

## УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
цифровому развитию,  
доктор физико-математических  
наук, профессор

А.А. Короновский

«ав» *декабрь* 2025 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный  
университет имени Н.Г. Чернышевского»

на диссертационную работу Курникова Алексея Александровича  
«Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных  
детекторов на эффективность оптоакустической визуализации биологических тканей»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.7 – Акустика

### Актуальность темы диссертационной работы

Тема диссертационного исследования лежит в области биомедицинской визуализации, работа направлена на совершенствование перспективного метода сканирующей оптоакустической ангиографии. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания новых неинвазивных технологий для высококонтрастной визуализации периферических сосудов, расположенных в приповерхностных слоях биологических тканей. Морфологическая оценка микрососудистой сети позволяет диагностировать сосудистые патологии, а анализ изменений структуры сосудов на опухолевых моделях предоставляет ценную информацию о развитии онкологических заболеваний и эффективности лекарственных препаратов. Автором решается одна из ключевых научно-технических задач в области оптоакустической визуализации – исследование влияния характеристик ультразвуковых детекторов на качество визуализации и основанная на этом разработка специализированных детекторов для повышения эффективности оптоакустических систем. Особое внимание уделяется перспективам использования детекторов на основе пьезополимерных материалов. Разработка специализированных пьезополимерных детекторов с оптимизированными характеристиками для сканирующей оптоакустической микроскопии, несомненно, представляет собой актуальную научно-техническую задачу, решение которой будет способствовать внедрению метода в клиническую и доклиническую практику.

### Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Курникова А.А. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего в себя 102 наименования. Общий объем работы составляет 108 страниц, включая 39 рисунков и 7 таблиц.

**Во введении** соискатель обосновывает актуальность выбранной тематики исследований, формулирует цель и задачи, приводит научную новизну, положения, выносимые на защиту. Также во введении указаны практическая значимость работы, методология исследования, личный вклад автора, степень достоверности и апробация результатов, краткое содержание диссертации.

**Первая глава** посвящена анализу чувствительности пьезополимерных детекторов. Для этого используется известная теоретическая модель описания преобразователя в виде электромеханического четырехполюсника. Автор приводит зависимости чувствительности детекторов на основе поливинилиденфторид-трифторэтилена (ПВДФ-ТрФЭ) от параметров электрической цепи (активного входного сопротивления и емкости) и свойств пленочного пьезоэлектрического преобразователя. В этой главе представлены экспериментальные измерения для детекторов из поливинилиденфторида (ПВДФ) и ПВДФ-ТрФЭ разной толщины, показавшие хорошее соответствие с теоретическими расчетами. На основе полученных результатов соискатель делает вывод о том, что наибольшую чувствительность при приеме сигнала обеспечивают пьезополимеры на основе ПВДФ-ТрФЭ, превосходящие ПВДФ примерно в 2 раза. Сравнительные эксперименты с пьезокерамическими приемниками также подтвердили преимущество ПВДФ-ТрФЭ по совокупности характеристик – чувствительности и полосе приема. В работе достигнуты высокие значения чувствительности, обеспечивающие регистрацию сигналов на субпаскальном уровне: 0.3 Па в полосе 1–10 МГц для пленок ПВДФ-ТрФЭ толщиной 120 мкм и 1.2 Па в полосе 1–30 МГц для пленки ПВДФ-ТрФЭ толщиной 20 мкм. Полученные результаты имеют практическую ценность при проектировании новых оптоакустических и ультразвуковых систем, предоставляя разработчикам важную информацию для выбора материалов в зависимости от решаемых задач.

**Во второй главе** диссертант описывает устройство сканирующего оптоакустического микроскопа (ОАМ) с акустическим разрешением, использующего сферические фокусирующие ультразвуковые приемники для визуализации. В главе проводятся исследования зависимости качества визуализации сосудов биологических тканей от частотной полосы приема и числовой апертуры фокусирующих детекторов. Для этого автор использует численное моделирование в программном пакете k-Wave и проводит экспериментальные исследования на фантомных объектах (микросферы и микроволокна в рассеивающей среде) и лабораторных животных. В численном моделировании (рис. 2.4 и рис. 2.10) показано, что ограниченная полоса приема позволяет визуализировать объекты определенного масштаба, а числовая апертура существенно влияет на визуализацию протяженных наклонных объектов. В экспериментальной части автор, используя пьезополимерные детекторы с различными параметрами (толщина пленки 9/25 мкм, числовая апертура 0.4/0.9), демонстрирует влияние этих параметров не только на пространственное разрешение, но и на глубину визуализации (в частности, для пленки 25 мкм по сравнению с 9 мкм), а также на качество визуализации сложных объектов, таких как извитая сосудистая сеть. Детектор с высокой числовой апертурой показывает значительно лучшее качество визуализации экспериментальной опухоли и спирального фантома по сравнению с низкоапертурным детектором. Результаты главы также дают важную информацию об областях применимости детекторов в оптоакустической визуализации, показывая необходимость поиска компромисса между пространственным разрешением, глубиной визуализации и сложностью визуализируемых объектов.

**В третьей главе** решается задача повышения чувствительности оптоакустических микроскопов с оптическим разрешением, использующих короткофокусные объективы с высокой числовой апертурой. А.А. Курниковым предложены два решения данной проблемы – разработаны компактные чувствительные детекторы: один на основе оптически прозрачной пьезопленки из ПВДФ-ИТО и второй в виде гидрофона с апертурой 0.5 мм на основе пьезопленки из ПВДФ-ТрФЭ. Оба решения позволяют легко интегрироваться в систему с оптическим объективом с малым рабочим расстоянием и получать качественные двумерные оптоакустические изображения за одно сканирование в плоскости с субмикронным разрешением без усреднения сигналов.

**В четвертой главе** рассматривается задача оптимизации параметров оптоакустического микроскопа с оптическим разрешением на основе линз с градиентным показателем преломления (GRIN). GRIN-линзы, припаиваемые на торец одномодового волокна, обычно помещаются соосно в центре сферического детектора для сканирования объекта в плоскости. Благодаря низкой числовой апертуре такие линзы обеспечивают увеличенную оптическую глубину резкости по сравнению с короткофокусными объективами и позволяют получать трехмерные изображения за одно сканирование, преодолевая проблемы неровности поверхности. Использование сферических фокусирующих детекторов, традиционно применяемых в таких системах, не является достаточно целесообразным и эффективным с точки зрения глубины резкости. Автором предложено решение в виде тонкого (100 мкм) кольцевого фокусирующего детектора на основе ПВДФ-ТрФЭ. С помощью численного моделирования соискатель демонстрирует преимущества такого детектора по сравнению с полноапертурным фокусирующим детектором не только в увеличенной глубине акустической резкости, но и в амплитуде регистрируемых сигналов от протяженных вертикальных источников, характерных при облучении сосудов слабо сфокусированным излучением. Проведенные А.А. Курниковым эксперименты на фантомах и лабораторных животных также показывают высокую эффективность предложенного подхода, обеспечивая визуализацию с глубиной резкости более 1 мм, на которой сохраняется высокое пространственное разрешение (20-30 мкм) и достаточно высокая амплитуда сигнала.

**В заключении** приводятся основные результаты работы.

#### **Степень достоверности результатов исследования**

Полученные в диссертации результаты и выводы являются обоснованными и достоверными. Теоретические вычисления и численное моделирование выполнены с использованием апробированных методов (модель электромеханического четырехполосника, программный пакет k-Wave, метод Монте-Карло). Достоверность подтверждается хорошим согласованием теоретических расчетов с экспериментальными измерениями, а также воспроизводимостью результатов численного моделирования в экспериментах по визуализации. Результаты работы представлены в 7 статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и не противоречат данным других исследователей.

#### **Научная новизна исследования**

Научная новизна работы определяется полученными результатами. Здесь можно отметить разработку сферического фокусирующего детектора на основе пьезопленки из ПВДФ, позволившего получить детальные оптоакустические изображения сложной сосудистой сети экспериментальной опухоли в сканирующей оптоакустической

микроскопии с акустическим разрешением. Также важным результатом, подчеркивающим новизну исследований, стала предложенная геометрия детектора в виде тонкого фокусирующего кольца, с помощью которого удалось не только увеличить эффективную глубину резкости ОАМ оптического разрешения, но и повысить ее чувствительность.

#### **Личный вклад соискателя**

Выносимые на защиту положения основаны на результатах, полученных автором лично, либо при его непосредственном участии. Соискатель непосредственно участвовал в постановке цели и задач исследования, проведении теоретических расчетов и численного моделирования, а также в получении, обработке и интерпретации экспериментальных данных.

#### **Практическая значимость работы и рекомендации по использованию полученных результатов**

Полученные в работе результаты по анализу пьезополимерных материалов могут быть использованы при создании пьезоэлектрических приемников с заданными характеристиками для разрабатываемых ультразвуковых и оптоакустических систем. Разработанные геометрии детекторов представляют интерес для совершенствования коммерческих установок таких компаний, как iThera Medical (Германия) и Seno Medical Instruments (США), а также для создания отечественных оптоакустических микроскопов в ведущих научных центрах.

Практическая ценность работы подтверждается перспективами применения разработок в медицинской диагностике для раннего выявления онкологических заболеваний и мониторинга микроциркуляторных нарушений, в доклинических исследованиях и нейробиологии.

#### **Вопросы и замечания по диссертационной работе**

- 1) В разделе 2.3 второй главы представлен численный анализ влияния числовой апертуры на визуализацию протяженных структур, а также экспериментальное сравнение двух сферических ПВДФ детекторов с разной числовой апертурой. Результаты убедительно демонстрируют, что детектор с высокой числовой апертурой превосходит низкоапертурный аналог как по пространственному разрешению, так и по эффективности визуализации протяженных наклонных структур. Однако в работе не указаны потенциальные ограничения или недостатки для детекторов с высокой числовой апертурой.
- 2) В работе следовало бы более детально указать, каким образом пространственное разрешение представленных системы изменяется в зависимости от глубины визуализации.
- 3) В третьей главе описан гидрофон, закрепленный под углом 36.9 градусов к плоскости визуализации. Возникает вопрос: как именно угол наклона приемника влияет на интенсивность регистрируемого акустического сигнала? Наблюдается ли существенное ухудшение сигнала при меньших углах расположения? Будет ли результат лучше, если гидрофон поставить с большим углом относительно плоскости визуализации?
- 4) В третьей главе представлен детектор на основе ПВДФ с электродами из индий-оловянного оксида (ИТО), обладающего высокой оптической прозрачностью.

Вместе с тем известно, что покрытие из ИТО имеет зернистую структуру. Каким образом эта характеристика покрытия влияет на пространственное разрешение системы в оптическом режиме?

- 5) При визуализации биологических тканей значительная часть лазерного излучения рассеивается от верхних слоев биоткани. Как это влияет на регистрацию оптоакустических сигналов, и каким образом этот фактор учитывается в проводимых исследованиях? Кроме того, каким образом в работе учитываются электромагнитные помехи, создаваемые лазерным источником при генерации импульсов?

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации, ее научной и практической значимости.

### **Заключение по диссертационной работе**

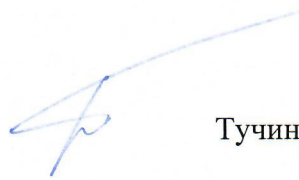
Диссертационная работа Курникова А.А. «Влияние амплитудно-частотных и геометрических характеристик пьезополимерных детекторов на эффективность оптоакустической визуализации биологических тканей» является законченным научным исследованием и соответствует научной специальности 1.3.7 – Акустика. Автореферат соответствует тексту диссертации.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842/в действующей редакции, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Курников А.А., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук специальности 1.3.7 – Акустика.

Диссертационная работа была рассмотрена на расширенном семинаре научного медицинского центра Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» 17 ноября 2025 г.

### **Отзыв на диссертацию подготовили:**

Доктор физико-математических наук,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
чл.-корр. РАН, профессор,  
заведующий кафедрой оптики и биофотоники  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,  
руководитель научного медицинского центра СГУ

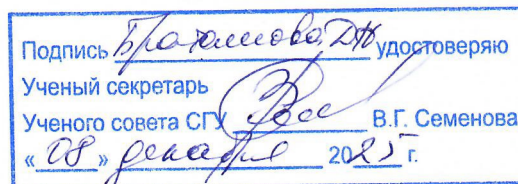
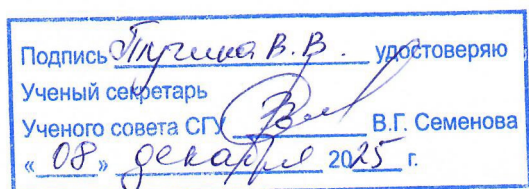


Тучин В.В.

Кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры инноватики  
ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»,  
ведущий инженер-программист ИББ МФТИ



Браташов Д.Н.



**Сведения о ведущей организации:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», СГУ)

Адрес: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Тел.: +7 (8452) 26-16-96, 8 (937) 811-67-46

E-mail: [rector@sgu.ru](mailto:rector@sgu.ru)

Интернет-сайт: <https://www.sgu.ru/>

Научный медицинский центр

Интернет-сайт: <https://www.sgu.ru/struktura/smc>

Подписи Тучина В.В. и Браташова Д.Н. заверяю