

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА,

доктора физико-математических наук, Зайцева Кирилла Игоревича
на диссертацию Фролова Олега Олеговича «Разработка способа анализа
спектров комбинационного рассеяния для применения в стоматологии»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

1. Актуальность темы

Актуальность диссертации обусловлена высокой социальной значимостью заболеваний пародонта и других патологий твердых тканей зубов, характеризующихся высокой распространённостью, хроническим течением и сложностью ранней диагностики. Распространенные клинические и рентгенологические методы диагностики пародонтита обладают рядом ограничений, связанных с недостаточной чувствительностью к ранним изменениям минерального и органического состава тканей, использованием ионизирующего излучения, а также зависимостью результатов от субъективных факторов. В этой связи особый интерес представляют оптические методы, в частности – спектроскопия комбинационного рассеяния, обеспечивающая высокую молекулярную специфичность, неинвазивность и возможность проведения исследований *in vivo*.

В то же время практическое применение спектроскопии комбинационного рассеяния в стоматологии сдерживается сложностью обработки спектров многокомпонентных объектов (включая биологические жидкости и ткани), наличием выраженного флуоресцентного фона и перекрытием спектральных линий. Это требует разработки специализированных алгоритмов предобработки, декомпозиции и интерпретации спектроскопических данных. Разработка и экспериментальная апробация способа анализа спектров комбинационного рассеяния, ориентированного на решение прикладных диагностических задач стоматологии и биомедицины, отвечает современным требованиям к медицинским информационным и интеллектуальным системам.

Ввиду отмеченного диссертация О.О. Фролова направлена на решение актуальной и социально значимой научно-технической задачи, представляющей интерес для развития методов неинвазивной диагностики стоматологических заболеваний и анализа биоматериалов медицинского назначения.

2. Структура и содержание

Диссертация изложена на 187 стр. и состоит из введения, пяти глав, списка сокращений, литературы (149 источников), 2 приложений. Она оформлена в соответствии

с ГОСТ Р 7.0.11–2011, содержит 76 рис. и 16 таблиц. Работа логически структурирована и написана понятным научным языком.

В первой главе проведен критический анализ современной литературы в области оптических методов анализа биоматериалов в стоматологии. Рассмотрены существующие способы диагностики заболеваний пародонта и оценки состояния твердых тканей зуба. Показаны ограничения традиционных методов, что позволило обосновать выбор спектроскопии комбинационного рассеяния в качестве базового метода исследования. *Во второй главе* систематизированы и проанализированы существующие методы обработки спектров комбинационного рассеяния, включая подходы к коррекции флуоресцентного фона, сглаживанию и декомпозиции спектров. Сформулированы цель и задачи диссертации, а также подходы к совершенствованию методов обработки данных спектроскопии комбинационного рассеяния. *В третьей главе* изложены теоретические основы и практическая реализация оригинального итеративного алгоритма декомпозиции спектров комбинационного рассеяния. Проанализировано влияние на декомпозицию спектров комбинационного рассеяния. Оценена точность восстановления параметров спектральных компонент. *В четвертой главе* разработанный метод анализа данных спектроскопии комбинационного рассеяния применен для анализа дентинных материалов, включая оценку степени деминерализации, отбор информативных спектральных признаков и построение классификационных моделей. *В пятой главе* рассмотрено использование спектроскопии комбинационного рассеяния и разработанного способа анализа для диагностики пародонтита и оценки изменений твердых тканей зубов и костной ткани в процессе лечения. *В заключении* сформулированы выводы и основные результаты диссертации, даны рекомендации по их практическому использованию.

Автореферат в необходимой степени отражает содержание диссертации. Название и текст диссертации соответствуют:

- п. 14 «Методы, модели и алгоритмы, включая распознавание образов, для медицинских информационных и интеллектуальных систем, обеспечивающих повышение эффективности медико-биологических исследований и врачебных решений»,
- п. 21 «Методы и средства искусственного интеллекта для медико-биологических исследований»,
- п. 22 «Специальное программное обеспечение, предназначенное для профилактики, диагностики, лечения и медицинской реабилитации заболеваний, мониторинга состояния организма человека и проведения медицинских исследований»

паспорта специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

Диссертация является целостным и завершенным научным исследованием.

3. Новизна научных положений, выводов и рекомендаций

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

- Впервые предложен итеративный алгоритм декомпозиции спектров комбинационного рассеяния биоматериалов, реализующий автоматизированный подбор параметров спектральных линий при их взаимном перекрытии до 75 %. Алгоритм обеспечивает точность определения положений центров линий не хуже $0,1 \text{ см}^{-1}$ и относительную погрешность оценки амплитуд и ширины $\leq 0,3 \%$ при уровне детерминации модели $R^2 \geq 0,995$.
- Разработан способ оценки степени деминерализации дентинных материалов, основанный на анализе информативных спектральных признаков комбинационного рассеяния в диапазоне $630\text{--}1450 \text{ см}^{-1}$ с применением логистической регрессии для вероятностной классификации образцов, обеспечивающий точность ROC AUC 1,0 (0,99–1,0, 95 % ДИ) при определении факта деминерализации.
- Предложен способ экспресс-диагностики пародонтита, основанный на комплексной обработке спектров комбинационного рассеяния эмали и костной ткани с применением логистической регрессии, позволяющий диагностировать признаки заболевания с показателями ROC AUC 0,94 (0,89–0,98, 0,95 ДИ) для эмали и ROC AUC 0,88 (0,78–0,96, 0,95 ДИ) для костной ткани.

Таким образом, новизна диссертации связана одновременно с:

- новизной методов (разработанные методы обработки и анализа данных спектроскопии комбинационного рассеяния),
- новизной результатов (полученные данные о спектрах комбинационного рассеяния тканей в нормальном состоянии и при наличии патологии, а также результаты оценки возможности их дифференциации по наблюдаемым спектрам).

4. Обоснованность и достоверность положений, выводов и рекомендаций

Достоверность сформулированных научных положений и выводов определяется строгим соблюдением методологии научного исследования и комплексным использованием экспериментальных и вычислительных методов. Все этапы обработки спектральных данных, включая предобработку, коррекцию базовой линии, декомпозицию и последующий анализ признаков, реализованы на основе формализованных алгоритмов и

подтверждены количественными метриками качества, такими как R^2 , ROC AUC, чувствительность и специфичность.

Достоверность полученных результатов обеспечена статистической обработкой экспериментальных данных, применением методов перекрестной валидации, анализом доверительных интервалов, а также публикацией основных результатов в рецензируемых научных изданиях и их апробацией на профильных научных конференциях и в клинической практике.

По теме диссертации соискателем опубликовано 7 научных работ в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и/или рецензируемых базой данных Scopus и Web of Science, в том числе – в качестве первого (или corresponding) автора. Среди работ по диссертации отмечу 2 статьи в высокорейтинговом журнале *Diagnostics* (Impact Factor: 2.2). Уровень представления и апробации результатов более чем достаточный для кандидатской диссертации.

5. Замечания

По диссертации имеется несколько замечаний / вопросов.

- 1) Разработанные в диссертации методы обработки и анализа спектров комбинационного рассеяния применялись для обработки данных одной экспериментальной системы или нескольких? Требуется ли калибровка спектрального разрешения и чувствительности, аппаратной функции прибора при переходе с одной системы на другую, например, при разложении спектров по базису функций Лоренца (физический контур линии), свернутых с функцией Гаусса (учитывает аппаратную функцию)?
- 2) Для повышения эффективности разделения в качестве методов предобработки сигналов использовались, в частности, методы вейвлетного анализа. С учетом многообразия вейвлетных базисов, при рассмотрении конкретного приложения обычно сперва выбирают «оптимальный» базис, обеспечивающий наиболее емкое вейвлетное разложение спектра и, соответственно, повышающий разделимость пиков, эффективность фильтрации шума или сжатия данных (в вейвлетном спектре) [*Optics Express* **18**, 1177 (2010), DOI: 10.1364/OE.18.001177; *Proceedings SPIE* **9216**, 921611 (2014), DOI: 10.1117/12.2061276; *Journal of Biomedical Optics* **23**, 091406 (2018), DOI: 10.1117/1.JBO.23.9.091406]. Для этого есть более-менее общепринятые критерии. Выполнялась ли подобная процедура в диссертации? Если выполнялась, то какой базис оказался оптимальным?

- 3) Анализировалась ли природа различий, наблюдаемых на КР спектрах тканей в норме и при патологии (демнерализации, пародонтите и др.)? Можно ли связать выявленные различия только с составом тканей, или же важны структурны измерения. Последние наблюдаются при демнерализации и способны оказать влияние на поглощение / перенос оптического излучения (накачки или рассеянных компонент) тканями и, соответственно, на интенсивность пиков в спектрах комбинационного рассеяния.
- 4) Соискатель рассмотрел большое количество уже существующих и только появляющихся оптических методов диагностики в стоматологии. Однако он не упомянул ТГц импульсную спектроскопию, визуализацию и времяпролетную томографию, которые также рассматривались в качестве инструментов решения диагностических проблем стоматологии и смежных областей [*Journal of Biomedical Optics* **16**, 026001 (2011), DOI: 10.1117/1.3540277; *Biomedical Optics Express* **4**, 1413 (2013), DOI: 10.1364/BOE.4.001413; *Optics Express* **30**, 13134 (2022), DOI: 10.1364/OE.452769; *Physical Review Applied* **19**, 034033 (2023), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.19.034033]. Тем не менее стоит отметить, что ТГц методы по-прежнему далеки от клинической практики по ряду причин.
- 5) С учетом объема диссертации стоило укрупнить главы. Например, первую и вторую главы, носящие обзорный характер, можно было объединить в одну, на основе которой выбирается решаемая проблема, формулируются цель и задачи работы.
- 6) И в диссертации, и в автореферате аббревиатуры нужно вводить при первом появлении в тексте и далее использовать по всему тексту, что не всегда строго соблюдается соискателем. На стр. 3 автореферата аббревиатура ROC AUC (площадь под кривой ошибок) вводится, но не расшифровывается.

Однако эти замечания не снижают научно-практическую ценность представленных результатов и общей положительной оценки диссертации.

6. Заключение

Диссертация О.О. Фролова «Разработка способа анализа спектров комбинационного рассеяния для применения в стоматологии» является научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, обладающей научной новизной и практической значимостью. Полученные соискателем результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Автореферат соответствует тексту диссертации.

Диссертация соответствует пп. 14, 21 и 22 области исследования паспорта специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения» и удовлетворяет всем критериям, предъявляемым к кандидатской диссертации «Положением о присуждении ученых степеней» (в частности, п. 9), утвержденным постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842.

Автор диссертации – Фролов Олег Олегович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.12 «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

Официальный оппонент:

Зайцев Кирилл Игоревич,

доктор физико-математических наук (специальность 1.3.6 – Оптика),

ведущий научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Федерального исследовательского центра

«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»

(ИОФ РАН),

119991, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38

тел.: +7 903 244 41 26

e-mail: kirzay@gmail.com

10 февраля 2026 года

/ Зайцев Кирилл Игоревич /

Подпись д.ф.-м.н., в.н.с. ИОФ РАН К.И. Зайцева удостоверяю.

Глушков Владимир Витальевич,

заместитель директора по научно-организационной работе,

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН,

доктор физико-математических наук,

E-mail: glushkov@lt.gpi.ru



Глушков Владимир Витальевич /