DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

Перспективы применения спектроскопии в судебно-медицинской практике: научный обзор

К.Б. Агнокова[1], А.З. Шихабидов[2], К.Д. Шкода[1], Ф.А. Кадырова[2], М.А. Мугадова[2], Д.Р. Багирова[2], М.Ш. Темирова[2], З.А. Абуева[2], И.А. Ибрагимова[3], А.Г. Гамзатова[3], М.А. Махмудова[2], Д.С. Панченко[2], М.Р. Туразова[3]

[1] Кубанский государственный медицинский университет, Краснодар, Россия;
[2] Астраханский государственный медицинский университет, Астрахань, Россия;
[3] Чеченский государственный университет имени А.А. Кадырова, Грозный, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье обсуждаются перспективы использования спектроскопии в судебно-медицинской практике. Спектроскопия служит важным аналитическим инструментом для исследования вещественных доказательств биологического происхождения. Основное внимание уделено двум основным методам: инфракрасной Фурье-спектроскопии и рамановской спектроскопии. Инфракрасная Фурье-спектроскопия характеризуется воздействием инфракрасного излучения на образец с последующим анализом спектра поглощения или прохождения света. Этот метод позволяет определять молекулярный состав и химические связи в исследуемом материале. Рамановская спектроскопия, напротив, использует лазерное рассеяние света для анализа молекулярной структуры и химического состава образцов. Оба метода обладают высокой точностью, скоростью и возможностью проведения неразрушающего анализа, что делает их незаменимыми в судебной медицине. Примеры успешного применения спектроскопии в судебной практике включают идентификацию различных биологических жидкостей, таких как кровь, сперма и слюна. Так, инфракрасная Фурье-спектроскопия позволяет различать типы крови, включая периферическую и менструальную, а также определять наличие и концентрацию определённых молекул. В свою очередь, рамановскую спектроскопию успешно применяют для идентификации крови взрослого человека и новорождённого. Важное место занимает интеграция спектроскопических методов с хемометрическими подходами и алгоритмами машинного обучения. Это позволяет обрабатывать большие объёмы спектральных данных, улучшать точность анализа и идентифицировать исследуемые образцы. Такие подходы обеспечивают более точное и надёжное установление причин смерти и идентификацию вещественных доказательств.

Таким образом, современные спектроскопические методы предлагают быстрые, точные и надёжные инструменты для судебно-медицинской экспертизы. Они способствуют развитию междисциплинарного сотрудничества и внедрению новейших технологий в практику, что ведёт к повышению качества судебно-медицинских экспертиз и разрешению сложных практических задач.

Ключевые слова: спектроскопия; судебная медицина; Фурье-спектроскопия; рамановская спектроскопия; вещественные доказательства; анализ; причина смерти; обзор.

Как цитировать:
Агнокова К.Б., Шихабидов А.З., Шкода К.Д., Кадырова Ф.А., Мугадова М.А., Багирова Д.Р., Темирова М.Ш., Абуева З.А., Ибрагимова И.А., Гамзатова А.Г., Махмудова М.А., Панченко Д.С., Туразова М.Р. Перспективы применения спектроскопии в судебно-медицинской практике: научный обзор // Судебная медицина. 2025. Т. 11, № 1. С. 49–62. DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

Рукопись получена: 27.11.2024 **Рукопись одобрена:** 07.02.2025 **Опубликована online:** 14.03.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

Prospects of spectroscopy in forensic practice: a review

Kamilla B. Agnokova[1], Agakerim Z. Shikhabov[2], Kseniya D. Shkoda[1], Fatima A. Kadyrova[2], Minazhat A. Mugadova[2], Dzhamilya R. Bagirova[2], Makhlie Sh. Temirova[2], Zalina A. Abueva[2], Imani A. Ibragimova[3], Apam G. Gamzatova[3], Mariyan A. Makhmudova[2], Darya S. Panchenko[2], Malika R. Turazova[3]

[1] Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia;
[2] Astrakhan State Medical University, Astrakhan, Russia;
[3] Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

ABSTRACT

The article reviews the perspectives of spectroscopy in forensic practice. Spectroscopy is a pivotal analytical tool for the investigation of biological physical evidence. The primary focus of this study is on two major methods: Fourier transform infrared spectroscopy and Raman spectroscopy. Fourier transform infrared spectroscopy is based on the absorption and transmission of infrared radiation by the sample. This approach can be used to determine the molecular composition and chemical bonds in the sample. In contrast, Raman spectroscopy uses laser light scattering to analyze the molecular structure and chemical composition of samples. Both methods are highly precise, fast, and non-destructive, making them vital in forensic medicine. Successful applications of spectroscopy in forensic practice include the identification of various biological fluids such as blood, semen, and saliva. Consequently, Fourier infrared spectroscopy can differentiate between blood types, including peripheral and menstrual, detect specific molecules and determine their concentrations. Meanwhile, Raman spectroscopy has been successfully used to identify the blood of an adult and a newborn. The integration of spectroscopic methods with chemometric approaches and machine learning algorithms is a promising area. This integration facilitates the processing of large amounts of spectra, improves the analytical accuracy, and enables the identification of the test sample. These approaches have been shown to provide more accurate and reliable identification of causes of death and physical evidence.

Consequently, the advanced spectroscopic methods offer fast, accurate and reliable tools for forensic examinations. These methods contribute to the advancement of interdisciplinary teamwork and the introduction of the latest technologies into practice, which leads to the improvement of the quality of forensic examinations and the solution of practical challenges.

Keywords: spectroscopy; forensic medicine; Fourier spectroscopy; Raman spectroscopy; physical evidence; analysis; cause of death; review.

To cite this article:
Agnokova KB, Shikhabov AZ, Shkoda KD, Kadyrova FA, Mugadova MA, Bagirova DR, Temirova MSh, Abueva ZA, Ibragimova IA, Gamzatova AG, Makhmudova MA, Panchenko DS, Turazova MR. Prospects of spectroscopy in forensic practice: a review. *Russian Journal of Forensic Medicine.* 2025;11(1):49–62. DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

Received: 27.11.2024 **Accepted:** 07.02.2025 **Published online:** 14.03.2025

ECO•VECTOR

Article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

光谱学在法医学实践中的应用前景：科学综述

Kamilla B. Agnokova[1], Agakerim Z. Shikhabov[2], Kseniya D. Shkoda[1], Fatima A. Kadyrova[2], Minazhat A. Mugadova[2], Dzhamilya R. Bagirova[2], Makhlie Sh. Temirova[2], Zalina A. Abueva[2], Imani A. Ibragimova[3], Apam G. Gamzatova[3], Mariyan A. Makhmudova[2], Darya S. Panchenko[2], Malika R. Turazova[3]

[1] Kuban State Medical University, Krasnodar, Russia;
[2] Astrakhan State Medical University, Astrakhan, Russia;
[3] Kadyrov Chechen State University, Grozny, Russia

简介

文章讨论了光谱学在法医学实践中的应用前景。光谱学是研究生物来源物证的重要分析工具。重点介绍了两种主要方法：傅里叶红外光谱和拉曼光谱。傅里叶红外光谱的特征是将红外辐射照射到样品上，然后分析光的吸收光谱或光透射光谱。这种方法可以确定所研究材料中的分子组成和化学键结。相反，拉曼光谱使用激光散射来分析样品的分子结构和化学成分。这两种方法都具有高精度、快速性和无损分析的能力，从而使它们在法医学中不可或缺。在司法实践中成功应用光谱学的例子很多，包括鉴定各种生物液体，如血液、精液和唾液。因此，傅立叶红外光谱可以帮助区分血型，包括外周血和月经血，以及确定一定分子的存在和浓度。与此同时，拉曼光谱已成功用于识别成人和新生儿的血液。光谱学方法与化学计量学方法和机器学习算法的融合具有重要意义。这有助于处理大量光谱数据、提高分析精度和识别研究样品。这种方法可以更准确和可靠地确定死因和识别物证。

因此，现代光谱技术为法医鉴定提供了快速、准确和可靠的工具。有助于发展综合学科合作，将最新技术引入实践，从而提高法医鉴定的质量并解决复杂的实际问题。

关键词：光谱学；法医学；傅里叶光谱；拉曼光谱；物证；分析；死因；审查。

引用本文：
Agnokova KB, Shikhabov AZ, Shkoda KD, Kadyrova FA, Mugadova MA, Bagirova DR, Temirova MSh, Abueva ZA, Ibragimova IA, Gamzatova AG, Makhmudova MA, Panchenko DS, Turazova MR. 光谱学在法医学实践中的应用前景：科学综述. *Russian Journal of Forensic Medicine.* 2025;11(1):49–62. DOI: https://doi.org/10.17816/fm16227

收到：27.11.2024 **接受：**07.02.2025 **发布日期：**14.03.2025

ECO•VECTOR
Article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Судебная медицина объединяет знания из различных предметных областей и интегрирует множество концепций, что позволяет предоставлять исчерпывающие ответы и помощь в расследовании уголовных дел [1]. Тщательное изучение вещественных доказательств биологического происхождения, трупов, изображений и других материалов помогает выявить ключевые аспекты, такие как причина смерти и механизм получения травмы. Это, в свою очередь, содействует принятию справедливых и точных судебных решений.

С развитием новых технологий наблюдают улучшение возможностей установления взаимосвязей между объектами, обнаруженными на месте происшествия, и конкретными людьми, что в значительной мере способствует эффективному проведению следственных действий [2–5]. В большинстве случаев на месте преступления выявляют вещественные доказательства биологического происхождения, такие как биологические жидкости и ткани организма человека [6–8]. Эти биологические материалы можно обнаружить в различном состоянии, включая разложение и смешивание, что может затруднять их обнаружение и последующую идентификацию [9].

В судебно-медицинской практике особенно важно применение методов количественного анализа совместно со статистическими показателями достоверности для получения объективных и точных результатов. В этом контексте особое внимание уделяют таким методам, как инфракрасная Фурье-спектроскопия (ИК-Фурье-спектроскопия) и рамановская спектроскопия, поскольку они позволяют с высокой эффективностью обнаруживать белки и ядерные кислоты, что делает их эффективными инструментами для решения судебно-медицинских задач [10, 11].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ИНФРАКРАСНОЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

Принцип работы ИК-Фурье-спектроскопии основывается на анализе спектра поглощения образца при воздействии инфракрасного излучения с последующим преобразованием Фурье для обработки исходных данных. Этот процесс позволяет достоверно определять химические связи и функциональные группы, присутствующие в конкретном образце. ИК-Фурье-спектроскопия обеспечивает одновременный сбор спектральных данных высокого разрешения в широком диапазоне частот путём направления в интерферометр световых пучков, содержащих множество частот [12]. Информацию извлекают с помощью количественной оценки степени светопоглощения, которую проявляет образец. Внутри интерферометра, во время перемещения зеркал, происходит периодическое блокирование или пропускание света с разными длинами волн. Это приводит к образованию интерференционной картины. Применение преобразования Фурье к данным, полученным от исследуемого образца, облегчает трансформацию исходной информации в значения поглощения света на различных длинах волн, что позволяет получить спектр поглощения образца [12].

Метод ИК-Фурье-спектроскопии основан на взаимодействии химических веществ с инфракрасным светом. Атомы внутри молекул находятся в непрерывном движении и вибрации, что приводит к различным типам колебаний, включая симметричные и антисимметричные при растяжении, деформации или изгибе. Эти колебания происходят на частотах, связанных с химическими связями и свойствами соединений, что совпадает с ближней областью инфракрасного спектра [13]. Таким образом, ИК-Фурье-спектроскопия позволяет точно определить молекулярный состав образца, а также выявить возможные патологические изменения и предоставить ценную диагностическую информацию [14]. Например, K.T. Mader и соавт. [15] использовали многомерную ИК-Фурье-спектроскопию для изучения дегенерации межпозвонкового диска.

ИК-Фурье-спектроскопию широко используют и часто комбинируют с технологией нарушенного полного внутреннего отражения, формируя метод ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения. Эта комбинация значительно упрощает процедуру исследования образцов и одновременно повышает чувствительность анализа [16]. В результате инфракрасная спектроскопия находит всё более широкое применение в судебно-медицинской практике, способствуя более глубокому пониманию составов и свойств исследуемых объектов, включая скелетированные останки, лакокрасочное покрытие автомобилей и состав почвы [17–19].

ПРИНЦИП РАБОТЫ РАМАНОВСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Рамановская спектроскопия — это аналитический метод, используемый в химии, основанный на взаимодействии света с анализируемым образцом и изменении распределения зарядов его молекул под воздействием лазерного излучения [20]. Это взаимодействие приводит к обмену энергией и импульсом, что проявляется в двух явлениях: рэлеевском рассеянии и комбинационном рассеянии света. В большинстве случаев взаимодействие света с молекулами изменяет лишь направление света, не оказывая влияния на его энергию. Такое явление называют упругим или рэлеевским рассеянием. Однако при поглощении молекулой энергии падающего света она начинает вибрировать, что приводит к разнице в энергии между рассеянным и падающим светом. Этот процесс называют неупругим рассеянием, или рассеянием по Раману [21].

При этом изменение энергии лазера связано со столкновением с различными молекулами в образце, что приводит к передаче различного объёма энергии. Таким образом, каждая молекула обладает уникальными

характеристики, проявляющимися в виде пиков в спектре комбинационного рассеяния света. Спектроскопия комбинационного рассеяния света позволяет собирать неупругий рассеянный свет, специфичный для каждой ткани, и создавать своего рода её молекулярный отпечаток [22]. Этот метод позволяет осуществлять качественный и количественный анализ образцов, точно определяя вибрационные характеристики специфических химических молекул и предоставляя результаты анализа структуры, состава и химических связей образца [23].

На практике разработаны различные методы, основанные на комбинации рамановской спектроскопии с дополнительными технологиями. К таким методам относят:

- поверхностно-усиленную рамановскую спектросокпию;
- ступенчатую рамановскую спектроскопию;
- микро-рамановскую спектроскопию.

Продемонстрировано, что волоконная рамановская спектроскопия способна быстро и точно диагностировать мышечные заболевания у людей [22, 24, 25]. Более того, многочисленные преимущества рамановской спектроскопии способствовали её широкому применению в судебной медицине, предоставляя важные данные для аналитических исследований и экспертиз [26, 27].

ИК-Фурье-спектроскопию и рамановскую спектроскопию считают основными спектральными методами, применяемыми для оценки мод колебаний молекул. ИК-Фурье-спектроскопия основана на изменениях дипольных моментов молекул, в то время как рамановская — на изменениях их поляризуемости [28]. Оба метода обладают значительными преимуществами, поскольку позволяют проводить неразрушающие измерения, охватывают широкий спектральный диапазон, просты в эксплуатации и требуют минимальной подготовки образцов [29–32].

Для подготовки биологического материала необходимо тщательно отобрать и зафиксировать образцы, чтобы избежать их разрушения и загрязнения. Портативные устройства, такие как ручные инфракрасные Фурье-спектрометры и микро-рамановские спектрометры, позволяют проводить анализ непосредственно на месте происшествия, тогда как стационарные устройства, включая лабораторные инфракрасные Фурье-спектрометры и рамановские спектрометры с усилителем поверхности, обеспечивают более детализированный анализ в лабораторных условиях [22, 24, 25].

Основу неразрушающего анализа составляет нагревание без горения. Обычно температура нагрева составляет около 50–60 °C, что достаточно для активации процессов, но не вызывает денатурации большинства белков [29–32]. Риск денатурации существует, но при соблюдении температурных режимов он минимален.

Таким образом, правильный выбор технических средств и строгие протоколы подготовки и анализа биологических материалов позволяют минимизировать риски разрушения образцов и потери важных данных для дальнейших исследований.

ХЕМОМЕТРИКА

Хемометрика представляет собой мощный аналитический инструмент в области химии, в основе которого лежат экспериментальные данные. Она служит средством для извлечения ценной информации из результатов измерений с помощью математических и статистических методов. Обрабатывая данные в матричной форме, хемометрика позволяет выявлять потенциальные взаимосвязи между переменными и упрощает их использование для анализа многомерных характеристик, присущих данным исследованиям [33]. Широко используемое программное обеспечение MATLAB, а также языки программирования Python и R обеспечивают эффективный и точный хемометрический анализ.

При анализе данных спектральных измерений предварительная обработка, как правило, является необходимым этапом для подготовки данных к классификации или калибровочным методам, которые могут значительно улучшить и систематизировать полученные результаты. Кроме того, предварительная обработка может эффективно устранять или уменьшать шум и помехи в спектре, что, в свою очередь, повышает прогностические характеристики модели [34, 35]. Обычно используемые методы предварительной обработки спектров включают сглаживание, коррекцию базовой линии и рассеяния [36]. Эти методы помогают обеспечить более точные и надёжные результаты анализа, что имеет решающее значение для успешного применения хемометрики в судебной медицине.

Различают неконтролируемые и контролируемые хемометрические модели. Неконтролируемые модели строят без предварительно заданной пользователем информации и используют для исследовательских целей. Они позволяют выявлять закономерности в данных, группировать схожие объекты и разделять различные наборы данных. Один из ключевых методов — кластеризация, применяемая для поиска скрытых структур в данных. К широко используемым методам кластеризации относят иерархическую кластеризацию, метод k-средних и анализ главных компонент. Контролируемые модели обучают на основе заранее определённой пользователем информации и существующих группировок. Их используют для классификации новых образцов, анализируя их в контексте уже известных закономерностей. Среди распространённых методов контролируемого обучения выделяют частичный дискриминантный анализ по наименьшим квадратам, линейный дискриминантный анализ и метод опорных векторов. Данные методы позволяют извлекать значимые признаки и обеспечивают высокую точность классификации [37].

Стехиометрия обеспечивает статистическую основу для спектрального анализа, позволяя сравнивать спектр образца со стандартной хемометрической моделью [21]. Многочисленные исследования подчёркивают синергетическое использование рамановской

и ИК-Фурье-спектроскопии в сочетании с хемометрическими подходами для судебно-медицинского анализа, что существенно повышает точность и надёжность получаемых результатов [38–41].

ВЕЩЕСТВЕННЫЕ ДОКАЗАТЕЛЬСТВА БИОЛОГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Принцип обмена Локарда гласит: «Когда любой человек вступает в контакт с объектом или другим человеком, возникает кросс-передача вещественных доказательств» [42]. Это утверждение подчёркивает важность идентификации вещественных доказательств биологического происхождения в процессе осмотра места происшествия, что позволяет делать первоначальные выводы о фенотипе подозреваемого. Эффективное выявление и извлечение соответствующих вещественных доказательств имеют критическое значение для выделения информации, направленной на сужение круга потенциальных подозреваемых. Это является основой передовых методик, способствующих проведению следственных мероприятий. Биологические жидкости нередко служат основными вещественными доказательствами в судебно-медицинской экспертизе, поскольку они широко распространены на местах преступлений. Их анализ играет ключевую роль в определении различных характеристик и существенно способствует реконструкции событий [43]. Однако многие методы анализа являются разрушающими, а количество доступных образцов зачастую ограничено. Именно поэтому обеспечение неразрушающего отбора проб при эффективной и точной идентификации становится крайне важным аспектом исследования. Методы идентификации, основанные на спектроскопии, представляют собой оптимальное решение для анализа вещественных доказательств биологического происхождения. В этой области всё чаще применяют рамановскую и ИК-Фурье-спектроскопию, поскольку данные методы обладают высокой чувствительностью и позволяют не только идентифицировать образцы, но и обеспечивать их сохранность для дальнейших исследований.

Следы крови

Кровь является наиболее распространённой биологической жидкостью, обнаруживаемой на местах преступлений, связанных с применением насилия, что обусловливает наличие многочисленных исследований, направленных на её идентификацию. Например, в исследовании, проведённом S. Sharma и соавт. [44], выполнен комплексный анализ с использованием ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения, который включал 50 образцов венозной крови от здоровых людей, 30 — менструальной крови, 30 — спермы и вагинальной жидкости, а также различные небиологические вещества, способные имитировать кровь и вызывать ложноположительные результаты. Для анализа пятно крови наносили на поверхность кристалла, применяемого при отражательной спектроскопии с ослабленным полным внутренним отражением. Использование комбинации хемометрических методов, таких как метод главных компонент и линейный дискриминантный анализ, позволило классифицировать кровь, другие жидкости организма и подобные крови небиологические вещества с безупречной точностью до 100%. Кроме того, авторы продемонстрировали, что ИК-Фурье-спектроскопия в режиме ослабленного полного внутреннего отражения позволяла достоверно устанавливать давность образования следов крови на 1, 7 и 15 сутки (на предметном стекле).

Аналогичное исследование, проведённое J. Fujihara и соавт. [45], также продемонстрировало возможность различать пятна крови младенцев и взрослых с помощью микро-рамановской спектроскопии. В дополнение к точной идентификации следов крови определение её видовой принадлежности имеет ключевое значение в судебно-медицинской практике. Например, в случае дорожно-транспортного происшествия способность различать кровь человека и животного может сыграть решающую роль в расследовании и установлении обстоятельств инцидента. Множество учёных стремятся объединить вибрационную спектроскопию и хемометрику с целью определения видовой принадлежности. Так, A. Takamura и соавт. [46] представили инновационную технологию, объединяющую трапециевидный рамановский спектрометр с возможностями поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния. Команда разработала обширную спектральную базу данных, охватывающую 26 различных видов, включая человека. Применяя алгоритмы свёрточных нейронных сетей, авторы достигли высокой точности идентификации, превышающей 94%, что подчёркивает эффективность и надёжность данного метода в отношении определения видовой принадлежности крови [47].

Существует также множество других исследований, в которых рассматривают спектроскопические методы. Например, R. Kumar и соавт. [48] применяли ИК-Фурье-спектроскопию в режиме ослабленного полного внутреннего отражения для анализа инфракрасного спектра пятен крови и разработали модель для определения времени их образования с использованием частичной регрессии по методу наименьших квадратов, что позволило достоверно определять давность образования пятен крови в промежутке от 1 до 175 дней. R. Gautam и соавт. [49] продемонстрировали надёжность и эффективность рамановской спектроскопи в сочетании с методом наименьшего абсолютного сжатия и отбора признаков в отношении определения давности образования пятен крови в промежуток от 1 до 336 часов на различных поверхностях, включая напольную плитку и линолеум. Входная мощность (2 МВт) и время экспозиции (15 с) оптимизированы, чтобы избежать возможного нежелательного нагрева/повреждения образца крови.

Таким образом, современные спектроскопические методы, такие как ИК-Фурье-спектроскопия в режиме ослабленного полного внутреннего отражения и рамановская спектроскопия, демонстрируют высокий потенциал для решения разнообразных задач судебной медицины, включая идентификацию крови, оценку времени её образования и определение видовой принадлежности. Интеграция этих методов с хемометрическими подходами позволяет повысить точность и надёжность получаемых результатов, делая их незаменимыми инструментами в арсенале современных судебно-медицинских экспертов.

Следы спермы

Семенная жидкость действительно часто встречается на местах преступлений, особенно в случаях преступлений против половой неприкосновенности. В исследовании, проведённом S. Zha и соавт. [50], выполнены эксперименты, в которых образцы спермы помещали на три разных субстрата и анализировали с использованием ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения в сочетании с такими хемометрическими методами, как метод главных компонент и наименьших квадратов. Они позволили достоверно оценить давность образования следов спермы *in vitro* в интервале от 0,5 до 6 дней. Такой подход предоставляет следователям полезные данные для проверки алиби, установления времени совершения преступления и оценки давности наступления смерти.

Также следует учитывать важность определения видовой принадлежности спермы. X. Wei и соавт. [51] продемонстрировали успешное применение классификационных моделей, полученных с помощью частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам и ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения, для эффективной идентификации человека среди других видов (например, кролика, собаки, свиньи, коровы, барана) с прогностической точностью 100%. Это подчёркивает практическую значимость вибрационной спектроскопии как инструмента для определения видовой принадлежности спермы в реальной судебно-медицинской практике. Примечательно, что для определения видовой принадлежности не требуется наличие целых клеток спермы, что делает этот метод особенно гибким и пригодным для анализа небольшого количества или частично разрушенного материала.

Слюна

Слюна представляет собой важную биологическую жидкость, поскольку её состав тесно связан с составом крови, что делает слюну перспективным материалом для анализа. Так, E. Al-Hetlani и соавт. [52] собрали 32 образца слюны и провели измерения с использованием рамановской спектроскопии. Авторы разработали модель для классификации курящего и некурящего человека, основанную на искусственной нейронной сети, с точностью 100% при внешней валидации. E. Buchan и соавт. [53] систематически изучили молекулярно-спектральный отпечаток слюны, используя рамановскую спектроскопию в сочетании с гибридным алгоритмом искусственной нейронной сети. На основе спектральных отпечатков слюны авторы стратифицировали людей по следующим возрастным группам:

- молодые (20–30 лет);
- среднего возраста (31–55 лет);
- пожилые (старше 56 лет).

Кроме того, авторы осуществили дифференциацию по полу, что позволило установить уникальные молекулярные особенности для женщин и мужчин. Состав слюны не претерпел существенных изменений в течение недели, что делает её перспективным объектом исследования для решения судебно-медицинских задач.

ПРИЧИНА СМЕРТИ

Судебно-медицинское вскрытие в значительной степени основано на выявлении макроскопической и микроскопической картины заболеваний, что ограничивает возможность диагностировать функциональные повреждения, такие как внезапная сердечная смерть, переохлаждение и отравление [54]. Спектроскопия в контексте современных аналитических технологий предоставляет возможности для неразрушающего исследования биологических образцов без необходимости их предварительной маркировки, открывая новые горизонты для судебно-медицинских экспертов.

Отёк лёгких

Исследование H. Lin и соавт. [55] продемонстрировало важность выделения интерстициальной жидкости в случае отёка лёгких для установления причины смерти. В своей работе авторы использовали ИК-Фурье-спектроскопию для измерения инфракрасного спектра интерстициальной жидкости лёгких и интегрировали полученные данные с системой глубокого обучения на основе эволюционных нейронных сетей для построения модели классификации. Результаты исследования показали, что чувствительность модели варьировала от 0,9661 до 0,9856, тогда как специфичность — от 0,8774 до 0,9167. Эти показатели позволяют предположить, что синергия ИК-Фурье-спектроскопии и алгоритмов глубокого обучения может стать новым и эффективным инструментом для диагностики различных распространённых причин смерти, включая кардиомиопатию, отравление окисью углерода и внутримозговые кровоизлияния.

В судебно-медицинской практике идентификация летального анафилактического шока представляет собой сложную задачу, требующую точной дифференциальной диагностики, что затрудняет однозначное определение причины смерти. Судебно-медицинские эксперты часто сталкиваются с необходимостью оценки

тонких морфологических и физиологических различий, поэтому нехватка соответствующей информации зачастую мешает однозначному заключению [56]. Согласно наблюдениям судебно-медицинских экспертов, в случаях смертельного анафилактического шока фиксируют увеличение объёма интерстициальной жидкости лёгких [57]. Некоторые учёные также отметили различия в составе жидкости, образующейся в лёгких при различных этиологических формах отёка [58, 59]. Так, H. Lin и соавт. [60] определили потенциал анализа интерстициальной жидкости лёгких для установления причины смерти. Они применили ИК-Фурье-спектроскопию в сочетании с методом главных компонент для выявления характерных отличий в составе белков, присутствующих в интерстициальной жидкости лёгких, образующейся при анафилактическом шоке. Авторы установили, что интерстициальная лёгочная жидкость при смертельной анафилаксии имеет иной биохимический состав по сравнению с жидкостью, образованной при других причинах смерти, такими как механическая асфиксия, черепно-мозговая травма и острая сердечная недостаточность. Методы инфракрасной спектроскопии и распознавания образцов позволили выявить повышенное содержание белков, включая альбумин и глобулин, в интерстициальной жидкости при анафилактическом отёке лёгких. Анализ вторичной структуры белков показал преобладание α-спиральных и поворотных структур, наряду с меньшим количеством тирозин-богатых белков по сравнению с контрольной группой. Эти данные подтверждены построением модели с помощью частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам, которая успешно классифицировала случаи наличия и отсутствия анафилактического шока с высокой точностью, демонстрируя потенциал данного метода для посмертной диагностики смертельной анафилаксии.

Внезапная сердечная смерть

В судебной медицине наиболее часто проводят дифференциальную диагностику с внезапной смертью, среди причин которой выделяют сердечно-сосудистые заболевания — внезапная сердечная смерть [54, 61]. Этот феномен, как правило, отмечают у внешне здоровых людей, и он характеризуется внезапным началом, быстро прогрессирующим состоянием и летальным исходом. В ряде случаев установить причину смерти с помощью стандартного секционного исследования трупа невозможно, что требует применение дополнительных тестов для точной идентификации. Традиционные методы аутопсии и микроскопического исследования часто не позволяют провести чёткую дифференциацию между асфиксией и внезапной сердечной смертью, поскольку отсутствуют специфические морфологические признаки. Для разрешения данной проблемы K. Zhang и соавт. [62] провели экспериментальные исследования, используя ИК-Фурье-спектроскопию в сочетании с методом опорных векторов, для анализа биохимических различий в лёгочной ткани крыс и человека, умерших в результате асфиксии и внезапной сердечной смерти. Авторы обнаружили, что у крыс, погибших в результате асфиксии, наблюдают более высокое содержание липидов и белков в лёгочной ткани по сравнению с теми, кто умер от внезапной сердечной смерти. Эти различия подтверждены при анализе данных, собранных через 24 часа после смерти животных, что свидетельствует о возможности использования данного метода для определения причины смерти даже после начала разложения тканей. Кроме того, семь из девяти выявленных дифференциальных спектральных признаков также оказались значимыми в образцах человеческой лёгочной ткани, что указывает на потенциал использования этого подхода в судебно-медицинской практике для диагностики причин смерти [62].

Более того, эмпирические данные показывают, что фиброз миокарда является распространённым проявлением внезапной сердечной смерти. Таким образом, его выявление представляет собой многообещающий новый подход к диагностике случаев внезапной сердечной смерти. Исследование, проведённое X. Yang и соавт. [63], также подтверждает этот вывод. Авторы использовали ИК-Фурье-спектроскопию в режиме ослабленного полного внутреннего отражения для получения инфракрасного спектра сердечной ткани, а затем анализировали его с применением метода частичного дискриминантного анализа по наименьших квадратам. В общей сложности исследовано 129 гистологических срезов сердца, для которых выполнены как спектроскопия, так и окрашивание гематоксилином и эозином. Образцы разделили на экспериментальную (с миокардиальным фиброзом) и контрольную группы (без миокардиального фиброза). Результаты классификации с использованием хемометрии показали, что для обучающей выборки чувствительность и специфичность составили 0,91 и 1,0 соответственно, а для предсказательной выборки — 0,862 и 0,900. Это исследование продемонстрировало эффективность ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения в сочетании с хемометрией в отношении идентификации миокардиального фиброза.

Кроме того, внезапная сердечная смерть часто ассоциируется с инфарктом миокарда. Спектральный анализ выявил отличительные особенности для каждой стадии, которые подтверждены результатами анализа главных компонент. Автоматизированный классификатор на основе искусственных нейронных сетей успешно распознал эти стадии, а визуализация с помощью псевдоцветных изображений показала высокое совпадение с данными гистологического исследования. Этот подход продемонстрировал свою эффективность в объективной оценке гистологической стадии инфаркта миокарда в судебно-медицинской практике [64]. Аналогичным образом показано, что с помощью ИК-Фурье-спектроскопии можно эффективно выявлять ткани, свидетельствующие о ранней ишемии миокарда, даже когда отсутствуют явные морфологические изменения [65].

Утопление

Утопление является видом механической асфиксии, вызванной обструкцией дыхательных путей и альвеол, что приводит к нарушению газообмена, недостаточному поступлению кислорода и накоплению углекислого газа в организме. В судебно-медицинской практике выявление диатомового планктона часто считают стандартным методом для подтверждения факта утопления [62, 66, 67]. Однако нередко он может отсутствовать у лиц, погибших в результате утопления, в то время как у некоторых людей с другой причиной смерти, которые долгое время находились в среде, богатой диатомовыми водорослями, можно обнаружить их повышенные концентрации. Эта ситуация усложняет диагностику, поскольку необходимо точно различать утопление и посмертное погружение в воду. Различная продолжительность погружения после смерти может приводить к разной концентрации диатомового планктона, что требует точного определения этих факторов [68]. Так, H. Xiong и соавт. [70] применили ИК-Фурье-спектроскопию в сочетании с методом частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам для оценки инфракрасного спектра образцов лёгочной ткани. Авторы выявили значительные различия в содержании амида I и амида II, что позволило эффективно дифференцировать случаи утопления от посмертного погружения. Кроме того, анализ методом главных компонент выявил определённые различия между образцами, полученными из пресной и солёной воды, что связано с различной концентрацией среды утопления. При этом степень деградация лёгочной ткани не оказала существенного влияния на результаты. С помощью метода частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам разработаны модели для идентификации утопления и посмертного погружения как в условиях пресной, так и солёной воды. Обе модели продемонстрировали высокую точность классификации, достигая 94,4 и 100% соответственно. Средние спектры второй производной, а также методы хемометрии подтвердили, что различия в структуре и содержании белка являются ключевыми факторами при дифференциации случаев утопления и посмертного погружения. Это пилотное исследование демонстрирует потенциал ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения в сочетании с хемометрикой как эффективного метода судебно-медицинской диагностики утопления.

Действие крайних температур

В практической деятельности нередко возникает необходимость в дифференциальной диагностике скоропостижной смерти и переохлаждения. Ишемическая болезнь сердца, кровоизлияния в мозг и другие заболевания часто развиваются при низких температурах, что может затруднять дифференциацию этих состояний и летальных исходов, вызванных непосредственно гипотермией. Несмотря на то что патологические изменения сердечно-сосудистой системы при переохлаждении хорошо изучены, точная роль в диагностике и понимании танатогенетических процессов остаётся не до конца выясненной [70].

H. Lin и соавт. [71] продемонстрировали эффективность ИК-Фурье-спектроскопии в сочетании с хемометрикой в отношении выявления лёгочного отёка как специфического маркёра смертельной гипотермии. Сравнительный анализ спектрального профиля выявил повышенное содержание β-листовых структур белков в отёчной жидкости лёгких у лиц, умерших от гипотермии, по сравнению с другими причинами смерти. Модель постмортальной диагностики смертельной гипотермии, созданная с использованием метода частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам, корректно классифицировала причины смерти в восьми новых случаях. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ИК-Фурье-спектроскопии в сочетании с хемометрикой для посмертной диагностики смертельной гипотермии.

Метаболизм и функциональная активность гипоталамуса, который играет ключевую роль в регуляции температуры тела, также претерпевают изменения в ответ на колебания внутренней температуры. Так, H. Lin и соавт. [72] оценивали эффекты летальной гипо- и гипертермии с использованием ИК-Фурье-спектроскопии и метода «случайного леса» путём анализа инфракрасного спектра гипоталамуса. Результаты показали, что в случае летальной гипертермии наблюдали увеличение общего содержания липидов, сопровождающееся снижением концентрации ненасыщенных жирных кислот и ухудшением подвижности клеточных мембран. В свою очередь, у пациентов с летальным исходом при гипотермии обнаружили значительное увеличение нарушений агрегации белков и содержания нуклеиновых кислот. Эти результаты свидетельствуют о том, что ИК-Фурье-спектроскопия может быть полезным методом для оценки биохимических характеристик гипоталамуса в условиях действия экстремальных температур. В аналогичном эксперименте использовали ИК-Фурье-спектроскопию в режиме ослабленного полного внутреннего отражения в сочетании с методом частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам для оценки моделей летального исхода в условиях гипер- и гипотермии путём анализа плазмы крови. Результаты исследования показали, что содержание общего количества липидов и длинноцепочечных жирных кислот ниже в случае летальной гипертермии по сравнению с контрольной группой, тогда как при летальной гипотермии их концентрация выше. Более того, в случае летальной гипертермией наблюдали наивысшую концентрацию ненасыщенных липидов, в то время как при летальной гипотермии — наибольшее содержание карбонилового эфира [73]. Предыдущие исследования продемонстрировали потенциал метаболомики в диагностике смертельного переохлаждения путём анализа состава стекловидного тела. Спектроскопия, результаты которой сопоставимы

с данными, полученными с помощью метаболомики, также позволяет определять состав исследуемых образцов, кроме того, она подходит для анализа жидких материалов. Именно поэтому изучение применения спектроскопии для обнаружения компонентов стекловидного тела представляет собой перспективное направление для дальнейших исследований [74]. Комбинирование подходов метаболомики и спектроскопии может существенно улучшить точность и надёжность диагностики летальных исходов при воздействии крайних температур, что имеет важное значение для судебно-медицинской практики. Исследования в этой области могут способствовать разработке новых методов, позволяющих более эффективно выявлять случаи смерти от гипо- и гипертермии, основываясь на химическом и биохимическом анализе, что, в свою очередь, может помочь в решении сложных практических задач.

Сахарный диабет и его осложнения

Диабетический кетоацидоз может привести к летальному исходу и усложняет определение причин смерти при рутинной аутопсии из-за отсутствия характерных морфологических изменений [75]. D. Wu и соавт. [76] провели исследование интерстициальной жидкости лёгких, полученной от трупов, применяя ИК-Фурье-спектроскопию. В ходе исследования использовали метод частичного дискриминантного анализа по наименьшим квадратам для создания модели классификации. Результаты выявили значительные изменения в белках, содержащихся в интерстициальной жидкости лёгких у людей с диабетическим кетоацидозом, подтверждая, что ИК-Фурье-спектроскопия имеет потенциал в отношении диагностики и выявления этого состояния.

Кроме того, установлена чёткая двунаправленная корреляционная связь между сахарным диабетом и сердечной недостаточностью, при этом диабетическая кардиомиопатия — основное сердечное проявление у пациентов с сахарным диабетом [77]. Большинство методов диагностики болезни нацелены на выявление её поздних стадий, тогда как исследования на ранних стадиях без явных морфологических и функциональных изменений в миокарде остаются относительно ограниченными. Тем не менее технологии ИК-Фурье-спектроскопии показали потенциал для оценки этого заболевания в экспертной практике. Они позволяют выявлять карбониловые эфиры, алкиновые группы CH и CH2-липиды в миокарде у мышей с диабетом, а также отмечают значительные изменения в конформационной трансформации β-структуры и α-спирали общих липидов, сахаров и белков по сравнению со здоровыми мышами. Эти результаты указывают на возможность использования ИК-Фурье-спектроскопии для определения или исключения смерти от диабетической кардиомиопатии во время секционного исследования [78]. В аналогичном исследовании использовали ИК-Фурье-спектроскопию в режиме ослабленного полного внутреннего отражения для анализа различных жидкостей организма на мышиной модели диабетической кардиомиопатии. Результаты показали линейную корреляционную связь между тяжестью заболевания и концентрацией биомаркёров в плазме, слюне, моче, а также в комбинации плазмы и слюны. Эти данные подчёркивают потенциал ИК-Фурье-спектроскопии в режиме ослабленного полного внутреннего отражения для экспресс-диагностики диабетической кардиомиопатии [79].

Спектроскопия в качестве метода химического анализа обладает уникальной возможностью определения химического состава и молекулярной структуры тканей и веществ человеческого организма. Этот подход предоставляет исчерпывающую и ценную информацию, необходимую для установления причин смерти в рамках судебно-медицинских исследований. В отличие от традиционных аналитических методов, требующих сложной подготовки и разделения образцов, методы спектроскопии позволяют осуществлять прямой анализ необработанных образцов, что значительно упрощает процесс.

Спектроскопические методы предлагают более быстрые, точные и надёжные дополнительные инструменты как при проведении судебно-медицинской экспертизы трупов, так и вещественных доказательств биологического происхождения. Кроме того, интеграция алгоритмов машинного обучения с различными аналитическими технологиями обещает повысить точность анализа данных и идентификацию исследуемых образцов, способствуя междисциплинарному сотрудничеству и продвижению современных технологий и методов анализа в области судебной медицины.

ПЕРСПЕКТИВЫ

Рамановская и ИК-Фурье-спектроскопия представляют собой две важные аналитические методики, используемые в судебной медицине, которые демонстрируют множество путей для дальнейшего развития и значительный потенциал применения. ИК-Фурье-спектроскопия основана на облучении образца инфракрасным излучением, последующем измерении поглощённого или прошедшего света и преобразовании этих данных в спектральный график, позволяющий определить молекулярный состав образца. Эта технология имеет неоценимое значение в области судебной экспертизы, поскольку она помогает идентифицировать мельчайшие улики, которые могли бы остаться незамеченными невооружённым глазом. Она особенно эффективна при дифференциации типов следов крови, включая возможность отличать периферическую кровь от менструальной, а также определять наличие и концентрации определённых молекул. Интересно, что ИК-Фурье-спектроскопия может обеспечить биохимическое профилирование гипоталамуса как в условиях летальной гипертермии, так и гипотермии.

Рамановская спектроскопия, в свою очередь, использует метод измерения, основанный на количественной

оценке рассеянного света, а не поглощённого или прошедшего излучения. Эта методология использует неупругое рассеяние фотонов для выяснения молекулярного состава и идентификации химических связей в образце. С помощью рамановской спектроскопии можно точно различать такие признаки, как принадлежность крови взрослому человеку или новорождённому.

Как рамановская, так и ИК-Фурье-спектроскопия являются бесценными инструментами в судебной медицине, предлагая неразрушающий анализ, что позволяет сохранить целостность образца для дальнейшего исследования при необходимости. Таким образом, оба метода остаются важными и быстро развиваются как в технологическом, так и в практическом плане, демонстрируя значительную ценность. Ожидаемые усовершенствования в технологиях рамановской и ИК-Фурье-спектроскопии будут направлены на повышение чувствительности, увеличение скорости обнаружения и общую эффективность.

Параллельно с этим продолжают разработку нового программного обеспечения и алгоритмов, которые будут синергетически интегрировать эти технологии с колебательной спектроскопией, что улучшит точность и достоверность получаемых данных. Также ожидается дальнейшая миниатюризация и автоматизация рамановской и ИК-Фурье-спектроскопии, что сделает эти технологии более практичными и удобными в использовании. Применения данных методов в судебной медицине будет продолжать расширяться, предлагая новые возможности для повышения качества судебно-медицинских экспертиз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рамановская и ИК-Фурье-спектроскопия — это высокоэффективные аналитические методы, активно используемые в судебной медицине для решения множества диагностических задач, включая идентификацию вещественных доказательств биологического происхождения и определение причин смерти. Оба метода обладают высокой точностью, скоростью и возможностью неразрушающего анализа, что открывает многообещающие перспективы для их применения в судебной медицине.

Тем не менее несмотря на свою эффективность, рамановская и ИК-Фурье-спектроскопия имеют ограничения, связанные с высокой стоимостью, что препятствует их широкому внедрению. Кроме того, всесторонний анализ спектральных данных в судебной медицине и патологоанатомической практике часто требует специальных навыков в области машинного обучения и искусственного интеллекта, что представляет собой дополнительное препятствие для специалистов, у которых могут отсутствовать такие знания.

Ожидается, что по мере развития общества и технологий искусственного интеллекта порог внедрения рамановской и ИК-Фурье-спектроскопии будет снижаться, что приведёт к их более широкому применению в судебно-медицинской практике.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. К.Б. Агнокова, А.З. Шихабидов, Ф.А. Кадырова, М.А. Мугадова, Д.Р. Багирова — концепция работы, сбор и анализ литературных данных; К.Д. Шкода, М.Ш. Темирова, З.А. Абуева, И.А. Ибрагимова, А.Г. Гамзатова — анализ литературных данных, написание рукописи; М.А. Махмудова, Д.С. Панченко, М.Р. Туразова — написание и редактирование рукописи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена в соответствии с процедурой fast-track. В рецензировании участвовали два внешних рецензента и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. K.B. Agnokova, A.Z. Shihabidov, F.A. Kadyrova, M.A. Mugadova, D.R. Bagirova: concept and design of review, information search; K.D. Shkoda, M.Sh. Temirova, Z.A. Abueva, I.A. Ibragimova, A.G. Gamzatova: literature data analysis, writing the manuscript; M.A. Makhmudova, D.S. Panchenko, M.R. Turazova writing and editing the manuscript. Thereby, all authors provided approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Ethics approval. Not applicable.

Funding sources. No funding.

Disclosure of interests. The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. This article was submitted to the Journal on an unsolicited basis and reviewed in accordance with the fast-track procedure. Two external peer-reviewers and the scientific editor were involved in the review process.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Boyko IB. To the question of «competence» in forensic medicine and forensic medical examination. *I.P. Pavlov Russian Medical Biological Herald.* 2019;27(1):107–113. doi: 10.23888/PAVLOVJ2019271107-113 EDN: HUHPXP

2. Fetisov VA, Makarov IYu, Gusarov AA, et al. The modern possibilities for the application of photogrammetry in forensic medical traumatology. *Forensic Medical Expertise.* 2017;60(1):46–50. doi: 10.17116/sudmed201760146-50 EDN: XXNESN

3. Zhang M. Forensic imaging: a powerful tool in modern forensic investigation. *Forensic Sciences Research.* 2022;7(3):385–392. doi: 10.1080/20961790.2021.2008705 EDN: DXAQMK

4. Khalikov AA, Kildyushov EM, Kuznetsov KO, Rahmatullina GR. Estimation of time since death with the postmortem microbiome: a modern view and approaches to solving the problem. *Forensic Medical Expertise.* 2022;65(3):49–53. doi: 10.17116/sudmed20226503149 EDN: TQGZHP

5. Antunes J, Gauthier Q, Aguiar-Pulido V, et al. A data-driven, high-throughput methodology to determine tissue-specific differentially methylated regions able to discriminate body fluids. *Electrophoresis.* 2021;42(9-10):1168–1176. doi: 10.1002/elps.202000217 EDN: RAJOMA

6. Macri AM, Lam S, Powers RH, Marsico ALM. Differentiation of morphologically similar human head hairs from two demographically similar individuals using amino acid ratios. *Journal of Forensic Sciences.* 2020;65(5):1745–1751. doi: 10.1111/1556-4029.14489 EDN: FMCJND

7. Gentile G, Tambuzzi S, Andreola S, Zoja R. Histotopography of haemorrhagic infiltration in the hanging cutaneous furrow: where to look for haemorrhagic infiltration in hanging. *Medicine, Science and The Law.* 2021;62(1):52–59. doi: 10.1177/00258024211023246 EDN: OVKKDB

8. Avila E, Cavalheiro CP, Felkl AB, et al. Brazilian forensic casework analysis through MPS applications: statistical weight-of-evidence and biological nature of criminal samples as an influence factor in quality metrics. *Forensic Science International.* 2019;303:109938. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.109938 EDN: EVROMT

9. Ling S, Kaplan J, Berryessa CM. The importance of forensic evidence for decisions on criminal guilt. *Science & Justice.* 2021;61(2):142–149. doi: 10.1016/j.scijus.2020.11.004 EDN: UIVPJL

10. Robotham C, Tikhomirov SV. Possibilities for the application of modern IR Fourier microscopes in forensic and criminalistic analysis. *Forensic Medical Expertise.* 2012;55(2):50–52. EDN: PEKDYN

11. Wien F, Geinguenaud F, Grange W, Arluison V. SRCD and FTIR spectroscopies to monitor protein-induced nucleic acid remodeling. In: Boudvillain M, editor. *RNA remodeling proteins.* New York: Humana Press; 2020. P. 87–108. doi: 10.1007/978-1-0716-0935-4_6

12. Barannikova IN. The use of FTIR spectroscopy in forensic practice and its potential future applications. *Theory and Practice of Forensic Science.* 2017;12(1):85–91. doi: 10.30764/64/1819-2785-2017-12-1-85-91 EDN: YHMVFP

13. Yong H, Zotev N, Ruddock JM, et al. Observation of the molecular response to light upon photoexcitation. *Nature Communications.* 2020;11(1):2157. doi: 10.1038/s41467-020-15680-4 EDN: EKHGXA

14. Su KY, Lee WL. Fourier transform infrared spectroscopy as a cancer screening and diagnostic tool: a review and prospects. *Cancers.* 2020;12(1):115. doi: 10.3390/cancers12010115 EDN: ARNGFM

15. Mader KT, Peeters M, Detiger SEL, et al. Investigation of intervertebral disc degeneration using multivariate FTIR spectroscopic imaging. *Faraday Discussions.* 2016;187:393–414. doi: 10.1039/C5FD00160A

16. Zahoor FD, Mader KT, Timmins P, et al. Investigation of within-tablet dynamics for extended release of a poorly soluble basic drug from hydrophilic matrix tablets using ATR–FTIR imaging. *Molecular Pharmaceutics.* 2020;17(4):1090–1099. doi: 10.1021/acs.molpharmaceut.9b01063 EDN: HCCJEH

17. Leskovar T, Zupanič Pajnič I, Jerman I, Črešnar M. Separating forensic, WWII, and archaeological human skeletal remains using ATR-FTIR spectra. *International Journal of Legal Medicine.* 2019;134(2):811–821. doi: 10.1007/s00414-019-02079-0 EDN: SOOURC

18. Xu X, Du C, Ma F, et al. Forensic soil analysis using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Fourier transform infrared total attenuated reflectance spectroscopy (FTIR-ATR): principles and case studies. *Forensic Science International.* 2020;310:110222. doi: 10.1016/j.forsciint.2020.110222 EDN: TPSPDK

19. Duarte JM, Sales NGS, Braga JWB, et al. Discrimination of white automotive paint samples using ATR-FTIR and PLS-DA for forensic purposes. *Talanta.* 2022;240:123154. doi: 10.1016/j.talanta.2021.123154 EDN: WAYXYM

20. Jones RR, Hooper DC, Zhang L, et al. Raman techniques: fundamentals and frontiers. *Nanoscale Research Letters.* 2019;14(1):231. doi: 10.1186/s11671-019-3039-2 EDN: AJIVYG

21. Alkhuder K. Attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy: a universal analytical technique with promising applications in forensic analyses. *International Journal of Legal Medicine.* 2022;136(6):1717–1736. doi: 10.1007/s00414-022-02882-2 EDN: GUTDLX

22. Plesia M, Stevens OA, Lloyd GR, et al. In vivo fiber optic raman spectroscopy of muscle in preclinical models of amyotrophic lateral sclerosis and duchenne muscular dystrophy. *ACS Chemical Neuroscience.* 2021;12(10):1768–1776. doi: 10.1021/acschemneuro.0c00794 EDN: SKILIN

23. Nitta N, Iino T, Isozaki A, et al. Raman image-activated cell sorting. *Nature Communications.* 2020;11(1):1–16. doi: 10.1038/s41467-020-17285-3 EDN: DIPZLO

24. Alix JJP, Plesia M, Hool SA, et al. Fiber optic Raman spectroscopy for the evaluation of disease state in Duchenne muscular dystrophy: an assessment using the mdx model and human muscle. *Muscle & Nerve.* 2022;66(3):362–369. doi: 10.1002/mus.27671 EDN: ARGEGD

25. Alix JJP, Plesia M, Lloyd GR, et al. Rapid identification of human muscle disease with fibre optic Raman spectroscopy. *The Analyst.* 2022;147(11):2533–2540. doi: 10.1039/d1an01932e EDN: CGCEHT

26. Palenik CS, Groves E, Insana J, Palenik S. Locating, identifying, and comparing sub-visible paint particles. *Journal of Forensic Sciences.* 2019;64(6):1851–1858. doi: 10.1111/1556-4029.14062

27. Gładysz M, Król M, Karoly A, et al. A multitechnique approach for discrimination and identification of lipsticks for forensic purposes. *Journal of Forensic Sciences.* 2021;67(2):494–504. doi: 10.1111/1556-4029.14945 EDN: LOHBML

28. Morais CLM, Lima KMG, Singh M, Martin FL. Tutorial: multivariate classification for vibrational spectroscopy in biological samples. *Nature Protocols.* 2020;15(7):2143–2162. doi: 10.1038/s41596-020-0322-8 EDN: KJHMPF

29. Leng H, Chen C, Chen C, et al. Raman spectroscopy and FTIR spectroscopy fusion technology combined with deep learning: a novel cancer prediction method. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2023;285:121839. doi: 10.1016/j.saa.2022.121839 EDN: HBFJGW

30. Lilo T, Morais CLM, Shenton C, et al. Revising Fourier-transform infrared (FT-IR) and Raman spectroscopy towards brain cancer detection. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy.* 2022;38:102785. doi: 10.1016/j.pdpdt.2022.102785 EDN: TQXQGF

31. Liu Y, Sun B, Tajcmanova L, et al. Effect of carbon residues structures on burnout characteristic by FTIR and Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022;272:120947. doi: 10.1016/j.saa.2022.120947 EDN: FMFCTA

32. Zhang Q, Zhao L, Qi G, et al. Raman and fourier transform infrared spectroscopy techniques for detection of coronavirus (COVID-19): a mini review. *Frontiers in Chemistry.* 2023;11:1193030. doi: 10.3389/fchem.2023.1193030 EDN: JYXGZC

33. Takamura A, Halamkova L, Ozawa T, Lednev IK. Phenotype profiling for forensic purposes: determining donor sex based on fourier transform infrared spectroscopy of urine traces. *Analytical Chemistry.* 2019;91(9):6288–6295. doi: 10.1021/acs.analchem.9b01058

34. Mishra P, Rutledge DN, Roger JM, et al. Chemometric pre-processing can negatively affect the performance of near-infrared spectroscopy models for fruit quality prediction. *Talanta.* 2021;229:122303. doi: 10.1016/j.talanta.2021.122303 EDN: ZIDEBP

35. Oliveri P, Malegori C, Simonetti R, Casale M. The impact of signal pre-processing on the final interpretation of analytical outcomes — a tutorial. *Analytica Chimica Acta.* 2019;1058:9–17. doi: 10.1016/j.aca.2018.10.055 EDN: UXEUDB

36. Mishra P, Biancolillo A, Roger JM, et al. New data preprocessing trends based on ensemble of multiple preprocessing techniques. TRAC. *Trends*

in Analytical Chemistry. 2020;132:116045. doi: 10.1016/j.trac.2020.116045 EDN: DYHQMI

37. Ralbovsky NM, Lednev IK. Towards development of a novel universal medical diagnostic method: Raman spectroscopy and machine learning. *Chemical Society Reviews.* 2020;49(20):7428–7453. doi: 10.1039/d0cs01019g EDN: IRJOHZ

38. DePaoli D, Lemoine É, Ember K, et al. Rise of Raman spectroscopy in neurosurgery: a review. *Journal of Biomedical Optics.* 2020;25(5):1–36. doi: 10.1117/1.JBO.25.5.050901

39. Bretler U, Shimron S, Bretler S, Yizhakov Y. Characterization and forensic identification of a novel cocaine charcoal smuggling matrix. *Forensic Science International.* 2022;330:111104. doi: 10.1016/j.forsciint.2021.111104 EDN: OFYGAU

40. Mistek-Morabito E, Lednev IK. Discrimination of menstrual and peripheral blood traces using attenuated total reflection Fourier transform-infrared (ATR FT-IR) spectroscopy and chemometrics for forensic purposes. *Analytical and Bioanalytical Chemistry.* 2021;413(9):2513–2522. doi: 10.1007/s00216-021-03206-w EDN: WJWXFG

41. Zhang K, Wang Q, Liu R, et al. Evaluating the effects of causes of death on postmortem interval estimation by ATR-FTIR spectroscopy. *International Journal of Legal Medicine.* 2019;134(2):565–574. doi: 10.1007/s00414-019-02042-z EDN: WZKWFS

42. Semeniuk AA. About how to produce search-forensic profile. *Forensics: yesterday, today, tomorrow.* 2018;4(8):164–167. EDN: YSJYFV

43. Aparna R, Shanti Iyer R. Tears and eyewear in forensic investigation — a review. *Forensic Science International.* 2020;306:110055. doi: 10.1016/j.forsciint.2019.110055 EDN: ZUSSKK

44. Sharma S, Chophi R, Jossan JK, Singh R. Detection of bloodstains using attenuated total reflectance-Fourier transform infrared spectroscopy supported with PCA and PCA–LDA. *Medicine, Science and The Law.* 2021;61(4):292–301. doi: 10.1177/00258024211010926 EDN: VWLHEA

45. Fujihara J, Nishimoto N, Yasuda T, Takeshita H. Discrimination between infant and adult bloodstains using micro-Raman spectroscopy: a preliminary study. *Journal of Forensic Sciences.* 2019;64(3):698–701. doi: 10.1111/1556-4029.13904 EDN: YAUHRA

46. Takamura A, Ozawa T. Recent advances of vibrational spectroscopy and chemometrics for forensic biological analysis. *The Analyst.* 2021;146(24):7431–7449. doi: 10.1039/d1an01637g EDN: XRXRTD

47. Wang P, Chen J, Wu X, et al. Determination of blood species using echelle Raman spectrometer and surface enhanced Raman spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022;281:121640. doi: 10.1016/j.saa.2022.121640 EDN: LSGNFP

48. Kumar R, Sharma K, Sharma V. Bloodstain age estimation through infrared spectroscopy and Chemometric models. *Science & Justice.* 2020;60(6):538–546. doi: 10.1016/j.scijus.2020.07.004 EDN: PZFMFK

49. Gautam R, Peoples D, Jansen K, et al. Feature selection and rapid characterization of bloodstains on different substrates. *Applied Spectroscopy.* 2020;74(10):1238–1251. doi: 10.1177/0003702820937776 EDN: SMHDBL

50. Zha S, Wei X, Fang R, et al. Estimation of the age of human semen stains by attenuated total reflection Fourier transform infrared spectroscopy: a preliminary study. *Forensic Sciences Research.* 2019;5(2):119–125. doi: 10.1080/20961790.2019.1642567

51. Wei X, Yu K, Wu D, et al. Species identification of semen stains by ATR-FTIR spectroscopy. *International Journal of Legal Medicine.* 2020;135(1):73–80. doi: 10.1007/s00414-020-02367-0 EDN: TIZHOE

52. Al-Hetlani E, Halámková L, Amin MO, Lednev IK. Differentiating smokers and nonsmokers based on Raman spectroscopy of oral fluid and advanced statistics for forensic applications. *Journal of Biophotonics.* 2019;13(3):e201960123. doi: 10.1002/jbio.201960123

53. Buchan E, Kelleher L, Clancy M, et al. Spectroscopic molecular-fingerprint profiling of saliva. *Analytica Chimica Acta.* 2021;1185:339074. doi: 10.1016/j.aca.2021.339074 EDN: HAYZON

54. Khalikov AA, Kuznetsov KO, Iskuzhina LR, Khalikova LV. Forensic aspects of sudden autopsy-negative cardiac death. *Forensic Medical Expertise.* 2021;64(3):59–63. doi: 10.17116/sudmed20216403159 EDN: FOBSBA

55. Lin H, Luo Y, Sun Q, et al. Determination of causes of death via spectrochemical analysis of forensic autopsies-based pulmonary edema fluid samples with deep learning algorithm. *Journal of Biophotonics.* 2020;13(4):e201960144. doi: 10.1002/jbio.201960144 EDN: KPZHMI

56. Denisova OP, Kul'bitskiĭ BN, Putintsev VA, et al. The peculiar features of anaphylactic shock in response to the administration of medicinal preparations encountered in the practical work of forensic medical expert-histologist. *Forensic Medical Expertise.* 2012;55(2):46–49. EDN: PEKDYD

57. Li W, Sun C, Li Z, et al. Anaphylactic deaths: a retrospective study of forensic autopsy cases from 2009 to 2019 in Shanghai, China. *Heliyon.* 2024;10(6):e28049. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28049 EDN: GCVUMZ

58. Simko LC, Culleiton AL. Uncommon causes of noncardiogenic pulmonary edema. *The Nurse Practitioner.* 2020;45(4):26–32. doi: 10.1097/01.npr.0000657300.99895.45 EDN: ZHYTIR

59. Dobbe L, Rahman R, Elmassry M, et al. Cardiogenic pulmonary edema. *The American Journal of The Medical Sciences.* 2019;358(6):389–397. doi: 10.1016/j.amjms.2019.09.011

60. Lin H, Luo Y, Wang L, et al. Identification of pulmonary edema in forensic autopsy cases of fatal anaphylactic shock using Fourier transform infrared microspectroscopy. *International Journal of Legal Medicine.* 2017;132(2):477–486. doi: 10.1007/s00414-017-1721-4 EDN: ZURHYQ

61. Pigolkin YuI, Shilova MA, Kil'dyushov EM, Gal'chikov YI. Forensic medical characteristic of the causes behind sudden death in the young subjects. *Forensic Medical Expertise.* 2016;59(5):4–9. doi: 10.17116/sudmed20165954-9 EDN: XEPZLV

62. Altaeva AZh, Galitskiĭ FA, Aĭdarkulov ASh. The updated techniques for the detection of diatomic plankters in the corpse after death by drowning. *Forensic Medical Expertise.* 2013;56(1):35–38. EDN: QAZNHX

63. Yang X, Wei X, Yu K, et al. Identification of myocardial fibrosis by ATR-FTIR spectroscopy combined with chemometrics. Spectrochimica *Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022;264:120238. doi: 10.1016/j.saa.2021.120238 EDN: UMOINB

64. Lin H, Wang Z, Luo Y, et al. Post-mortem evaluation of the pathological degree of myocardial infarction by Fourier transform infrared microspectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022;268:120630. doi: 10.1016/j.saa.2021.120630 EDN: UYHXLM

65. Tian T, Zhang J, Xiong L, et al. Evaluating subtle pathological changes in early myocardial ischemia using spectral histopathology. *Analytical Chemistry.* 2022;94(49):17112–17120. doi: 10.1021/acs.analchem.2c03368 EDN: JBIIBF

66. Yu W, Xiang Q, Hu Y, et al. An improved automated diatom detection method based on YOLOv5 framework and its preliminary study for taxonomy recognition in the forensic diatom test. *Frontiers in Microbiology.* 2022;13:963059. doi: 10.3389/fmicb.2022.963059 EDN: DIMESL

67. Tambuzzi S, Gentile G, Bailo P, et al. Use of cadaveric vitreous humor as an innovative substrate for diatoms research and forensic diagnosis of drowning. *International Journal of Legal Medicine.* 2022;136(6):1745–1754. doi: 10.1007/s00414-021-02759-w EDN: OXZEEN

68. Liu C, Cong B. Review and prospect of diagnosis of drowning deaths in water. *Fa Yi Xue Za Zhi.* 2022;38(1):3–13. doi: 10.12116/j.issn.1004-5619.2021.410625

69. Xiong H, Wang Q, Zhao M, et al. Drowning and postmortem immersion identification using attenuated total reflection-Fourier transform infrared spectroscopy. *Microchemical Journal.* 2021;167:106310. doi: 10.1016/j.microc.2021.106310 EDN: APIEIV

70. Khalikov AA, Saperovskaya VE, Sagidullin RKh. Differential diagnosis of death from hypothermia and suddenly appeared heart disease by micromorphological SIGNS. *Bashkortostan Medical Journal.* 2017;12(6):50–56. EDN: YTBTBO

71. Lin H, Guo X, Luo Y, et al. Postmortem diagnosis of fatal hypothermia by Fourier transform infrared spectroscopic analysis of edema fluid in formalin-fixed, paraffin-embedded lung tissues. *Journal of Forensic Sciences.* 2020;65(3):846–854. doi: 10.1111/1556-4029.14260

72. Lin H, Deng K, Zhang J, et al. Biochemical detection of fatal hypothermia and hyperthermia in affected rat hypothalamus tissues by Fourier transform infrared spectroscopy. *Bioscience Reports.* 2019;39(3):BSR20181633. doi: 10.1042/BSR20181633 EDN: MPIDVP

73. Lin H, Zou D, Luo Y, et al. Postmortem diagnosis of fatal hypothermia/hyperthermia by spectrochemical analysis of plasma. *Forensic Science, Medicine and Pathology.* 2019;15(3):332–341. doi: 10.1007/s12024-019-00111-8 EDN: PJHCUO

74. Rousseau G, Chao de la Barca JM, Rougé-Maillart C, et al. Preliminary Metabolomic profiling of the vitreous humor from hypothermia fatalities. *Journal of Proteome Research.* 2021;20(5):2390–2396. doi: 10.1021/acs.jproteome.0c00901 EDN: ZTZZVP
75. Girlescu N, Stoica B, Hunea I, et al. The vital role of thanatochemistry in the postmortem diagnostic of diabetic ketoacidosis — case report. *Diagnostics.* 2021;11(6):988. doi: 10.3390/diagnostics11060988 EDN: OEGCFY
76. Wu D, Luo YW, Zhang J, et al. Fourier-transform infrared microspectroscopy of pulmonary edema fluid for postmortem diagnosis of diabetic ketoacidosis. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2021;258:119882. doi: 10.1016/j.saa.2021.119882 EDN: XLYICS
77. Paolillo S, Marsico F, Prastaro M, et al. Diabetic cardiomyopathy. *Heart Failure Clinics.* 2019;15(3):341–347. doi: 10.1016/j.hfc.2019.02.003 EDN: BOFFTD
78. Lin H, Wang Z, Luo Y, et al. Investigation of early biochemical alterations in myocardia of the diabetic db/db mice by FTIR microspectroscopy combined with machine learning. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.* 2022;277:121263. doi: 10.1016/j.saa.2022.121263 EDN: ZLGREI
79. Lin H, Wang Z, Luo Y, et al. Non/mini-invasive monitoring of diabetes-induced myocardial damage by Fourier transform infrared spectroscopy: evidence from biofluids. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) / Molecular Basis of Disease.* 2022;1868(9):166445. doi: 10.1016/j.bbadis.2022.166445 EDN: CBRVVK

ОБ АВТОРАХ

*** Агнокова Камилла Беслановна;**
адрес: Россия, 350063, Краснодар, ул. Митрофана Седина, д. 4, к. Я;
ORCID: 0009-0006-3594-0328;
e-mail: formedkey@mail.ru

Шихабидов Агакерим Замилевич;
ORCID: 0000-0002-9257-2553;
eLibrary SPIN: 4699-4950;
e-mail: agakerim.shikhabidov@icloud.com

Шкода Ксения Денисовна;
ORCID: 0009-0004-7447-1080;
e-mail: shkodinkaaa@mail.ru

Кадырова Фатима Арсеновна;
ORCID: 0000-0002-3385-1894;
eLibrary SPIN: 9770-3342;
e-mail: kadyrova.fatima.01@mail.ru

Мугадова Минажат Адильевна;
ORCID: 0000-0003-0323-8076;
e-mail: mina.mugadova@mail.ru

Багирова Джамиля Руслановна;
ORCID: 0009-0001-9288-7002;
e-mail: Dzamilabagirova25@gmail.com

Темирова Махлиё Шухратбековна;
ORCID: 0009-0009-8563-9850;
e-mail: majatemirova7@gmail.com

Абуева Залина Арсланбековна;
ORCID: 0009-0006-5793-413X;
e-mail: Zali02@inbox.ru

Ибрагимова Имани Арбиевна;
ORCID: 0009-0009-4485-9443;
e-mail: madayeva.02@mail.ru

Гамзатова Апам Гаджимуратовна;
ORCID: 0009-0006-8569-1059;
e-mail: gamzatova0030@mail.ru

Махмудова Мариян Ахмедовна;
ORCID: 0009-0002-3154-9015;
e-mail: mariyan.makhmudova.23@bk.ru

Панченко Дарья Сергеевна;
ORCID: 0009-0005-8894-5133;
e-mail: panchenko-katalevskaya@mail.ru

Туразова Малика Рамзановна;
ORCID: 0009-0004-4816-3201;
e-mail: malika.turazova99@mail.ru

AUTHORS' INFO

*** Kamilla B. Agnokova;**
address: 4 Mitrofan Sedin st, unit Ya, Krasnodar, Russia, 350063;
ORCID: 0009-0006-3594-0328;
e-mail: formedkey@mail.ru

Agakerim Z. Shikhabidov;
ORCID: 0000-0002-9257-2553;
eLibrary SPIN: 4699-4950;
e-mail: agakerim.shikhabidov@icloud.com

Kseniya D. Shkoda;
ORCID: 0009-0004-7447-1080;
e-mail: shkodinkaaa@mail.ru

Fatima A. Kadyrova;
ORCID: 0000-0002-3385-1894;
eLibrary SPIN: 9770-3342;
e-mail: kadyrova.fatima.01@mail.ru

Minazhat A. Mugadova;
ORCID: 0000-0003-0323-8076;
e-mail: mina.mugadova@mail.ru

Dzhamilya R. Bagirova;
ORCID: 0009-0001-9288-7002;
e-mail: Dzamilabagirova25@gmail.com

Makhlie Sh. Temirova;
ORCID: 0009-0009-8563-9850;
e-mail: majatemirova7@gmail.com

Zalina A. Abueva;
ORCID: 0009-0006-5793-413X;
e-mail: Zali02@inbox.ru

Imani A. Ibragimova;
ORCID: 0009-0009-4485-9443;
e-mail: madayeva.02@mail.ru

Apam G. Gamzatova;
ORCID: 0009-0006-8569-1059;
e-mail: gamzatova0030@mail.ru

Mariyan A. Makhmudova;
ORCID: 0009-0002-3154-9015;
e-mail: mariyan.makhmudova.23@bk.ru

Darya S. Panchenko;
ORCID: 0009-0005-8894-5133;
e-mail: panchenko-katalevskaya@mail.ru

Malika R. Turazova;
ORCID: 0009-0004-4816-3201;
e-mail: malika.turazova99@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author