

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Шерстнева Евгения Павловича
«Метод реконструкции распределения коэффициента ослабления
в оптической когерентной томографии», представленной на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Диссертация Е.П. Шерстнева посвящена разработке новых методов обработки сигналов и решения обратной задачи (оценкой локального коэффициента экстинкции (ослабления) сигнала) в оптической когерентной томографии (ОКТ). С одной стороны, оценка локальных коэффициента ослабления среды позволяет строить изображение однородно рассеивающей среды однородным образом. С другой, локальный коэффициент экстинкции является одной из важнейших физических характеристик образца, извлекаемых из сигнала ОКТ для диагностических приложений. Следовательно, точность его определения напрямую влияет на эффективность (чувствительность, специфичность и точность) дифференциации тканей в норме и при наличии патологии в активно развивающихся диагностических приложениях ОКТ. Именно поэтому целью диссертации стала разработка метода вычисления локальных значений коэффициента ослабления, устойчивого к вызывающим искажение расчета факторам. Среди этих факторов отдельно рассматривается изменение сигнала с глубиной, вызванное спектральным способом регистрации сигнала. Также в работе исследуется возможность оценки изменения коэффициента ослабления среды при ее продольной деформации для дифференциации тканей с различными упругими свойствами.

Актуальность диссертации обусловлена бурным развитием систем и методов ОКТ в последние десятилетия, включая их применения для визуализации биологических тканей и диагностики различных социально значимых заболеваний (включая злокачественные новообразования различной нозологии и локализации). Визуализация сред с помощью оценки локальных значений коэффициента ослабления может существенным образом упростить интерпретацию изображений ОКТ конечным пользователем. Количественная оценка изменения коэффициента ослабления сред при их продольной деформации может стать дополнительным инструментом для различения здоровых и патологических тканей. Важно отметить, что подобная оценка отмеченных физических характеристик объекта по наблюдаемым сигналам ОКТ позволяет (до некоторой степени) исключить из анализа аппаратную функцию прибора и проводить сравнения результатов, полученных различными ОКТ системами. Подобная стандартизация измерений методом ОКТ является важной проблемой, препятствующий трансляции ОКТ систем в клинику.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, списков публикаций автора по тематике исследования и цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации, приведены основные положения, выносимые на защиту. Отмечена научная новизна и практическая ценность выполненной работы, сведения об апробации результатов исследования, краткое содержание диссертации и формулировка личного вклада автора в работу.

В первой главе приведен обзор современной литературы по тематике исследования. Освещены существующие подходы к оценке коэффициента ослабления, а

также методы оценки упругих свойств исследуемых сред по сигналам ОКТ. Сформулированы проблемы, решению которых посвящена диссертация.

Вторая глава посвящена оценке влияния параметров спектрометра на ослабление сигнала ОКТ с глубиной. Рассмотрен спектральный ОКТ на основе комбинированного дисперсионного элемента, фокусирующей системы и регистрирующего устройства. Комбинированный дисперсионный элемент состоит из дифракционной решетки и дополнительного призмного элемента, корректирующего неэквидистантность регистрации спектральных компонент. В дополнение к общепринятой модели затухания сигнала ОКТ для рассматриваемой системы предложено учитывать влияние собственного спектрального разрешения дифракционной решетки и изменения величины дисперсии спектрометра из-за использования призмного корректора. Предложена уточненная модель ослабления сигнала с учетом перечисленных факторов. Сравнение ее предсказаний с экспериментальными данными и общепринятым подходом показало высокую эффективность предложенной модели. Новая модель устранила существенное расхождение между экспериментальными данными и общепринятым подходом. Достоверность предложенного описания подтверждается совпадением теоретического предсказания с экспериментальными данными.

В третьей главе разрабатывается метод оценки локального коэффициента ослабления объекта. В качестве основы выступает известный метод вычисления распределения коэффициента ослабления в приближении однократного рассеяния. Он имеет ряд недостатков, включая неустойчивости к шумам и аппаратно-обусловленному изменению сигнала ОКТ системы с глубиной. Влияние этих факторов на оценку коэффициента ослабления изучено путем численного моделирования. Наличие шума приводит к возникновению растущей с глубиной ошибки оценки, а также заниженной оценке с ростом глубины. При исследовании влияния на расчет аппаратного изменения сигнала с глубиной в численном моделировании учитывалось влияние спектрального способа регистрации сигнала и конфокального фактора. Для сред с коэффициентами ослабления $1\text{--}6\text{ мм}^{-1}$ наличие аппаратного изменения сигнала приводит к значительному отклонению оценки коэффициента ослабления от истинного значения при существенном влиянии конфокального фактора. Предложен метод восстановления локальных значений коэффициента ослабления, основанный на применении фильтра Винера к первичной оценке коэффициента ослабления в условиях шумов и аппаратного изменения сигнала. Работоспособность предложенного подхода продемонстрирована на примере численного моделирования и зарегистрированных изображений реальных сред.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по изменению коэффициента ослабления ряда модельных и биологических сред при их продольном сжатии. Описаны эксперименты в двух конфигурациях, отличающихся способом контроля величины деформирующего воздействия и способом усреднения данных. Для обеих конфигураций эксперимента приведена зависимость коэффициента ослабления от прикладываемого давления. Для оценки величины изменения коэффициента ослабления введен параметр наклона линейной функции, который соотносится с независимыми измерениями твердости по Шору. Предложен способ дифференциации сред, основанный на сравнении двух параметров, оцениваемых по данным ОКТ, а именно: коэффициента ослабления и параметра наклона линейной аппроксимации. Предложенный подход позволяет дифференцировать среды с различной твердостью по Шору. Достоверность полученного результата следует из проведенной экспериментальной работы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертация представляет собой законченную работу, в которой получены результаты, имеющие значение как в теоретическом, так и в практическом плане. Все представленные результаты являются достоверными и обоснованными. Теоретические исследования и численные расчеты проведены с применением известных, проверенных ранее подходов и методов. Полученные аналитические и численные результаты хорошо согласуются между собой. Физическая трактовка полученных результатов находится в согласии с общепризнанными представлениями.

Все приведенные в диссертации результаты получены либо лично диссертантом, либо при его непосредственном участии. Соискателем выполнены все представленные в работе численные расчёты и реализованы алгоритмы разработанных подходов. Численные расчёты выполнялись на основе оригинальных программ, созданных автором самостоятельно. Постановка экспериментов, описанных в диссертации, осуществлялась соискателем.

Диссертация написана ясным, четким языком, содержит большое число иллюстраций, делающих изложение полученных результатов достаточно наглядным. Тем не менее можно выделить ряд **замечаний / вопросов**:

1. Коэффициент ослабления (экстинкции) вводится для описания переноса излучения в неоднородной среде далеко не во всех случаях. При переходе с режима рассеяния Рэлея на Ми (при переходе от суб-волновых к мезамасштабным рассеивателям) или при сильном поглощении излучения матрицей (например, в случае работы с пигментированными тканями), экспоненциального затухания может не наблюдаться, а удельный коэффициент рассеяния теряет физический смысл [*Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **205**, 241 (2018), DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.10.014; *Physical Review Applied* **20**, 054050 (2023), DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.054050]. Эти известные ограничения снижают общность предложенного метода, поэтому их стоило бы упомянуть в диссертации. Не может ли этот фактор влиять на наблюдаемые отклонения кривой затухания от общепринятой расчетной модели?
2. Решаемая задача оценки коэффициента ослабления схожа с лидарными обратными задачами рассеяния. В таких задачах для повышения устойчивости решения к различным факторам (включая шумы) зачастую вместо фильтра Винера используются регуляризационные подходы Тихонова [А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач (Москва: Наука, 1979); *Measurement Techniques* **48**, 946 (2005), DOI: 10.1007/s11018-006-0002-2] или альтернативные, производные от тихоновского и задающие дополнительные требования к решению (например, к его гладкости). Почему в диссертации выбран именно фильтр Винера? Планируется ли рассмотреть альтернативные подходы?
3. Устойчивость решения к шумам оценивалась путем численного моделирования и вполне наглядно показана для нескольких сигналов (набора профилей коэффициента экстинкции) и различных реализаций шума. Тем не менее, такая форма представления не дает возможности понять область устойчивости решения. Стоило бы показать зависимости точности оценки от уровня шума для разных значений коэффициента экстинкции, глубин, толщин слоев и др. факторов.
4. Анализировались ли спеклы в ОКТ изображениях как шумы или как компонента сигнала (удаляемого из него для дальнейшей обработки кривой затухания [*Journal*

of *Biomedical Optics* **23**, 091406 (2018), DOI: 10.1117/1.JBO.23.9.091406])? В отличие от модельного шума спеклы зависят от аппаратной функции прибора, несут полезную информацию об объекте [*Scientific Reports* **14**, 10722 (2024), DOI: 10.1038/s41598-024-61292-z] и могут влиять на точность оценки коэффициента ослабления. Как спеклы учитывались в обработке?

5. Диссертация и автореферат содержат незначительные опечатки. Например, на странице 10 автореферата: «В пространстве глубины это выражение представляет собой произведение фурье образов трех функция в пространстве глубины: ...».

Отмеченные замечания не снижают высокую общую оценку диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, из них 5 статей – в рецензируемых журналах, индексируемых в международных наукометрических базах Web of Science и Scopus, 4 публикации – в трудах и тезисах конференций. Работа представлялась на профильных научных конференциях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертация Е.П. Шерстнева «Метод реконструкции распределения коэффициента ослабления в оптической когерентной томографии» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 25.01.2024 г.), а ее автор – Шерстнев Евгений Павлович – несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика.

Выражаю согласие на обработку диссертационным советом моих персональных данных, связанных с защитой данной диссертации.

Официальный оппонент:

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)

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

Тел.: +7 903 244 41 26,

E-mail: kirzay@gmail.com

11 ноября 2025 года

Зайцев Кирилл Игоревич

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

Заместитель директора по научно-организационной работе,
ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН
д.ф.-м.н., проф.



— Глушков Владимир Витальевич