

## ОТЗЫВ

официального оппонента Старченко Ирины Борисовны  
на диссертационную работу Потлова Антона Юрьевича  
**«Методы и средства оптической когерентной эластографии мягких  
биологических тканей с использованием экзогенных и эндогенных  
деформирующих воздействий»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по  
специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского  
назначения» (технические науки)

**Актуальность темы исследования.** Термин «медицинская визуализация» объединяет в себе методологические, аппаратные и программные решения для построения при помощи физических методов изображений внутренних структур организма человека, а также их биомедицинских моделей с целью дальнейшего использования для решения задач, связанных с обучением медицинского персонала, диагностикой и планированием лечения. Оптическая когерентная эластография представляет собой один из наиболее передовых методов медицинской визуализации. Теоретический предел для этого метода – получение оптических эластограмм в режиме реального времени с субмикронным пространственным разрешением для области сканирования, соизмеримой с размерами образца ткани, получаемого при инцизионной биопсии. Текущее положение дел гораздо скромнее: системы для оптической когерентной эластографии микронного пространственного разрешения нашли ограниченное применение в основном при проведении экспериментальных медицинских, биологических и биофизических исследований жестко зафиксированных образцов *in vivo* и *ex vivo*.

Высокое пространственное разрешение систем для оптической когерентной томографии и эластографии делает собираемую диагностическую информацию во многом уникальной и чрезвычайно важной для понимания структурных изменений и функциональных нарушений в сканируемой биологической ткани, но также является первопричиной чувствительности как к произвольным, так и к непроизвольным объемным движениям, а также плохо предсказуемого распределения вертикального механического напряжения относительно плоскости сканирования. Для устранения влияния двух вышеуказанных негативных факторов в качестве промежуточного решения используется взаимная фиксация сканирующего зонда и сканируемого образца. Однако такой подход делает исследование стенок кровеносных сосудов, а



также полостей и трактов организма человека *in vivo* практически нереалистичным, что и является одной из ключевых причин ограниченного применения систем для оптической когерентной эластографии в реальной клинической практике.

Диссертационная работа Потлова А.Ю. посвящена решению актуальной проблемы организации эффективной коррекции артефактов объемного движения с одновременным учетом заведомо сложной формы профиля деформирующего воздействия (как в статике, так и в динамике) для обеспечения свободной от жесткой взаимной фиксации сканирующего зонда и сканируемого объекта многомерной оптической когерентной эластографии. Цель исследования для возможности количественной оценки полученного результата сформулирована, как повышение достоверности пространственного картирования механических свойств биологических тканей при оптической когерентной эластографии.

**Научная новизна диссертации, ее теоретическая и практическая значимость.** Диссертационная работа характеризуется 7 пунктами научной новизны. Их обобщенная суть заключается в следующем.

Разработка методов и средств для оптической когерентной эластографии требует понимания физических основ взаимодействия излучения ближнего инфракрасного диапазона с биологическими тканями, причем как в исходном (недеформированном), так и в совокупности деформированных состояний. Для этого была разработана оригинальная модель, отличающаяся фрактальным подходом к описанию поведения пучка фотонов, а также учетом влияния деформирующих воздействий. Эта модель важна как с теоретической точки зрения, поскольку связывает фотонику и биомеханику, так и с практической точки зрения, поскольку позволяет проводить вычислительные эксперименты по поиску наиболее эффективных режимов сканирования.

Были разработаны и изготовлены наборы тканеимитирующих фантомов, имеющих специальное устройство для формирования пульсирующих потоков кровеимитирующей жидкости в них. Они отличаются послойным изготовлением имитаторов кровеносных сосудов на основе негативных моделей, использованием специальных раздвоенных катетеров, формированием сложной геометрии потоков посредством управляемого перекручивания гибких вибрирующих питающих трубок. Предлагаемые решения расширяют теоретическую базу мультимодального натурального моделирования физических свойств биологических тканей и могут быть использованы для оценки



технического состояния оптических и акустических систем медицинской визуализации, а также для проведения экспериментов по верификации и валидации.

Разработка методов и средств для многомерной оптической когерентной эластографии без жесткой взаимной фиксации сканирующего зонда и сканируемого объекта требует отказа от идеализированных представлений о пространственном распределении деформирующей силы. Для этого волоконно-оптические зонды для оптической когерентной томографии и эластографии были дополнены тонкопленочными датчиками давления. Отличительной особенностью эндоскопических зондов стало то, что матрица гибких тонкопленочных датчиков давления окольцовывает торцевую часть катетера. Разработанные интраваскулярные зонды снабжены похожей матрицей датчиков давления, с той лишь разницей, что она окольцовывает боковую поверхность катетера. Предложенные модификации волоконно-оптических зондов и метод реконструкции динамически изменяющихся профилей деформирующего воздействия важны с теоретической точки зрения, поскольку позволяют систематизировать данные о реальном распределении механического напряжения относительно плоскости сканирования, а также понять реальную роль эффектов прилипания и неровности границ сканируемого биообъекта.

Разработанные методы, устройства и программные продукты для реконструкции профиля деформирующего воздействия в режиме реального времени, а также для коррекции артефактов объемного движения видеоизменяют подход к оценке основных биомеханических характеристик биологических тканей, сводя его к расчетам по классическим формулам с поэтапным вычислением входных величин.

В целом, все вышеописанные методы, устройства, алгоритмы, программные продукты, математические и натурные модели укладываются в авторскую идею оптической когерентной эластографии без жесткой взаимной фиксации сканирующего зонда и сканируемого биообъекта, реализованную посредством использования экзогенных и эндогенных деформирующих воздействий с компенсацией физиологических, аппаратных и системных артефактов в диалоговом режиме работы.

**Личный вклад соискателя. Оценка достоверности и обоснованности результатов исследования, уровня публикаций и апробации.** Достоверность результатов исследования сомнений не вызывает и обосновывается следующими соображениями:



1. Математические модели базируются на современных общепризнанных представлениях о напряженно-деформированных состояниях биологических объектов и биотехнических систем.

2. Мультимодальные тканеимитирующие фантомы и устройство для формирования пульсирующих потоков разработаны на основе рекомендаций, корректно подобранных с учетом авторитетных репрезентативных источников научной информации.

3. Программное обеспечение для коррекции артефактов и оценки величин основных биомеханических характеристик разработано на основе общепризнанного аппарата математической морфологии и топологии, а также современных подходов к динамическому анализу изображений.

4. Научная идея, реализованная в диссертации, базируется на известных биофизических данных об оптических и механических свойствах биологических тканей, структурированных наблюдениях медицинского персонала об артефактах медицинских оптических изображений и действиях, предшествующих их возникновению, современных общепризнанных достижениях в области микроэлектронных технологий изготовления тонкопленочных датчиков, а также систем технического зрения и не противоречит известным результатам.

Содержание диссертационной работы, в особенности все положения, выносимые на защиту, достаточно подробно изложены в более чем ста печатных работах соискателя. Потлов А.Ю. опубликовал по материалам диссертационной работы 2 монографии, 17 статей в журналах из перечня Высшей аттестационной комиссии и 34 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых в признаваемых Высшей аттестационной комиссией международных базах данных. Также у соискателя имеются 13 патентов на изобретения, 8 патентов на полезные модели и 42 свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 10 авторитетных Всероссийских и 32 известных Международных научных конференциях, проводимых, как на территории Российской Федерации, так и за рубежом.

**Анализ содержания диссертации с акцентом на научные положения, выносимые на защиту. Взаимное соответствие автореферата, диссертации и выводов по работе.** Соискателем вынесено на защиту 7 научных положений.

Первое научное положение отражает обобщенную суть всей диссертационной работы, а именно научную идею оптической когерентной



эластографии с использованием экзогенных и эндогенных деформирующих воздействий, учетом заведомо сложной формы профиля деформирующего воздействия и многоуровневой коррекцией артефактов объемного движения. Соискателю посредством выполнения работ, описанных в *1–6 главах*, начиная от обзора и анализа известных научно-технических решений и заканчивая тематическими методами поддержки принятия врачебных решения, удалось организовать многомерную структурную и функциональную визуализацию в оптической когерентной эластографии в диалоговом режиме работы с достоверностью более 96% без жесткой взаимной фиксации сканирующего зонда и сканируемого объекта друг относительно друга. Это новый значимый научный результат.

Второе научное положение раскрыто во *2-й главе* диссертационной работы. Мультимодальные фантомы были разработаны и поэтапно изготовлены для имитации анатомических особенностей реальных биообъектов с достоверностью свыше 93% и характеристик кровотока в полостях в толще фантома с достоверностью более 91%.

Третье научное положение также обосновано во *2-й главе*. Алгоритмы и программные продукты для математического моделирования процессов, происходящих в исследуемой биологической ткани при оптической когерентной эластографии были разработаны и верифицированы с использованием представленных в той же главе (см. абзац выше) мультимодальных фантомов.

Четвертое научное положение отражает суть научно-технических решений, предложенных в *3-й главе*. Представлены базовая версия системы для оптической когерентной томографии и эластографии и возможные ее модификации. Авторский метод коррекции артефактов объемного движения позволяет применительно к разработанным устройствам стабилизировать оптические изображения в диалоговом режиме, с точностью равной удвоенному пространственному разрешению по соответствующей координатной оси.

Пятое научное положение раскрыто в *4-й главе* и посвящено реконструкции профиля деформирующего воздействия, аппаратным и программным решениям, необходимым для сбора и обработки данных с тонкопленочной матрицы датчиков давления.

Шестое научное положение отражает суть авторской методологии, изложенной в *5-й главе*. Предложенная совокупность методов обработки биомедицинских сигналов и данных при оптической когерентной эластографии



сменными волоконно-оптическими зондами с использованием эндогенных и экзогенных деформирующих воздействий позволяет эффективно оценивать величину модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига. Здесь же представлен перспективный метод оценки вязкости сильно рассеивающих биологических жидкостей и фармацевтических препаратов.

Седьмое научное положение соответствует научным результатам, представленным в *6-й главе*. Предложены оригинальные методы автоматизированной оценки данных, в том числе сегментации изображений стенок кровеносных сосудов с последующим распознаванием анатомических структур и прогнозированием рисков на основе их формы, взаимного расположения и толщины. Приведены данные по быстродействию, чувствительности и специфичности предложенных методов.

В целом диссертация представляет собой завершенное научное исследование. Общий объем работы составляет 464 страницы. Автореферат точно и в понятной для широкого круга заинтересованных лиц форме передает суть диссертационной работы. 7 актов о внедрении подтверждают практическое использование ключевых научно-технических результатов диссертационного исследования.

### **Замечания по диссертационной работе:**

1. В диссертации представлены базовая и упрощенная версия метода коррекции артефактов движения, но четко не указано, в какой ситуации лучше использовать основной вариант, а в какой можно и упрощенный.

2. Методы оценки биомеханических свойств аневризм и вероятности их разрыва, выбора оптимального стента, оценки эффективности операций стентирования и целесообразности рестентирования следовало четче структурировать, например, в виде дерева решений.

3. Замена неселективного нейтрального фильтра в опорном плече разработанной системы для оптической когерентной томографии и эластографии на нейтральный фильтр переменной плотности упростила бы процесс настройки базового блока.

4. Причины отказа от использования технологий искусственного интеллекта при распознавании образов на оптических медицинских изображениях не очевидны.

5. В тексте имеются стилистические погрешности.



Перечень замечаний носит преимущественно рекомендательный характер. Все они не являются принципиальными и не ставят под сомнение полученные автором результаты, их новизну, теоретическую и практическую значимость.

**Общее заключение по диссертационной работе.** Докторская диссертация Потлова А.Ю. является выполненной на высоком уровне и грамотно изложенной научно-квалификационной работой. Название хорошо согласуется с научными положениями, выносимыми на защиту. Автореферат достаточно подробно раскрывает все ключевые аспекты диссертационного исследования. Тема и содержание диссертации соответствуют пунктам 2, 7, 8, 10, 14, 15, 19 и 20 паспорта научной специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения» (технические науки).

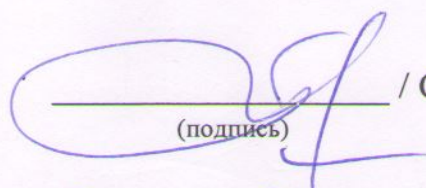
Диссертационная работа Потлова А.Ю. обладает внутренним единством, доведена до логического финала, не противоречит известным научным результатам. Суть работы заключается в поэтапном решении крупной научной проблемы, связанной с расширением диагностических возможностей оптической когерентной эластографии сменными волоконно-оптическими зондами, в частности с организацией стабильной работы в условиях реальной клинической практики, когда жесткая взаимная фиксация сканирующего зонда и сканируемого объекта затруднена и крайне нежелательна. Подобные условия типичны для онкологических, кардиологических, ангиологических, гастроэнтерологических, оториноларингологических, гинекологических и урологических приложений оптической когерентной эластографии. Разработанное в рамках диссертационной работы методологическое, алгоритмическое, аппаратное и программное обеспечение позволяет медицинскому персоналу получать во многом уникальную диагностическую информацию об оптическом строении и биомеханических свойствах исследуемых анатомических структур в диалоговом режиме работы с приемлемым количеством артефактов, а также в удобной для корректной интерпретации форме, что имеет важное социально-экономическое, политическое, хозяйственное и культурное значение. Важно также то, что соискатель предусмотрел использование (по возможности) деформирующих воздействий, обусловленных физиологическими процессами.

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Потлова А.Ю. «Методы и средства оптической когерентной эластографии мягких биологических тканей с использованием экзогенных и



эндогенных деформирующих воздействий» соответствует полному набору требований, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук на основании «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Потлов Антон Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

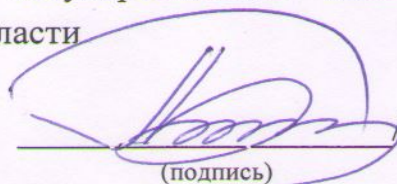
**Официальный оппонент.** Доктор технических наук по специальностям 05.01.13. «Системный анализ, управление и обработка информации» и 01.04.06. «Акустика», профессор, заместитель директора по учебно-научной работе Политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» в г. Таганроге Ростовской области

  
(подпись) / Старченко Ирина Борисовна  
(Ф.И.О.)

Адрес: 347904. Российская Федерация, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Петровская 109-а  
E-mail: [istarchenko@donstu.ru](mailto:istarchenko@donstu.ru)  
Контактный телефон: +7 (8634) 61-18-33

Подпись д.т.н., проф. Старченко Ирины Борисовны **удостоверяю.**  
Директор Политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственный технический университет» в г. Таганроге Ростовской области



  
(подпись) / Болдырев Антон Сергеевич/  
(Ф.И.О.)

10.03.2025 г.

С ОТЗЫВОМ ОЗНАКОМЛЕН  
18.03.2025 г.

