

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Дунаева Андрея Валерьевича
о диссертационной работе Давыдова Дениса Андреевича
«Анализ содержания и пространственной локализации воды и липидов в
коже методом спектроскопии диффузного отражения с пространственным
разрешением», представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа Д.А. Давыдова посвящена разработке и экспериментальному обоснованию метода определения содержания воды и липидов в коже человека с использованием спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением в ближнем инфракрасном диапазоне. Исследование направлено на решение актуальной задачи биомедицинской фотоники – создание неинвазивных методов количественной оценки структурных компонентов и молекулярного состава кожи. Актуальность темы обусловлена растущей потребностью в экспресс-диагностических технологиях, обеспечивающих получение достоверной информации о состоянии тканей без инвазивного вмешательства. Научная новизна работы заключается в разработке подходов для определения параметров слоистых рассеивающих и поглощающих структур на основе данных диффузного рассеяния света.

Диссертация имеет логичную структуру и состоит из введения, четырёх глав и заключения. Работа занимает 145 страниц, включает 33 иллюстрации и 5 таблиц, а также список литературы из 94 источников.

Во **введении** отражены ключевые аспекты исследования: обоснована актуальность, сформулированы цель, задачи, научная новизна и практическая значимость. Указаны основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях соискателя.

Первая глава содержит обзор современной научной литературы, посвящённой методам оценки содержания воды и липидов в коже и биотканях. Автором проведён анализ литературных данных о составе и строении кожи. Также проведен сравнительный анализ методов неинвазивного определения содержания воды и липидов в коже и обоснован выбор используемого метода как основного – спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением.

Во **второй главе** подробно рассмотрен подход к определению содержания воды по спектрам диффузного отражения в ближнем ИК-диапазоне. В работе была оценена возможность определения содержания белков и липидов в коже по поглощению в ближнем ИК-диапазоне. Показано, что амплитуда полосы поглощения С-Н для липидов в 4 раза больше по сравнению с амплитудой полосы поглощения коллагена при одинаковой массовой концентрации данных молекул в связи с большим числом С-Н связей в случае липидов. Поэтому детектирование амплитуды поглощения белков в коже с учетом массовой концентрации данных молекул в ней методом спектроскопии диффузного отражения возможно только при расстоянии между источ-

ником и детектором на порядок, превышающим толщину слоя липидов. Было проведено экспериментальное сравнение методов спектроскопии диффузного отражения, спектроскопии комбинационного рассеяния и мультиспектральной визуализации для определения содержания воды в коже при модельных воздействиях, индуцирующих отек кожи. По результатам экспериментов можно сделать вывод, что каждый из апробированных методов позволяет измерять динамику содержания воды при отеке кожи и дает похожую кинетику гидратации. При этом обнаружено, что изменения эффективной оптической плотности вблизи локального максимума 970 нм связаны не только с изменением содержания воды в дерме, но и с изменением толщины дермы.

Третья глава посвящена разработке модели кожи, описывающей ее оптические свойства. На основе численного моделирования методом Монте-Карло была построена двухслойная модель кожи, состоящая из дермы и гиподермы. Автором была решена прямая задача, то есть по заданным концентрациям хромофоров и толщины каждого слоя был проведен расчет спектров диффузного отражения в спектральном диапазоне 850-1100 нм для расстояний между источником и детектором от 0 до 10 мм. По рассчитанным спектрам диффузного отражения для модельных двухслойных структур были построены модели линейной регрессии для определения толщины дермы и гиподермы. Была оценена точность данных моделей на данных моделирования, а также экспериментально *in vivo* на выборке добровольцев, где в качестве опорного метода было использовано ультразвуковое зондирование.

В четвёртой главе показаны возможности практического применения разработанного метода в биомедицинских исследованиях. Обнаружена устойчивая корреляция между изменениями уровня гидратации кожи, измеренная с помощью спектроскопии диффузного отражения и изменениями общего уровня гидратации организма. Также в главе 4 была исследована задача по оценке состава тела человека. В качестве референсного метода использовался мультиспектральный биоимпедансный анализ тела, который по измеренному электрическому импедансу тканей в радиочастотном диапазоне позволяет оценить состав тела. Была разработана модель, которая по данным спектроскопии диффузного отражения определяет общее содержание липидов и безжировой массы организма человека.

В заключении представлены основные итоги проведённого исследования, обобщены его ключевые выводы и обозначены направления дальнейшего развития разработанного подхода в сфере биомедицинской диагностики.

Диссертационная работа отличается высоким качеством научного исследования. Результаты, полученные в ходе работы, были успешно апробированы – они опубликованы в профильных изданиях, включая журналы с высоким рейтингом, и представлены на специализированных научных конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- все полученные в ходе исследования результаты имеют чёткую внутреннюю логику, последовательно изложены и сопровождаются количественными оценками, что свидетельствует о высокой степени проработки и досто-

верности представленных данных;

- разработанные автором модели определения содержания воды и липидов, а также толщин кожных слоёв не только имеют теоретическое обоснование, но и подтверждены результатами экспериментальных исследований *in vivo*, что придаёт работе прикладной характер и подтверждает практическую реализуемость предложенного подхода;

- работа отличается высокой методической проработкой: каждая экспериментальная и теоретическая часть сопровождается подробным анализом погрешностей и оценкой точности, что повышает доверие к представленным результатам.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- 1) В разделе, описывающем эксперименты *in vivo*, не приведены сведения о фототипе кожи добровольцев. С учётом того, что оптические свойства кожи зависят от содержания меланина и, соответственно, потенциально могут влиять на спектры диффузного отражения, было бы полезно кратко охарактеризовать исследуемую выборку и отметить возможное влияние цвета кожи на точность получаемых результатов.

- 2) В главе 4 измерялись относительные изменения содержания воды в коже на основе амплитуды локального максимума поглощения около 970 нм. При этом не рассмотрен вопрос измерения абсолютной концентрации воды. Следует уточнить, возможно ли оценивать абсолютное содержание воды в рамках проведённых экспериментов и какие ограничения или дополнительные методы могут для этого потребоваться.

- 3) В главе 4 рассматривается изменение содержания воды в коже при физических и тепловых нагрузках, при этом для количественной оценки используется амплитуда локального максимума поглощения воды вблизи 970 нм. Следует отметить, что положение и форма локального максимума поглощения воды зависят от температуры. Автору следовало оценить возможные изменения, связанные с этим, и сопоставить их с результатами, полученными в эксперименте.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация написана на весьма высоком уровне и заслуживает положительной оценки.

Общее впечатление о диссертационной работе Д.А. Давыдова положительное. Считаю, что диссертация «Анализ содержания и пространственной локализации воды и липидов в коже методом спектроскопии диффузного отражения с пространственным разрешением» соответствует специальности 1.3.6. Оптика (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной

степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Давыдов Денис Андреевич — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

Дунаев Андрей Валерьевич,
доктор технических наук, доцент

Место работы и должность:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Научно-технологический центр биомедицинской фотоники, ведущий научный сотрудник

_____ А.В. Дунаев
« 6 » ноября 2025 года

Адрес места работы:

302020, г. Орёл, Наугорское шоссе, д. 29 (корпус № 11)
Телефон: +7 (4862) 41-98-06
E-mail: dunaev@bmecenter.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

05.11.17 — «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

«Подпись Дунаева Андрея Валерьевича заверяю»:

И.о. проректора по научной работе и
международной деятельности
ФГБОУ ВО «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»

_____ С.Ю. Радченко

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева»

Телефон: +7 (4862) 75-13-18

E-mail: info@oreluniver.ru