

ОТЗЫВ

официального оппонента **Дрёмина Виктора Владимировича**, доктора физико-математических наук, старшего научного сотрудника научно-технологического центра биомедицинской фотоники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» на диссертационную работу **Суркова Юрия Игоревича «Развитие методов лазерной спекл-визуализации и оптической когерентной томографии для исследования кровотока и тканевой диффузии»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика

Общая характеристика и актуальность работы

Диссертация Суркова Юрия Игоревича посвящена развитию методов лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) и оптической когерентной томографии (ОКТ) для исследования кровотока и тканевой диффузии. Работа выполнена на стыке биофотоники, физики динамического рассеяния света, количественной оптической визуализации и цифровой обработки сигналов. Такая междисциплинарная постановка полностью соответствует современному направлению развития биомедицинской фотоники, в котором повышение информативности измерений достигается не только совершенствованием аппаратуры, но и извлечением дополнительных биофизических параметров из первичных данных.

Широкопольная ЛСКВ обеспечивает высокую скорость и удобство мониторинга, однако при одноэкспозиционной регистрации спекл-контраст одновременно зависит от динамики рассеивателей, доли статического света, глубины залегания сосуда и оптического ослабления. В реальном биологическом объекте эти факторы могут изменяться совместно. Например, оптическое просветление увеличивает вклад глубинных фотонов и улучшает видимость сосудов, но одновременно меняет саму передаточную функцию ткани. Поэтому функциональная карта без независимой информации об оптических свойствах образца может быть истолкована неверно.

Актуальность диссертации определяется попыткой решить указанную проблему на уровне всего измерительного контура. В спекл-канале автор анализирует исходную последовательность и разделяет квазистатический и динамический вклады, по данным ОКТ восстанавливает изменение коэффициента рассеяния по глубине и времени, в вычислительном эксперименте независимо варьирует скорость, глубину залегания сосуда и коэффициент экстинкции. Это придает работе целостность и отличает ее от исследований, ограниченных введением одной новой метрики.

Анализ основных результатов

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка из 162 литературных источников; содержит 138 страниц, 44 рисунка и 3 таблицы.

Обзорная глава охватывает физику формирования спекл-сигнала, варианты вычисления спекл-контраста, энтропийные показатели, методы подавления статического рассеяния, оптическое просветление и количественную ОКТ. Обзор ориентирован на задачи диссертации и завершается четкой постановкой методического пробела.

Во **второй главе** предложено представление последовательности исходных спекл-изображений в виде матрицы признаков с последующим разложением с помощью анализа главных компонент. После центрирования матрицы и выделения главных компонент формируются отдельные квазистатический и динамический массивы. По ним рассчитываются полный спекл-контраст – FSC, статичный спекл-контраст – SSC и коэффициент динамической активности – DAC. Важным преимуществом является сохранение исходной оптической схемы и возможность программной реализации поверх стандартной системы ЛСКВ. При этом метрики имеют понятную физическую интерпретацию: FSC сохраняет смешанный характер, SSC преимущественно отражает статический фон, DAC характеризует динамическую активность после подавления статического вклада.

Экспериментальные результаты **третьей главы** демонстрируют, что АГК-фильтрация повышает чувствительность индекса потока к задаваемой скорости и уменьшает влияние глубины. Эффект показан в трансмиссионной и рефлективной геометриях освещения и для нескольких способов вычисления спекл-контраста. Средний коэффициент корреляции со скоростью увеличивается до 0.95 и 0.92 соответственно. Значимым является отрицательный результат для спекл-энтропийного подхода: АГК-фильтрация не дала ему такого же улучшения. Наличие такого сопоставления делает выводы более убедительными и показывает, что автор не отбирал только положительные результаты.

В **четвертой главе** предложен метод АГК-ЛСКТ. Карта SSC используется для восстановления относительного профиля глубины залегания сосуда, а DAC – для оценки скорости потока. Результаты сопоставлены с данными высокочастотной ультразвуковой томографии: для трансмиссионного режима получено $R^2 = 0.90$, для рефлективного – $R^2 = 0.88$. Помимо корреляции представлен анализ Бланда-Альтмана, выявивший небольшое смещение и ожидаемое увеличение разброса на больших глубинах. Демонстрация трехмерной ангиографии пальца человека показывает визуальный и прикладной потенциал метода, хотя глубина на данном этапе остается относительной.

Наиболее самостоятельной с точки зрения количественной ОКТ является **пятая глава**. Алгоритм реконструкции включает сглаживание, выравнивание границы ткани, компенсацию конфокальной функции с учетом положения фокальной плоскости, а затем глубинно-разрешенное восстановление коэффициента рассеяния. Динамические карты применены для оценки действия 70% этанола, бетаметазона дипропионата в этаноле и ультразвукового воздействия на кожу крысы *ex vivo*. Показаны различия глубины дегидратации и кинетики регидратации, в том числе увеличение

эффективной глубины дегидратации с 168 ± 88 до 262 ± 63 мкм и уменьшение характеристического времени регидратации с 21 ± 3 до 14 ± 3 мин при ультразвуковом воздействии.

В шестой главе реализована комбинация оптического просветления и цифровой обработки на основе АГК-фильтрации. Водный раствор 30% тартразина уменьшает статическое рассеяние черепной кости, а АГК-фильтрация подавляет его остаточный вклад в спекл-сигнал. За 20-25 мин коэффициент рассеяния поверхностного слоя кости по данным ОКТ снижается примерно с 1.5 до 0.6-0.8 мм⁻¹. Отношение контраст/шум (CNR) сосудов увеличивается: одна АГК-фильтрация до нанесения агента увеличивает CNR на 31%, оптическое просветление к 25-й минуте на 94%, а комбинированный протокол на 104% относительно исходного режима.

Седьмая глава посвящена моделированию динамической спекл-структуры. В объеме с 10^7 точечными рассеивателями моделируется броуновское движение фоновых частиц и направленный дрейф частиц в цилиндрическом сосуде. Учитываются числовая апертура, поперечная аподизация и экспоненциальное затухание с глубиной. Полнофакторный вычислительный эксперимент подтверждает смешанный характер FSC и преимущественную селективность SSC к глубине залегания сосуда и оптическим характеристикам среды, а DAC к скорости потока. Важным результатом является не абсолютное значение отдельных коэффициентов, а согласованность численного анализа с фантомными экспериментами и выявление условий, при которых селективность метрик ухудшается.

Научная новизна, практическая значимость и достоверность

К основным новым результатам следует отнести: разработку алгоритмической схемы разделения исходного спекл-массива и расчет взаимодополняющих метрик, экспериментальное обоснование DAC как показателя скорости потока с уменьшенной чувствительностью к глубине залегания сосуда, создание программного квазитомографического режима ЛСКВ и его кросс-модальную валидацию с ультразвуковой томографией, разработку ОКТ-реконструкции коэффициента затухания ОКТ сигнала с глубинно-временным разрешением для исследования процессов дегидратации и регидратации, первую совместную демонстрацию тартразин-индуцированного оптического просветления и АГК-фильтрации при транскраниальной ЛСКВ, реализацию численного моделирования для проверки алгоритмов.

Практическая значимость определяется прежде всего программной реализуемостью предложенных методов. Для АГК-обработки не требуется добавление источников, детекторов или многоракурсной схемы. ОКТ-алгоритм позволяет перейти от качественного сравнения В-сканов к картам изменения оптического параметра. Моделирование предоставляет возможность исследовать влияние аппаратных и объектных факторов до проведения дорогостоящего эксперимента. После дальнейшей стандартизации эти решения могут использоваться в исследованиях микроциркуляции,

оптического просветления, трансдермальной доставки и функционального состояния поверхностных тканей.

Достоверность подтверждается использованием физических моделей, контролируемых фантомов, независимой ультразвуковой валидации, двух ОКТ-систем с центральными длинами волн 930 и 1325 нм, сравнением разных геометрий ЛСКВ и согласованием эксперимента с вычислительным факторным анализом. Результаты опубликованы в 6 рецензируемых статьях, в том числе в профильных международных журналах, и представлены в 15 материалах конференций. Автореферат правильно отражает структуру и основные результаты диссертации.

Работа написана профессиональным языком, хорошо иллюстрирована и содержит развернутое обсуждение ограничений. Выводы по главам в основном соответствуют представленным данным. Личный вклад соискателя включает разработку алгоритмов и программ, проведение фантомных и биологических экспериментов, анализ данных и подготовку публикаций, что соответствует уровню самостоятельности, ожидаемому от кандидатской диссертации.

Замечания и вопросы

Наряду с отмеченными достоинствами имеется несколько вопросов, которые полезно обсудить.

1. В главе 3 при сравнении ТД- и РД-режимов соискатель отмечает, что после АГК-фильтрации различия между ними становятся менее заметными. Означает ли это, что предложенный подход позволяет унифицировать результаты, полученные в разных геометриях, и если да, то какие остаточные систематические расхождения сохраняются?

2. При реконструкции коэффициента рассеяния по данным ОКТ используется модель однократного рассеяния. Насколько корректно применение модели однократного рассеяния для кожи на глубинах до 500 мкм, где вклад многократного рассеяния становится существенным?

3. Использование предложенного ОПА обеспечило высокий прирост CNR к 25-й минуте. Однако остаётся неясным, как долго сохраняется эффект просветления и восстановления рассеяния черепа.

4. Соискатель отмечает, что предложенный подход может быть полезен для мониторинга эффективности оптического просветления и трансдермальной доставки лекарств. Какие конкретные клинические или фармакологические задачи наиболее перспективны для внедрения?

Заключение

Высказанные замечания преимущественно обозначают направления дальнейшей валидации и стандартизации и не ставят под сомнение основные научные результаты диссертации.

Диссертация Суркова Юрия Игоревича «Развитие методов лазерной спекл-визуализации и оптической когерентной томографии для исследования кровотока и тканевой диффузии» представляет собой завершённую научно-

квалификационную работу, содержащую решение актуальной задачи развития методов биомедицинской фотоники для исследования кровотока и динамических изменений оптических свойств тканей. По актуальности, научной новизне, достоверности и обоснованности выводов, теоретической и практической значимости, уровню апробации и публикаций диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Сурков Юрий Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.5.2 – Биофизика.

Официальный оппонент: Дрёмин Виктор Владимирович

д.ф-м.н. (1.5.2 – Биофизика),
старший научный сотрудник
научно-технологического центра
биомедицинской фотоники, профессор кафедры
приборостроения, метрологии и биомедицинской
инженерии Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Орловский государственный
университет имени И.С. Тургенева»
(ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева»)

Дата: «28» сентября 2026 г.

Я, Дрёмин Виктор Владимирович, даю согласие на обработку моих персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Суркова Юрия Игоревича .

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

Служебный адрес: 302026, Орловская область, г. Орел, ул. Комсомольская 95

E-mail: dremin_viktor@mail.ru

Телефон: +7 (4862) 41-98-06

Подпись Дрёмина В.В. заверяю:

И.о. проректора по научной работе
и международной деятельности



Радченко
Сергей Юрьевич

28.09.2026