

## УТВЕРЖДАЮ

Исполняющий обязанности директора  
Института прикладной физики  
им. А. В. Гапонова-Грехова Российской  
академии наук



доктор физико-математических наук, член-  
корреспондент РАН

Глявин Михаил Юрьевич

04.08.2026

2026 г.

М.П.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики  
им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»  
(ИПФ РАН)

на диссертацию 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

### Актуальность темы диссертации

Диссертация Ю. И. Суркова посвящена развитию оптических методов исследования кровотока и изменений рассеивающих свойств биологических тканей. В лазерной спекл-контрастной визуализации (ЛСКВ) на измеряемый спекл-контраст одновременно влияют движение рассеивающих частиц, глубина залегания сосуда и оптические свойства окружающей ткани. Это затрудняет сопоставление сосудов на разных глубинах и интерпретацию измерений при оптическом просветлении. Поэтому выделение более избирательных метрик из исходного спекл-сигнала представляет существенный научный интерес.

Оптическая когерентная томография (ОКТ) дополняет ЛСКВ возможностью исследовать изменения ткани с разрешением по глубине. Развитие ОКТ-мониторинга дегидратации и регидратации важно для изучения переноса воды и воздействия различных физико-химических факторов на барьерные свойства биотканей. Объединение этих направлений обосновано:

динамика оптических свойств является и самостоятельным объектом исследования, и фактором, который необходимо учитывать при оценке относительной скорости кровотока при ЛСКВ. Актуальность выбранной темы не вызывает сомнений.

### **Содержание работы и оценка основных результатов**

Диссертация изложена на 138 страницах, включает список сокращений, введение, семь глав, заключение и список литературы из 162 источников. Работа содержит 44 рисунка и 3 таблицы. Во введении сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит обзор методов спекл-визуализации и количественных методов ОКТ. Рассмотрение влияния статического рассеяния и ограничений одноэкспозиционных измерений подводит к основной задаче диссертации — уменьшению смещения факторов глубины, рассеяния и скорости потока в ЛСКВ.

Во второй главе описана методика обработки исходных последовательностей спекл-изображений на основе анализа главных компонент (АГК). После разделения спекл-сигнала на квазистатическое и динамическое подпространства выполняется реконструкция соответствующих составляющих сигнала. Предложен согласованный набор показателей: полный спекл-контраст (FSC), статический спекл-контраст (SSC) и коэффициент динамической активности (DAC). Алгоритмическая схема изложена последовательно и подразумевает программную реализацию на данных, получаемых на классической оптической схеме ЛСКВ.

В третьей главе исследована чувствительность полученных метрик к скорости потока и глубине залегания модельного сосуда. Использование рассеивающего оптического фантома с контролируемой геометрией и заданным потоком позволяет отдельно изменять исследуемые параметры. Сопоставление методов в проходящем и отраженном свете показывает, что выделение динамической компоненты уменьшает влияние глубины залегания сосуда на оценку относительной скорости потока по сравнению с полным спекл-контрастом. Демонстрация работоспособности предлагаемого метода на сосудистой сети уха лабораторной мыши дополняет эксперименты на оптических фантомах и показывает возможность применения алгоритма к биологическим объектам.

Четвертая глава развивает этот подход до программной квазитомографической визуализации на основе ЛСКВ. Показатель SSC

используется для восстановления относительного профиля глубины залегания сосуда, а DAC — для отображения динамической активности вдоль сосудистой структуры. В работе проводится сопоставление с независимыми данными ультразвуковой томографии: для нормированных профилей глубины на фантоме получены коэффициенты детерминации 0,90 в проходящем и 0,88 в отраженном свете. Эти результаты подтверждают возможность извлечения дополнительной пространственной информации из спекл-данных в исследованных условиях. При оценке результата следует сохранять принятое в работе понимание глубины залегания сосуда как относительной величины, зависящей от условий регистрации и оптических свойств среды.

В пятой главе представлена методика построения по ОКТ-данным глубинно- и временно-разрешенных карт оптического ослабления, интерпретируемого автором в рамках принятой модели как коэффициент рассеяния. На коже крыс *ex vivo* исследовано действие 70% водного раствора этанола и спиртового раствора бетаметазона дипропионата, в том числе в сочетании с ультразвуковым воздействием. Для воздействия этанола получено увеличение эффективной глубины дегидратации с  $168 \pm 88$  до  $262 \pm 63$  мкм при дополнительном ультразвуковом воздействии, характеристическое время регидратации поверхностного слоя уменьшилось с  $21 \pm 3$  до  $14 \pm 3$  мин. Метод позволяет сопоставлять не только интегральный отклик ткани, но и различия в кинетике процесса на отдельных глубинах.

В шестой главе рассмотрено сочетание оптического просветления черепа мыши раствором тартразина с АГК-фильтрацией спекл-сигнала. В представленном транскраниальном эксперименте оптическое просветление в комбинации с цифровой обработкой улучшали видимость сосудов, к 25 минуте прирост отношения контраст/шум составлял около 104% относительно исходного уровня. ОКТ-измерения позволили проследить изменение оптических характеристик черепа. Глава показывает перспективность совместного изменения условий распространения света с помощью оптического просветления и обработки зарегистрированного сигнала с помощью АГК-фильтрации. Биологические эксперименты этого раздела имеют демонстрационный характер, что следует учитывать при распространении количественных оценок на другие объекты.

В седьмой главе предложена численная модель динамического спекл-сигнала с управляемыми скоростью частиц, глубиной залегания сосуда и коэффициентом экстинкции. Факторный анализ в выбранном диапазоне параметров подтверждает различие чувствительности метрик: FSC смешивает вклады скорости потока, глубины залегания и коэффициента экстинкции, SSC

преимущественно отражает изменения глубины и оптических свойств, а DAC более избирателен к скорости потока. Результаты главы согласуются с результатами в главах 3 и 4. Модель позволяет проводить воспроизводимые вычислительные эксперименты. Автор также указывает на необходимость дальнейшего развития модели с учетом многократного рассеяния и приборных факторов.

В заключении представлены выводы, обобщающие результаты.

### **Научная новизна и значение результатов для биофизики**

Научная новизна и значение результатов диссертации для биофизики состоят в следующем:

1. Разработан и исследован способ анализа лазерных спекл-изображений на основе АГК, позволяющий из одного набора данных получать взаимодополняющие карты FSC, SSC и DAC. Эксперименты на фантомах показали возможность ослабления влияния статического рассеяния на оценку динамики потока и более избирательной регистрации изменений относительной скорости потока по метрике DAC.

2. Показана информативность квазистатической составляющей спекл-сигнала для оценки относительной глубины залегания модельного сосуда. Ее использование в квазитомографическом режиме АГК-ЛСКТ расширяет возможности пространственной интерпретации данных спекл-визуализации. Относительные профили глубины на фантомах сопоставлены с результатами ультразвуковой томографии.

3. Предложена методика анализа глубинной и временной динамики ОКТ-сигнала, позволяющая получать карты оптического ослабления и оценивать глубину и характерные времена изменений ткани при действии различных растворов и ультразвука. Полученные результаты характеризуют пространственную неоднородность процессов дегидратации и регидратации кожи.

4. На модели транскраниальной визуализации показана возможность совместного применения оптического просветления ткани раствором тартразина и АГК-фильтрации для повышения контраста сосудистого изображения. Этот результат представляет интерес для развития оптических способов исследования микроциркуляции через рассеивающие биоткани.

5. Разработана вычислительная модель формирования динамических спекл-изображений, связывающая заданные параметры движения рассеивателей и глубины залегания модельного сосуда с регистрируемыми

метриками. В рамках использованных приближений она позволяет отдельно исследовать влияние скорости потока, глубины и ослабления излучения на результаты АГК-обработки.

### **Степень достоверности полученных результатов**

Достоверность основных результатов обеспечивается контролем параметров фантомов и потока, сопоставлением разных метрик и геометрий регистрации, независимой проверкой относительных профилей глубины залегания сосудов с помощью ультразвуковой томографии. Полученные результаты согласуются с результатами других авторов и публикациями в современной литературе. В работе применены корреляционные оценки, анализ Бланда–Альтмана, регрессионный и факторный анализ. Материалы позволяют проследить связь между постановкой эксперимента, обработкой и выводами. Результаты обосновывают применение предложенных метрик для относительных измерений в исследованных диапазонах и при принятых физических допущениях.

### **Практическая значимость**

1. Алгоритмы АГК-обработки могут быть использованы в исследовательских системах ЛСКВ для анализа относительных изменений кровотока при выраженном статическом рассеянии, в том числе в опытах с оптическим просветлением. Совместное рассмотрение карт FSC, SSC и DAC при фиксированных параметрах регистрации полезно для лабораторных исследований микроциркуляции кожи и кортикального кровотока.
2. АГК-ЛСКТ может использоваться для построения относительных профилей глубины сосудов на калиброванных фантомах. Применение к биологическим объектам требует отдельного обоснования калибровки и учета оптических свойств исследуемой ткани.
3. Предложенный подход к ОКТ-мониторингу может быть полезен для сравнительного исследования воздействия различных растворов и ультразвука на кожу *ex vivo* по глубине оптических изменений и характерному времени восстановления. Такой подход может использоваться при разработке способов оптического просветления и исследовании тканевого отклика на физико-химические воздействия.
4. Разработанные оптические фантомы и вычислительная модель формирования спекл-сигнала могут применяться для проверки алгоритмов обработки спекл-изображений на данных с известными параметрами объекта, исследования устойчивости метрик и предварительного выбора режимов регистрации в пределах принятых модельных допущений.

## **Публикации и личный вклад автора**

Основные результаты диссертации изложены в шести научных работах в рецензируемых изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, а также в 15 тезисах докладов. Материалы представлены на российских и международных научных конференциях. Публикации охватывают основные направления исследования: АГК-обработку спекл-сигнала, квазитомографическую визуализацию, оптическое просветление и ОКТ-мониторинг. Автореферат отражает основное содержание диссертации и положения, выносимые на защиту.

Личный вклад Ю. И. Суркова, представленный в диссертации, включает разработку методов и программной реализации, проведение экспериментальных исследований, обработку и анализ данных, интерпретацию результатов и подготовку публикаций. Постановка задач и обсуждение результатов выполнялись совместно с научным руководителем. По содержанию работы вклад соискателя в получение основных научных результатов является существенным.

## **Замечания по диссертационной работе**

1. Основные параметры используемых установок приведены в тексте диссертации, однако недостаточно подробно раскрыты требования к временной стабильности лазерного излучения, а также принципы выбора числовой апертуры объектива и времени экспозиции камеры при реализации АГК-фильтрации. Это затрудняет оценку условий применения предложенной методики на других оптических системах.
2. В работе описаны состав и геометрия оптических фантомов, но не представлено в единой форме сопоставление их оптических характеристик с характеристиками соответствующих биологических тканей. Было бы полезно привести такое сравнение для коэффициентов поглощения и приведенного рассеяния на рабочих длинах волн. Это позволило бы точнее обосновать выбор фантомов и границы переноса полученных закономерностей на реальные ткани.
3. В главе 7 ограничения модели, связанные с отсутствием явного учета многократного рассеяния, отмечены автором. Однако недостаточно раскрыто, при каких оптических толщинах среды принятое приближение обеспечивает количественно приемлемую точность. Кроме того, преимущество предложенной реализации по сравнению с уже существующими способами моделирования динамических спеклов нуждается в более конкретном обосновании.

4. В описании численной модели используется термин «броуновское движение» применительно к случайной составляющей перемещений рассеивателей в ткани. Требуется уточнения физическая интерпретация этого определения: описывает ли оно тепловое движение взвешенных в жидкости или газе частиц или автор использует этот термин для характеристики наличия наблюдаемой неустойчивости взаимного положения рассеивателей в биологической ткани, обусловленной тепловым движением.

5. В главе 5 восстановленная по ОКТ величина интерпретируется как коэффициент рассеяния кожи. При этом конфокальная поправка в методике учтена, но недостаточно подробно оценено влияние других факторов: снижения чувствительности системы с глубиной, шумового фона, конечной глубины регистрации и возможной неоднородности обратного рассеяния. Следует точнее обосновать, при каких допущениях и после каких калибровок эта оценка соответствует коэффициенту рассеяния ткани, и разграничить ее с эффективным коэффициентом ослабления ОКТ-сигнала.

Указанные замечания и недостатки касаются условий воспроизводимости, границ применимости модели и количественной интерпретации результатов. Они не отменяют установленных в работе закономерностей и не снижают общей положительной оценки диссертации. Характеризуя диссертацию в целом, следует отметить, что работа Суркова Ю.И. является законченным научным исследованием, направленным на решение современных и актуальных задач биофизики. Текст диссертации написан профессиональным языком, изложение сопровождается ссылками на авторитетные научные издания.

## **Заключение**

Диссертация Суркова Юрия Игоревича «Развитие методов лазерной спекл-визуализации и оптической когерентной томографии для исследования кровотока и тканевой диффузии» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена имеющая значение для биофизики задача развития оптических методов исследования кровотока и динамики рассеивающих свойств тканей.

Работа соответствует научной специальности 1.5.2 — Биофизика в части биофотоники, вычислительной биофизики и биофизических методов исследования тканей.

Отзыв обсужден и одобрен по результатам рассмотрения диссертации на расширенном заседании отдела нанооптики и высокочувствительных оптических измерений ИПФ РАН «10» сентября 2026 г., протокол № 340/25.

заведующий отделом нанооптики и высокочувствительных оптических измерений Отделения нелинейной динамики и оптики ИПФ РАН,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН

01.10.2026

ва Г.В. заверяю

Mo/

01.10.2026

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный  
исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-  
Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)  
603951, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46  
Телефон: +7 (831) 436-62-02; e-mail: [dir@ipfran.ru](mailto:dir@ipfran.ru)  
Сайт: <https://www.ipfran.ru/>