быть сформированы валентными колебаниями NH_n- и OH-группировок всех нерастворимых и водорастворимых компонентов саркоплазмы, мышечного волокна, стромы, белков стромы, а также гидроксильных групп связанных молекул воды. На спаде их правых ветвей в области 3050–2850 см⁻¹, также от всех компонентов составных частей мышечной ткани, будут присутствовать полосы, обусловленные валентными колебаниями CH_n-группировок. Деформационные колебания OH-групп воды во всех спектрах проявляются в виде полосы средней интенсивности при 1637 см⁻¹. На спаде обеих ее ветвей слабо проявляют себя полосы карбоксильных –COOH (1743 см⁻¹) и карбоксилатных –COO– (1553 см⁻¹) карбонилы. В диапазоне <1500 см⁻¹ регистрируются деформационные колебания CH_n-, NH_n-, OH-групп и валентные колебания связей C–O; C–C; C–N и др.

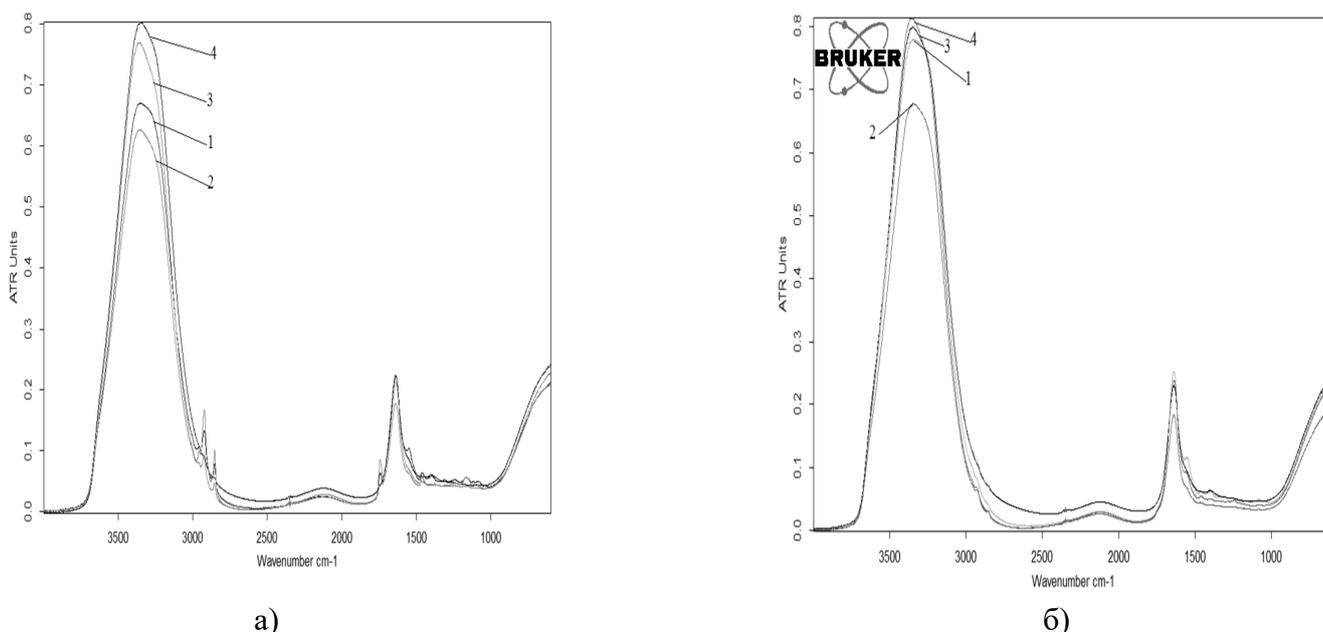


Рисунок 1 – ИК спектры измельченной мышечной ткани (1) свинины (а) и говядины (б).
Основные составляющие: 2 – мышечное волокно; 3 – строма; 4 – белки стромы

В обоих случаях экстракция водорастворимых компонентов саркоплазмы (рисунок 1, кривые 2) приводит к снижению интенсивности полос валентных и деформационных колебаний связанных OH-групп молекул воды. Солевая экстракция белкового актомиозинового комплекса (кривая 3) и щелочная – мукополисахаридной (кривая 4) составляющей стромы, напротив, вызывают увеличение интенсивности полос 3350 см⁻¹ и небольшой их высокочастотный сдвиг, связанный, по-видимому, с повышением влагоабсорбционной способности коллагена стромы.

О характере изменения интенсивности полос поглощения карбонильных и CH-группировок в спектрах мышечной ткани говядины и свинины в результате последовательных экстракций позволяют судить их увеличенные фрагменты, приведенные на рисунке 2. В спектрах обоих образцов исходной (кривая 1) мышечной ткани достаточно выражены слабые полосы карбоксилатных карбонилы – 1553 см⁻¹. После удаления водорастворимых веществ саркоплазмы (кривые 2) их интенсивность резко падает. Однако в спектре мышечного волокна свинины полоса карбоксильных карбонилы (1743 см⁻¹) при этом несколько увеличивается. В спектре мышечного волокна говядины она по-прежнему отсутствует. Удаление солевой обработкой белков актомиозинового комплекса (кривые 3) приводит к более заметному увеличению интенсивности полосы 1553 см⁻¹ в спектре стромы говядины и снижению полосы 1731 см⁻¹ в спектре свинины.

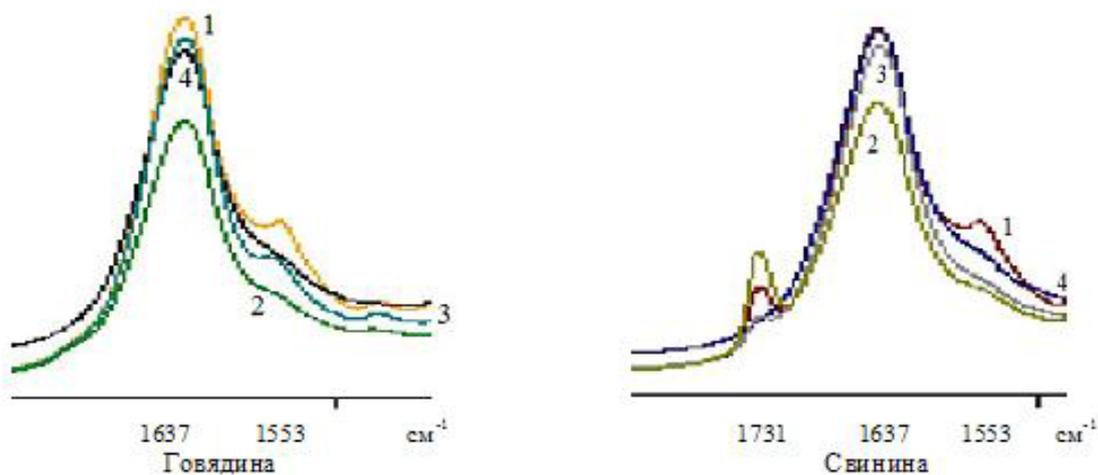


Рисунок 2 – Фрагменты ИК спектров, приведенных на рисунке 1: исходная мышечная ткань – 1; обработка: 2 – водная, 3 – солевая, 4 – щелочная

После извлечения из структуры стромы липидных и углеводных (мукополисахариды) компонентов щелочным раствором (кривые 4) должны проявляться функционалы белков стромы (преимущественно коллагена и эластина). Однако удаление полисахаридного каркаса, способствующее высвобождению белков, приводит к еще большей абсорбции молекул воды коллагеном, маскирующей функциональные группировки ее протеиновой составляющей.

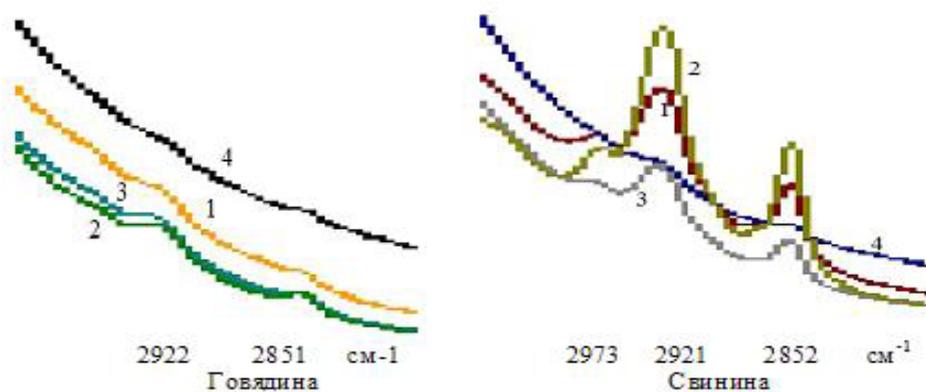


Рисунок 3 – Фрагменты ИК спектров, приведенных на рисунке 1: исходная мышечная ткань – 1; обработка: 2 – водная, 3 – солевая, 4 – щелочная

В результате ИК спектр белков стромы – биологических полимеров так же, как и спектры набухших гидрогелей полимеров на основе акриловой кислоты, практически представляет собой спектр дистиллированной воды с максимумами 3339 и 1637 cm^{-1} [15]. Аналогичным образом в процессе последовательных обработок мышечной ткани свинины изменяется интенсивность полос поглощения, за появление которых ответственны CH_n -группы (рисунок 3). В спектрах всех основных составляющих мышечной ткани говядины они остались практически не проявленными.

Выделение липидов в виде топленого свиного жира (рисунок 4), в котором нет воды и амидов свидетельствует об отсутствии в его спектре высокочастотной полосы ($>3050 \text{ cm}^{-1}$), полосы деформационных колебаний OH -групп связанной воды (1637 cm^{-1}) и наличии очень интенсивных узких полос (2921 и 2852 cm^{-1}), поглощающих CH -группировки жирных кислот, являющихся строительными блоками триглицеридов жиров и масел. Эти же полосы, но малой интенсивности, присутствуют в спектре мышечной ткани свинины. Узкая интенсивная полоса 1743 cm^{-1} в спектре жира принадлежит карбонильным группировкам жирных кислот. В состав данной полосы, слабо выраженной в спектре мышечной ткани свинины, могут входить карбоксильные карбонилы строительных блоков липидов, протеинов, некоторых углеводов.

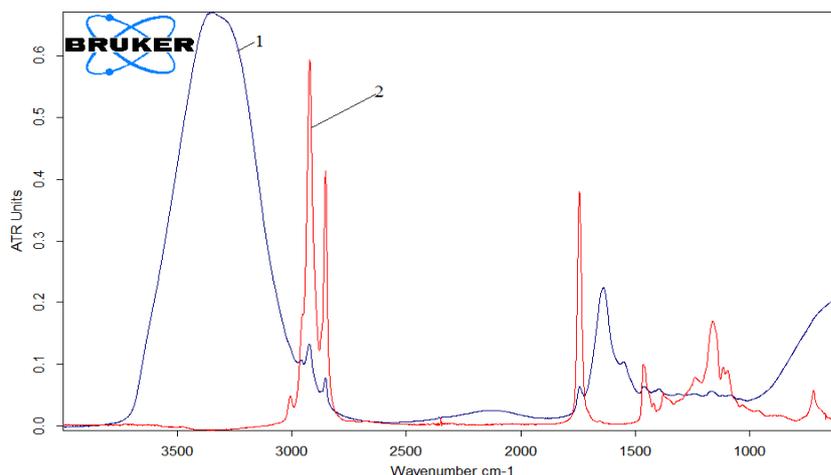


Рисунок 4 – ИК спектры измельченной мышечной ткани свинины (1) и топленого свиного жира (2)

Кроме того, в спектре жира отмечается полоса 3008 см^{-1} , характерная для валентных колебаний СН-групп при двойной связи ($\text{V}=\text{CH}$) и очень слабая полоса 1654 см^{-1} валентных колебаний $\text{C}=\text{C}$ -связи. Полосы 1465 ; 1377 и 1237 см^{-1} , присутствующие в спектрах обоих образцов, принадлежат разным типам деформационных колебаний CH_3 -; CH_2 -; NH_n -групп. Следует отметить, что полоса 721 см^{-1} (деформационные маятниковые колебания группы CH_2) наблюдается в спектре жира, но не проявлена в спектре мышечной ткани.

На рисунке 5 приведены спектры некоторых классов веществ, являющихся компонентами составных частей биологических тканей (белковых – яичный альбумин, липидных – топленый бараний жир, моносахаридов – глюкоза, полисахаридов – гиалуроновая кислота). В области ($3040\text{--}2853\text{ см}^{-1}$) в спектрах всех рассматриваемых компонентов наблюдается серия полос CH_n -группировок, присутствующих в структуре их молекул. В более высокочастотной области, где возможно появление амидов и ОН-групп различного типа, только в спектре жира отсутствует широкая полоса в интервале примерно $3550\text{--}3050\text{ см}^{-1}$.

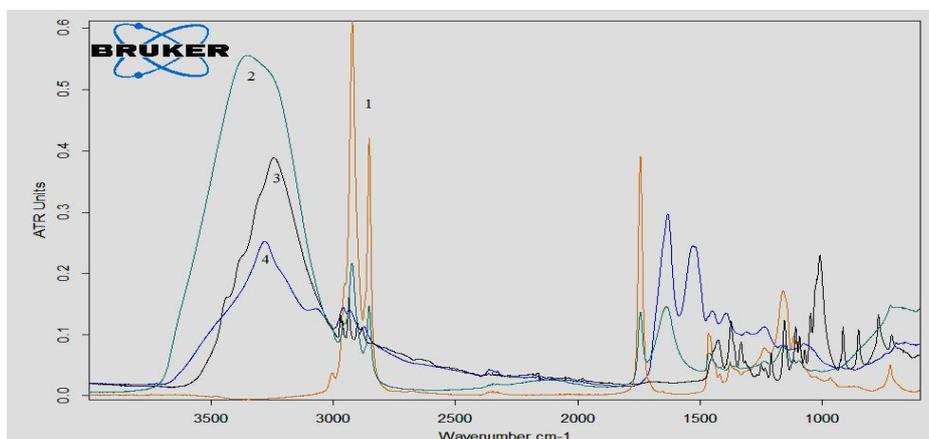


Рисунок 5 – ИК спектры некоторых классов биологических веществ:
1 – бараний жир; 2 – гиалуроновая кислота; 3 – глюкоза; 4 – яичный альбумин

Более наглядную информацию позволяет получить выделенный фрагмент спектров всех рассматриваемых компонентов, представленный на рисунке 6. Очень интенсивная узкая полоса карбоксильных карбонил (1743 см^{-1}) присутствует только в спектрах бараньего топленого жира (а также в спектрах всех животных жиров – свиного, куриного, суркового, рыбьего и растительных масел – оливкового, миндального, льняного, хлопкового, подсолнечного и др.), представленного триглицеридами жирных, преимущественно ненасыщенных, кислот [16].

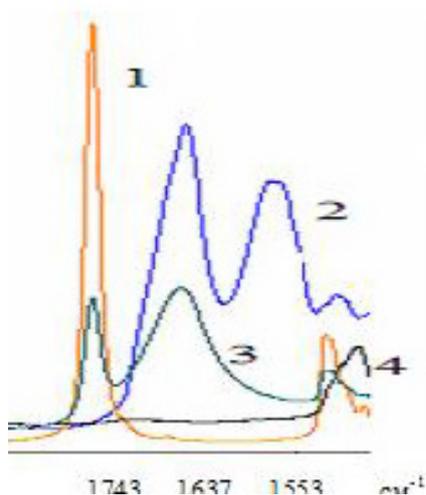
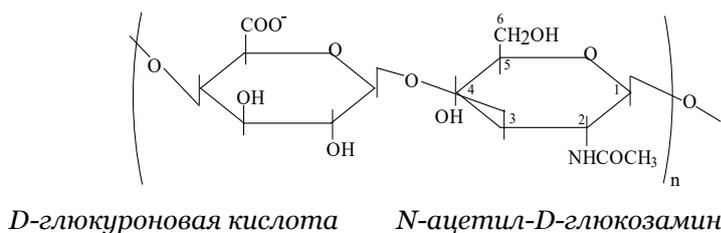


Рисунок 6 – Фрагмент ИК спектров, приведенных на рисунке 5:
1 – бараний жир, 2 – гиалуроновая кислота, 3 – глюкоза, 4 – яичный альбумин

Эта же полоса присутствует в спектре гиалуроновой кислоты (рисунок 6, кривая 2), которая формируется из n мономерных единиц (где $n \leq 25000$), состоящих из дисахаридов и имеющих в структуре мономера группу $-\text{COOH}$:



Полоса карбоксилат-карбонила (1553 см^{-1}) отмечена только в спектре яичного альбумина (рисунок 6, кривая 4), что позволяет отнести ее к проявлению $\text{C}=\text{O}$ групп полипептидной связи ($1600\text{--}1550 \text{ см}^{-1}$ [6]). Обе полосы карбониллов отсутствуют в спектре глюкозы (фруктозы, сахарозы, целлюлозы, крахмала).

Использование различия и «иерархической» последовательности в растворимости основных составляющих мышечной ткани – комплекса приемов, давно и широко применяемых при химических методах анализа в лабораториях пищевой промышленности [14, 17], а также вспомогательных биологических материалов, позволило идентифицировать положение полос ряда компонентов в ИК спектрах биологических тканей.

Метод ЭСДО – один из эффективных методов контроля цветности, жирности, качества сырьевых материалов пищевой промышленности и продуктов их переработки [8, 14]. Его рабочий диапазон составляет $200\text{--}750 \text{ нм}$. Длины волн менее 190 нм малопригодны, поскольку поглощают компоненты воздуха – кислород и азот [7]. Отсутствие помех со стороны воды, поглощающей в диапазоне вакуумного ультрафиолета ($< 200 \text{ нм}$) – привлекательная особенность метода при исследовании биологических тканей, как правило, содержащих много воды.

Средний и ближний ультрафиолет ($200\text{--}400 \text{ нм}$) – это области электромагнитного спектра, где содержится вся желаемая информация по идентификации строительных блоков основных биомолекул (белков, липидов, углеводов). УФ спектр органического вещества характеричен, так как появление полосы обязано хромофору – структурной группе в его составе, которая обуславливает избирательное поглощение света и ее ближайшему окружению. Обычно это группы, содержащие кратные связи $\text{C}=\text{O}$; $\text{C}=\text{C}$; $\text{C}\equiv\text{C}$; $\text{N}=\text{N}$; $\text{N}=\text{O}$; системы $\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{O}$; ароматическое ядро.

В общем виде электронный спектр поверхности мышечной ткани животного происхождения может быть описан четырьмя достаточно дифференцированными областями [9] и рассмотрен на примере кривых светопоглощения поверхности мышечной ткани свинины, приведенных на рисунке 7. В видимом диапазоне регистрируется дублет пигментного глобулярного белка – миоглобина ($540/580 \text{ нм}$),

обеспечивающего мясу окраску, и полоса его окисленной формы – метмиоглобина (635 нм). Мукополисахариды дают интенсивный максимум при 400–425 нм. Серией полос средней интенсивности в области ближнего ультрафиолета (320–380 нм) проявляются строительные блоки липидных компонентов – ненасыщенные жирные кислоты: олеиновая, линолевая, линоленовая и арахидоновая.

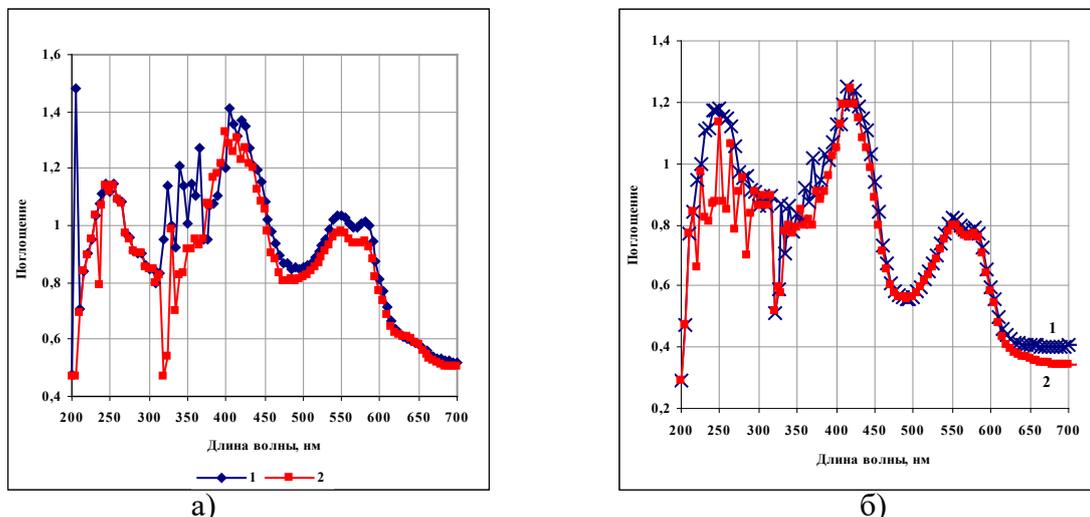


Рисунок 7 – а) Электронные спектры поверхности поперечных срезов длиннейшей мышцы спины двух молодых животных; б) влияние водной обработки цельномышечной ткани свинины на электронный спектр поверхности измельченных образцов: 1 – интактная; 2 – 10 минут выдержки в водной среде

В средней части УФ области (240–300 нм, [18]) поглощают хромофоры четырех аминокислотных остатков (тирозина, триптофана, фенилаланина, гистидина), дисульфидные связи – 230/235 нм, а также моносахариды, олигосахариды и их разнообразные гибриды (260–315 нм) [19]. Пептидная связь дает полосу при 220–225 нм. Однако, несмотря на многообразие, строительные блоки веществ, принадлежащих к одному классу, независимо от характера составных частей мышечной ткани, поглощают в определенном достаточно узком диапазоне длин волн.

Рисунок 7 иллюстрирует ЭСДО спектры, типичные для образцов мышечной ткани животного происхождения хорошего качества. Прежде всего, их отличает наличие сглаженной структурированной полосы поглощения «колоколообразного» контура в области 200–315 нм, где поглощают хромофоры компонентов белково-углеводного комплекса, и хорошо выраженный дублет пигментного белка. По всем органолептическим показателям представленные образцы мышечной ткани не отличались. Спектральные характеристики (рисунок 9а) их поверхности подтвердили результаты сенсорного анализа, отмечая при этом некоторую разницу в области поглощения липидов и мукополисахаридов – в образце (1) больше липидов и соединительная ткань на его поверхности в большей степени подверглась деструкции. Присутствие небольшой полосы метмиоглобина в спектрах обоих образцов указывает на некоторую окисленность пигментного белка.

Общее снижение всего спектра, его фрагмента или отдельной полосы, дифференциация полос – это признаки, указывающие на удаление соответствующих веществ или их разрушение под воздействием тех или иных внешних или внутренних факторов. Иллюстрацией могут служить данные, приведенные на рисунке 7б.

Обработка мышечной ткани водой, соевым и щелочным растворами позволяет увидеть изменения в оптических характеристиках поверхности при последовательном извлечении компонентов ее составных частей (рисунок 8). Экстракция саркоплазмы приводит к вымыванию водорастворимых веществ всех классов, что выражается в снижении кривой светопоглощения мышечного волокна (2). Следует отметить резкое понижение полосы поглощения мукополисахаридов (420 нм) и структуризацию УФ полосы в диапазоне 225–310 нм, говорящую о разрушении химических связей белково-углеводных компонентов.

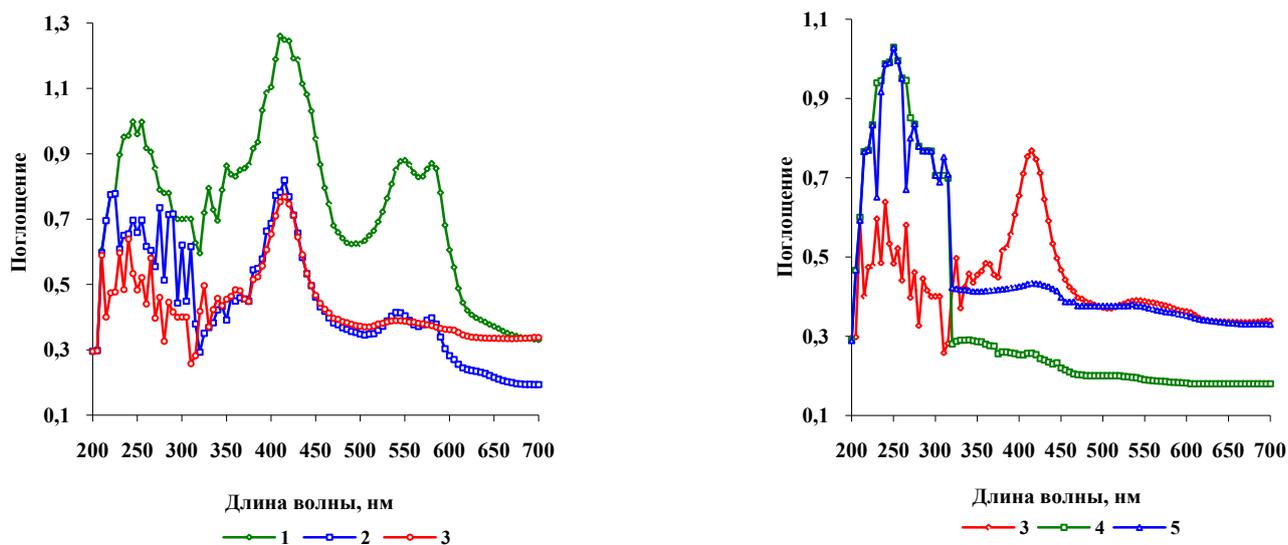


Рисунок 8 – Электронные спектры поверхности основных составляющих измельченной мышечной ткани свинины: 1 – исходная мышечная ткань; 2 – мышечное волокно; 3 – строма; 4 – актомиозин; 5 – белки стромы

Однако наличие узкой полосы при 220–225 нм свидетельствует о сохранении пептидных связей в структуре мышечного волокна. Она исчезает после солевой обработки (кривая 3) с удалением актомиозиона. При этом полностью уходит дублет миоглобина, связанного с его фибриллами, но сохраняются полосы липидных компонентов (320–380 нм) и мукополисахаридов (415–420 нм). В результате кривая (3) представляет оптический спектр поверхности стромы, в котором следует отметить узкий отрицательный экстремум при 230–235 нм, указывающий на деструкцию дисульфидных S–S-мостиков.

Удаление из спектра полос мукополисахаридов и липидов происходит после щелочной обработки стромы на холоде. Таким образом, кривая (5) – это спектральный образ белков стромы в ультрафиолетовом диапазоне. По оптическим характеристикам они близки к белкам актомиозинового комплекса (комплекса контрактильных белков – кривая 4), полученного по методике [14]. Увеличение интенсивности и восстановление контура УФ полосы также обязано удалению мукополисахаридов, которые маскируют белковые компоненты.

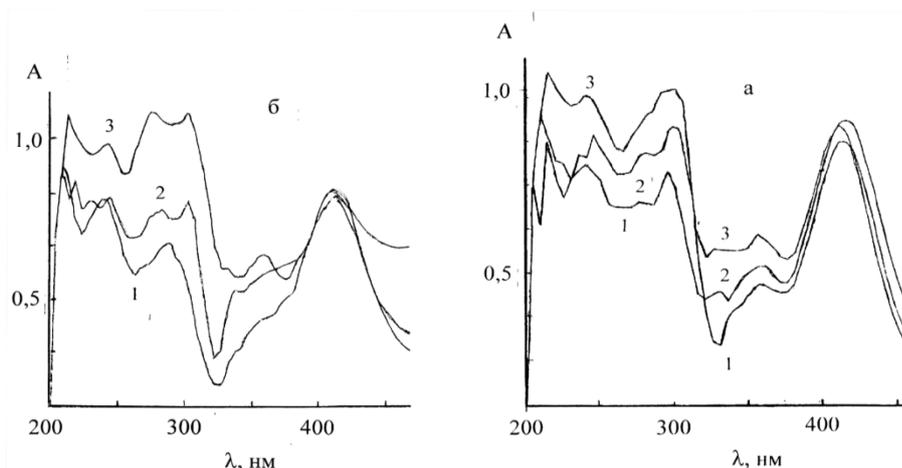


Рисунок 9 – Электронные спектры поверхности образцов мышечного волокна и стромы мышечной ткани говядины разной дисперсности. Обработка: а) водой, б) 10% раствором NaCl; размер частиц: 1 – 5,0; 2 – 4,0; 3 – 2,5 мм

В работе [10] показано, что различного рода обработки мышечной ткани лучше всего проявляются в изменении оптических характеристик мышечного волокна и стромы. Рисунок 9 иллюстрирует влияние механического измельчения мышечной ткани говядины на электронные спектры поверхности ее составляющих. В последовательности расположения приведенных ЭСДО спектров отчетливо

прослеживается логическая зависимость спектральных характеристик мышечного волокна и стромы от дисперсности образцов мышечной ткани для областей проявления липидов (320–370 нм) и белково-углеводного комплекса (220–300 нм). Существенно меньше степень измельчения отражается на поглощении мукополисахаридов (400–425 нм).

Холодильная обработка мясного сырья является наиболее простым и распространенным способом его консервирования, обеспечивающим высокую степень сохранности биологической ценности и технологических свойств мяса и мясопродуктов. Практический интерес всегда представляет влияние замораживания на характер и глубину протекающих при этом автолитических, окислительных и микробиальных процессов. На примере образца измельченной мышечной ткани баранины (рисунок 10) показано влияние микробиологических процессов и низких температур на характер оптического спектра исходного образца.

В последовательности расположения приведенных ЭСДО спектров отчетливо прослеживается логическая зависимость спектральных характеристик мышечного волокна и стромы от дисперсности образцов мышечной ткани для областей проявления липидов (320–370 нм) и белково-углеводного комплекса (220–300 нм). Существенно меньше степень измельчения отражается на поглощении мукополисахаридов (400–425 нм).

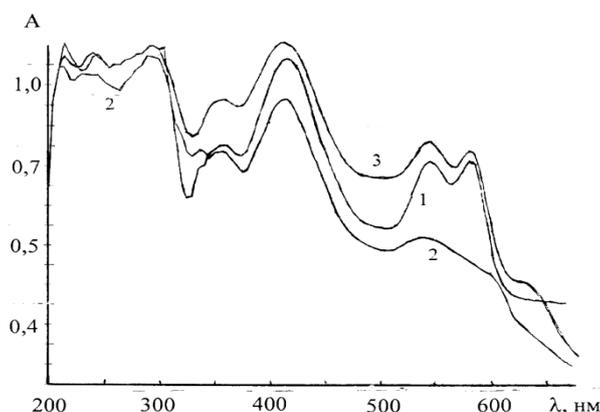


Рисунок 10 – Электронные спектры поглощения поверхности реструктурированной мышечной ткани баранины: 1 – исходная охлажденная; 2 – образец 1 через неделю хранения при $4\pm 1^\circ\text{C}$; 3 – замороженная при 18°C в течение 30 суток

Спектр размороженной мышечной ткани (кривая 3) расположен выше спектра исходной (кривая 1) при длинах волн выше 300 нм и практически совпадает в области 200–300 нм при сохранении цветности (540/580 нм). Наиболее заметные изменения в области поглощения липидных и полисахаридных составляющих объясняются увеличением числа химических связей, механически разрушенных кристалликами льда при замораживании образца, и выходом на поверхность новых функциональных группировок. Однако появление полосы метмиоглобина (635 нм) на кривой (3) говорит о том, что окислительные процессы при низких температурах не приостанавливаются, хотя и замедляются. В результате аэробного хранения в течение недели (кривая 2) при низких положительных температурах мышечная ткань подверглась окислительным процессам, воздействию собственных тканевых ферментов и микроорганизмов, что привело к появлению коричневатого оттенка (исчез дублет миоглобина) и общему снижению спектральной кривой. Это свидетельствует о глубоких деструктивных процессах на уровне всех компонентов биологического материала.

Представленные данные показывают широкие возможности электронной спектроскопии отражения при исследовании биологических тканей животного происхождения в результате различного вида обработок, давно и широко используемых при химических методах анализа в лабораториях различных отраслей пищевой промышленности, дисперсности и микробиологических процессов.

Выводы

Сравнительное исследование мышечной ткани говядины, баранины, свинины и ее основных составляющих (мышечного волокна, стромы и белков стромы), впервые проведенное методами ИКС НПВО и ЭСДО, позволило отметить, что в обоих случаях логическая закономерность в изменении

структурно-химического состояния биологического материала в результате различного вида обработок наиболее наглядно проявляется через изменение спектральных характеристик карбоксильных и карбоксилатных карбонильных группировок, отражая согласованность данных, полученными двумя методами.

Показаны расширенные, в том числе и потенциальные, возможности метода ЭСДО при исследовании изменений компонентного состава мышечной ткани животного происхождения и ее основных составляющих, как отклик на воздействие разнообразных внешних факторов, что составляет новизну полученных данных. Высокое разрешение, чувствительность и информативность метода предопределяются дискретностью энергий возбуждения электронов неподделенных пар кислорода карбонильных групп, принадлежащих веществам разных классов. Простота метода, не требующего специальной пробоподготовки, обеспечивает ему эффективность исследований и экспресс-контроля в научных и промышленных лабораториях.

Литература

1. Бёккер Ю. Спектроскопия. М.: Мир, 2009. 528 с.
2. Stuart B. H. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. N.-Y.: Wiley, 2004. 242 p.
3. Тарасевич Б.Н. Основы ИК спектроскопии с преобразованием Фурье. Подготовка проб в ИК спектроскопии. М.: Изд-во Московского гос. ун-та, 2012. 22 с.
4. Гордецов А.С. Инфракрасная спектроскопия биологических жидкостей и тканей // Современные технологии в медицине. 2010. № 1. С. 84–97.
5. Соколов А.А. Физико-химические и биохимические основы технологии мясопродуктов. М.: Пищевая промышленность, 1965. 489 с.
6. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. М.: МГУ, 2012. 55 с.
7. Вязьмин С.Ю., Рябухин Д.С., Васильев А.В. Электронная спектроскопия органических соединений. СПб.: СПбГЛТА, 2011. 43 с.
8. Кириллов В.В., Нечипоренко А.П. Современные спектральные методы анализа, используемые в пищевой промышленности. СПб.: СПбГУНИПТ. 2006. 99 с.
9. Нечипоренко А.П., Орехова С.М., Плотникова Л.В., Глазачева Е.Н., Волкова К.В., Успенская М.В. Специализированный практикум по физико-химическим методам анализа: электронная и ИК спектроскопия отражения, люминесцентная и рентгенофлуоресцентная спектроскопия, рефрактометрия, термометрия, кинетическая рН-метрия, индикаторный метод – РЦА. Теория и практика. Часть II. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 178 с.
10. Орехова С.М. Радиационно-химическое консервирование мышечной ткани свинины: дис. ... канд. техн. наук СПб., 2014. 175 с.
11. Базарнова Ю.Г., Бутова Т.Е., Марченко В.И., Смелик В.А., Третьяков Н.А. Биохимические основы переработки и хранения сырья животного происхождения. СПб.: Проспект науки, 2011. 192 с.
12. Нечипоренко А.П., Успенская М.В., Кондратьева Н.Е., Бикбулатова А.Р., Гредюхина И.В. Оптические и кислотные свойства гелеобразующих пищевых добавок на основе акрилатов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2016. № 1. С. 24–36.
13. Кнерельман Е.И., Яруллин Р.С., Давыдова Г.И., Старцева Г.П., Чуркина В.Я., Матковский П.Е., Алдошин С.М. Сравнительные особенности инфракрасных спектров C₁₈-карбоновых кислот, их метиловых эфиров (биодизеля) и триглицеридов (растительных масел) // Вестник Казанского технологического университета. 2008. № 6. С. 68–78.
14. Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. М.: Колос, 2001. 376 с.
15. Демченко А.П. Ультрафиолетовая спектрофотометрия и структура белков. Киев: Наукова думка, 1981. 208 с.
16. Элиас П.С., Кохен А.Д. Радиационная химия основных компонентов пищевых продуктов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 221 с.

References

1. Bekker Yu. *Spektroskopiya* [Spektroskopie]. Moscow, Mir Publ., 2009. 528 p.
2. Stuart B.H. *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*. N.-Y.; Wiley, 2004. 242 p.
3. Tarasevich B. N. *Osnovy IK spektroskopii s preobrazovaniem Fur'e. Podgotovka prob v IK spektroskopii* [Basics of IR spectroscopy with Fourier transformation. Sample preparation in IR spectroscopy]. Moscow, Moscow State University Publ., 2012. 22 p.
4. Gordetsov A.S. *Infrakrasnaya spektroskopiya biologicheskikh zhidkoste i tkanei* [Infrared spectroscopy of biological fluids and tissues]. *Modern technology in medicine*. 2010, no. 1, pp. 84–97.

5. Sokolov A.A. *Fiziko-khimicheskie i biokhimicheskie osnovy tekhnologii myasoproduktov* [Physico-chemical and biochemical bases of technology of meat products]. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1965. 489 p.
6. Tarasevich B.N. *IK spektry osnovnykh klassov organicheskikh soedinenii* [The IR spectra of the main classes of organic compounds]. Moscow, Moscow State University Publ., 2012. 55 p.
7. Vyaz'min S.Yu., Ryabukhin D.S., Vasil'ev A.V. *Elektronnaya spektroskopiya organicheskikh soedinenii* [Electronic spectroscopy of organic compounds]. St. Petersburg, SPbLTA Publ., 2011. 43 p.
8. Kirillov V.V., Nechiporenko A.P. *Sovremennye spektral'nye metody analiza, ispol'zuemye v pishchevoi promyshlennosti* [Modern spectral analysis techniques used in the food industry]. St. Petersburg, SPbGUNIPT Publ. 2006. 99 p.
9. Nechiporenko A.P., Orekhova S.M., Plotnikova L.V., Glazacheva E.N., Volkova K.V., Uspenskaya M.V. *Spetsializirovannyi praktikum po fiziko-khimicheskim metodam analiza: elektronnaya i IK-spektroskopiya otrazheniya, lyuminescentnaya i rentgenofluorescentnaya spektroskopiya, refraktometriya, termometriya, kineticheskaya rN-metriya, indikatornyi metod – RTsA. Teoriya i praktika* [A specialized workshop for physical-chemical analysis methods: electronic and infrared spectroscopy of the reflection, fluorescent and x-ray fluorescence spectroscopy, refractometry, thermometry, kinetic pH-metry, indicator method - DAC. Theory and practice. Educational-methodical manual]. Part 2. St. Petersburg, University ITMO Publ., 2016. 178 p.
10. Orekhova S.M. *Radiatsionno-khimicheskoe konservirovanie myshechnoi tkani svininy* [Radiation-chemical preserving muscle tissue of pork]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg, University ITMO Publ. 2014. 175 p.
11. Bazarnova Yu.G., Burova T.E., Marchenko V.I., Smelik V.A., Tret'yakov N.A. *Biokhimicheskie osnovy pererabotki i khraneniya syr'ya zhivotnogo proiskhozhdeniya* [Biochemical bases of the processing and storage of raw materials of animal origin]. St. Petersburg, Prospekt nauki Publ., 2011. 192 p.
12. Nechiporenko A.P., Uspenskaya M.V., Kondrat'eva N.E., Bikbulatova A.R., Gredukhina I.V. *Opticheskie i kislotnye svoystva geleobrazuyushchikh pishchevykh dobavok na osnove akrilatov* [Optical properties of gel-forming food additives on the basis of acrylates]. *Scientific journal NIU ITMO. Series: Processes and Food Production Equipment*, 2016. no. 1. pp. 24–36.
13. Knerel'man E.I., Yarullin R.S., Davydova G.I., Startseva G.P., Churkina V.Ya., Matkovskii P.E., Aldoshin S.M. *Sravnitel'nye osobennosti infrakrasnykh spektrov S18-karbonovykh kislot, ikh metilovykh efirov (biodizelya) i triglitseridov (rastitel'nykh masel)* [Comparative features of infrared spectroscopy of C18 - carboxylic acids, their methyl esters (biodiesel) and triglycerides (vegetable oils)]. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*. 2008, no. 6, pp. 68–78.
14. Antipova L.V., Glotova I.A., Rogov I.A. *Metody issledovaniya myasa i myasnykh produktov* [Research methods of meat and meat products]. Moscow, Kolos Publ., 2001. 376 p.
15. Demchenko A.P. *Ul'trafioletovaya spektrofotometriya i struktura belkov* [Ultraviolet spectrophotometry and protein structure]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 208 p.
16. Elias P.S., Kokhen A.D. *Radiatsionnaya khimiya osnovnykh komponentov pishchevykh produktov* [Radiation chemistry of major food components]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1983. 221 p.

Статья поступила в редакцию 18.01.2017