

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

кандидата физико-математических наук Турчина Ильи Викторовича
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 спектроскопии диффузного отражения (СДО) с пространственным разрешением в ближнем инфракрасном диапазоне для определения содержания воды и липидов в коже человека. Актуальность исследования обусловлена потребностью в развитии неинвазивных методов оценки содержания основных структурных компонентов кожи для решения биомедицинских задач, таких как диагностика обезвоживания и мониторинг лечения отеочного синдрома, оценка индекса массы тела и др. Научная новизна работы заключается в разработке подходов по определению содержания хромофоров в коже, являющейся неоднородно рассеивающей и поглощающей средой с неравномерным распределением хромофоров по глубине.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Объём диссертации составляет 145 страниц и включает в себя 33 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 94 библиографические ссылки.

Во **введении** приведены общие сведения о диссертационной работе, такие как актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, выносимые на защиту положения, а также информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава содержит обзор литературы, посвященный определению содержанию воды и липидов в задачах биомедицинской диагностики. Приведен подробный сравнительный анализ методов спектроскопии для неинвазивного определения воды и липидов в коже. Также приведено теоретическое описание распространения света в биоткани и метода Монте-Карло, который автор диссертации использовал для построения модели, описывающей оптические свойства кожи в оригинальной части работы. На основе литературных данных были проведены оценки молекулярного состава кожи и приведено обоснование выбора используемого метода и модели кожи, описывающей ее оптические свойства.

Во **второй главе** исследуется возможность определения содержания воды в коже на основе анализа открытой базы данных Национального

института стандартов и технологий, в которой содержатся спектры диффузного отражения в диапазоне 250-2500 нм. Был определен оптимальный спектральный диапазон, который позволяет определять содержание воды в глубоких слоях кожи. Также исследована возможность измерения содержания воды в коже с использованием локального максимума поглощения воды в области 970 нм на оптических фантомах кожи, а также на коже *in vivo*. Проведен сравнительный анализ СДО при использовании различных пиков поглощения воды и расстояний источник-детектор с другими оптическими методами – спектроскопией комбинационного рассеяния и мультиспектральной визуализацией при моделировании отека в коже.

В третьей главе автором продемонстрировано решение прямой задачи распространения света в коже с помощью метода Монте-Карло. На основе данных моделирования была построена модель кожи, описывающая ее оптические свойства. На основе решения прямой задачи автором была решена обратная задача, а именно по спектрам диффузного отражения в ближнем инфракрасном диапазоне были определены параметры слоев кожи. Таким образом, на данных моделирования были построены модели линейной регрессии для определения толщин слоев кожи — дермы и гиподермы. Верификация построенных моделей была проведена экспериментально при измерении кожи добровольцев *in vivo*, при этом УЗИ использовалось в качестве референсного метода. Автором экспериментально установлено, что спектроскопия диффузного отражения с пространственным разрешением при использовании локальных максимумов поглощения воды и липидов в области 970 и 930 нм позволяет определять содержание воды в коже, а также толщину дермы и гиподермы.

В четвертной главе рассматриваются биомедицинские приложения разрабатываемого метода. Автором была исследована динамика изменения содержания воды в коже на добровольцах при физических и тепловых нагрузках, а также на пациентах с отеком синдромом, принимающих диуретическую терапию. Была установлена корреляция между изменениями общего уровня воды в организме и изменениями содержания воды в коже. Также в данной главе была разработана модель линейной регрессии, с помощью которой по величине локальных максимумов поглощения воды (970 нм) и липидов (930 нм) в спектрах диффузного отражения определяется общее содержание липидов и безжировой массы организма человека.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы, библиографический список опубликованных работ автора по теме диссертации и общий список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих

исследовательской области научных журналах, в том числе высокорейтинговых, и докладами на конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Разработаны новые модели определения содержания воды и липидов, а также толщин дермы и гиподермы по спектрам диффузного отражения, основанные на данных моделирования методом Монте-Карло и методах машинного обучения;
- Проведено всестороннее исследование точности СДО для определения содержания воды и липидов в коже при использовании различных пиков поглощения и расстояний источник-детектор с учетом пространственной неоднородности кожи и присутствия в тканях других хромофоров;
- Показана возможность использования разработанного метода для оценки общего уровня гидратации организма и состава тела, что открывает перспективы его внедрения в клиническую практику и спортивную медицину.
- Экспериментальные данные подтверждаются результатами численного моделирования и референсных методов. Дополнительную уверенность в их достоверности обеспечивает анализ значительной исследуемой выборки. Поэтому представленные результаты обладают высокой степенью согласованности и статистической надежностью.

•

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- В разделе 2.5.2, п. (3) на с. 68, указано, что концентрация окси- и дезоксигемоглобина оценивалась по характерным пикам в области 560 нм, а затем вычиталась для учета вклада гемоглобина. Однако автор более нигде не ссылается на эту процедуру, а величина $\Delta OD(970,850)$, рассчитанная по формуле (2.3), уже учитывает вклад гемоглобина. Необходимо прояснить, как именно использовались измерения на 560 нм и использовались ли они вообще в данной работе.
- В разделе 3.1.4 на с. 92 сказано, что «Коэффициенты рассеяния всех слоев были фиксированными, чтобы сократить время моделирования». Однако далее после формулы (3.3) говорится о том, что «каждое нормированное значение коэффициента поглощения и рассеяния распределялось равномерно и варьировалось от 0 до 1». В связи с этим возникает вопрос – проводилась ли вариация спектров рассеяния слоев? И, если нет,

то есть ли какие-то предположения о том, как эта вариация может сказаться на точности определения концентрации воды и толщин слоев дермы и гиподермы?

- В разделе 3.1.1. описывается экспериментальная установка для измерения спектров диффузного рассеяния с пространственным разрешением, однако схема сканера недостаточно описана. Поскольку в данной системе применяется механическое сканирование оптоволоконном по поверхности кожи, полезно было бы уточнить, как именно осуществлялся оптический и механический контакт с кожей у сканирующего оптоволоконна.
- Последнее предложение на с. 72: «Функция плотности вероятности детектирования фотонов для всех конфигураций оценивалась как произведение плотности потока фотонов, приходящих из области источника, на плотность потока фотонов, приходящих в область детектора». Поскольку в СДО все фотоны, оказавшиеся в детекторе, были выпущены источником, есть основание полагать, что первый множитель в этом произведении лишний.
- В тексте присутствуют опечатки, неверные ссылки на формулы и рисунки. Например, с. 46, раздел 1.12, в скобках 2 раза слово «массовая»; в подписи к рисунку 7 – неверные ссылки на графики (Б) и (В); с. 82, 6 строка – неверная ссылка на рисунок 18; с. 96, 3 строка неверная ссылка на формулу.

Указанные замечания призваны помочь автору в будущем излагать материал более доступно и не являются критическими по отношению к проведённым исследованиям. Соискатель получил большое количество важных и принципиально новых результатов, поэтому диссертация заслуживает высокой 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:

Турчин Илья Викторович

кандидат физико-математических наук

Место работы и должность:

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук»,
отдел радиофизических методов в медицине, заведующий отделом

_____ И.В. Турчин

« 12 » ноября 2025 года

Адрес места работы:

603950, г. Нижний Новгород, БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46

Телефон: +7 (831) 436-80-10

E-mail: ilya@ipfran.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена кандидатская диссертация:

01.04.03 — «Радиофизика»

«Подпись Турчина Ильи Викторовича ЗАВЕРЯЮ»:

Учёный секретарь ИПФ РАН,
кандидат физико-математических наук

Корюкин Игорь Валерьевич

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова–Грехова Российской академии наук»

Телефон: +7 (831) 436-62-02;

E-mail: dir@ipfran.ru