

ОТЗЫВ

**научного руководителя на диссертацию Зыкова Алексея Андреевича,
« Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической
когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.4. – радиофизика**

Зыков Алексей Андреевич начал участвовать в научных исследованиях, относящихся к тематике диссертации еще будучи студентом радиофизического факультета Нижегородского государственного университета (ННГУ). После окончания магистратуры ННГУ в 2021 году А.А. Зыков поступил в очную аспирантуру при Институте прикладной физики РАН и был привлечен к работам, связанным с развитием новых функциональных расширений оптической когерентной томографии (ОКТ)- компрессионной оптической когерентной эластографии (К-ОКЭ) и оптической когерентной ангиографии (ОКА). Фактически данной тематикой А.А. Зыков начал заниматься еще в рамках выполнения бакалаврской и магистерской программ и затем продолжил уже в качестве аспиранта.

Следует подчеркнуть, что задача создания эластографии на основе ОКТ привлекла активное внимание многих научных групп после появления в 1998 работы [J. Schmitt, "OCT elastography: imaging microscopic deformation and strain of tissue.," *Opt. Express*, 1998, v.3, doi: 10.1364/OE.3.000199], где первоначально была предложена идея непосредственного переноса в ОКТ из УЗИ принципов компрессионной эластографии, также используя корреляционный трекинг смещений рассеивателей и затем выполняя оценивание деформаций ткани. Однако в ОКТ в течение 15 лет на этом пути не было достигнуто практически приемлемых результатов из-за интерференционного принципа формирования сигналов, приводящего к выраженной спекловой структуре ОКТ-сканов. Эта структура приводит к высокому уровню «декорреляционного шума» из-за высокой чувствительности спеклов к деформациям среды. За последние годы, во многом благодаря работам в ИПФ РАН, удалось продемонстрировать ОКТ-реконструкцию деформаций с приемлемым качеством, но используя не корреляционный трекинг, а анализ фазы ОКТ-сканов, регистрируемых при деформировании среды. Для решения этой задачи в ИПФ РАН был предложен оригинальный «векторный метод», обладающий высокой робастностью по отношению к измерительным шумам и основанный на том, что в нем до последнего этапа операции с комплексными амплитудами ОКТ сигналов проводится как с векторами в комплексной плоскости без явного выделения фазы.

Тем не менее, задача дальнейшего повышения помехоустойчивости ОКТ-реконструкции деформаций оставалась очень актуальной. Особенно это касалось деформаций с выраженной изменчивостью как в пространстве по полю изображения, так и во времени, поскольку для таких деформаций параметры обработки, дающие хорошие результаты в одной области кадра, могут оказываться совершенно неоптимальными либо для других областей, либо другой пары сравниваемых кадров в записанной их серии. На практике именно такие изменчивые в пространстве и времени деформации являются наиболее распространенным случаем. Это указывает на важность разработки метода их реконструкции с обеспечением адаптивного автоматического выбора параметров анализа ОКТ-сигналов. Решение этой задачи составило значительную часть исследований, выполненных А.А. Зыковым в ходе подготовки диссертации.

Для тестирования и сравнения различных вариантов эластографического анализа ОКТ сигналов, а также и для совершенствования методов ОКТ-ангиографии, чаще всего используется анализ ОКТ сканов, получаемых экспериментально как для реальных биотканей, так и различных фантомных образцов. В физических экспериментах «истинные» движения рассеивателей можно задавать лишь весьма приблизительно (даже с использованием фантомов), а часто они просто

неизвестны заранее, что существенно затрудняет корректную оценку качества ОКТ-реконструкции таких движений. Кроме того, возможности варьирования как параметров движений рассеивателей, так и характеристик самого ОКТ прибора в физических экспериментах весьма ограничены. Поэтому большой интерес представляет возможность выполнения достаточно реалистичного и в то же время вычислительно эффективного численного синтеза ОКТ-сканов, причем с возможностью адекватного учета различных движений рассеивателей, в том числе потока рассеивателей. Созданию таких «цифровых» фантомов для ОКТ, имитирующих сигналы от деформирующейся среды в контексте развития ОКТ-эластографии, а также модели ткани, содержащей «сосуды» с кровотоком для развития ОКТ-ангиографии, также посвящена значительная часть диссертации А.А. Зыкова. Наконец, еще одним интересным аспектом, объединяющим задачи, ангиографии и эластографии на основе ОКТ, стал предложенный метод построения ОКТ-ангиограмм, основанный на аналогии с ОКЭ и отличающийся от известных подходов к реализации ОКА, основанных на различных методах анализа временной изменчивости сигналов из области сосудов. А именно, в предложенном подходе сечения сосудов выделяются как области локально повышенной мелкомасштабной случайной «деформации» на фоне более пространственно плавных маскирующих движений живой ткани.

Во всех отмеченных направлениях при активном и во многом определяющем вкладе Зыковым А.А. был выполнен объемный цикл исследований, в результате которых был развит вычислительно высокоэффективный подход для синтеза достаточно реалистичных «цифровых фантомов» ОКТ-сканов биотканей. Этот подход естественно учитывает движение рассеивателей, что открывает очень удобные возможности для развития методов ОКЭ и ОКА. Такое численное моделирование позволило детально смоделировать процессы декорреляции ОКТ-сигналов из областей «сосудов» и детально сравнить характер такой декорреляции при различном характере движения рассеивателей, имитирующих эритроциты, что практически невозможно контролируемо воспроизвести в физических экспериментах. Развитый метод моделирования позволил также предложить и протестировать улучшенные варианты компенсации маскирующих движений живой ткани для реализации ОКА. Был развит, протестирован на цифровых фантомах и затем продемонстрирован в физическом эксперименте оригинальный вариант ОКА, использующий аналогию с ОКЭ для выделения областей сосудов. Наконец, для улучшения качества картирования деформаций в условиях высокой зашумленности и при наличии существенной пространственно-временной изменчивости деформаций диссертант разработал несколько вариантов автоматического адаптивного выбора параметров анализа ОКТ-сигналов на основе предложенного в ИПФ «векторного подхода».

В ходе выполнения этих исследований А.А. Зыков принимал участие и в ряде совместных экспериментов с коллегами-биомедиками использованием ОКТ и анализировал соответствующие реальные записи, однако в большей степени проявил склонность именно к использованию методов моделирования для развития ОКЭ и ОКА-методов. При проведении соответствующих численных экспериментов, диссертант проявлял самостоятельность и скрупулезность, используя типичные для радиофизики подходы на основе фурье-анализа и синтеза сигналов, адаптируя и оптимизируя развиваемые методы ОКЭ и ОКА для существенно различных условий применения.

Результаты диссертанта в полной мере представлены в двух десятках публикаций, включая 7 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в системах цитирования WOS и Scopus и соответствующих требованиям ВАК к публикациям по кандидатским диссертациям. Доклады с соавторством А.А. Зыкова многократно представлялись (в том числе и им лично) на ведущих профильных международных и российских конференциях. В частности, его доклады трижды отмечались дипломами на Всероссийском молодежном Самарском конкурсе-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (в 2020, 2022 и 2023 гг.)

Можно отметить, что развитые в ходе работ над диссертацией улучшенные методы ОКЭ-

визуализации с адаптивным выбором параметров обработки уже стали активно использоваться при анализе результатов биомедицинских исследований, связанных с ОКТ-картированием деформаций в исследовательских центрах Нижнего Новгорода и Москвы, использующих разработанные и произведенные в ИПФ РАН ОКТ-приборы.

Можно констатировать, что представляемая диссертационная работа является законченным научным исследованием, которое соответствует всем требованиям ВАК, а ее автор Зыков А.А. достоин присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – радиофизика.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
(специальность 01.04.06-Акустика),
член-корреспондент РАН,
лауреат премии РАН им. Л.И. Мандельштама по
физике,
заведующий лабораторией волновых методов
исследования структурно-неоднородных сред
Института прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук
603950, г. Нижний Новгород,
ул. Ульянова 46
+7 (903) 600-45-73 vyuzai@ipfran.ru

Зайцев Владимир Юрьевич

Подпись Зайцева Владимировича Юрьевича заверяю:

14. 04. 2025

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валентинович