



УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПФ РАН,
академик РАН Г.Г. Денисов

« 10 » июля 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

по диссертации Зыкова Алексея Андреевича «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Работа выполнена в отделе нелинейных геофизических процессов (230) Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Научный руководитель – Зайцев Владимир Юрьевич, заведующий лабораторией волновых методов диагностики структурно-неоднородных сред, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН.

В 2021 г. соискатель учёной степени с отличием окончил магистратуру в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского" по направлению подготовки 03.04.03. Радиофизика.

Сроки обучения в аспирантуре Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»: с 1 сентября 2021 года по 31 августа 2025 года.

Свидетельство об окончании аспирантуры № 105200 00000032 от 10 июля 2025 года.

В период подготовки диссертации соискатель Зыков Алексей Андреевич работал старшим лаборантом и затем стажером-исследователем в лаборатории волновых методов диагностики структурно-неоднородных сред Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

Личное участие аспиранта в получении результатов, изложенных в диссертации

Все результаты диссертации получены при непосредственном участии автора, как в части создания улучшенных методов и алгоритмов эластографического анализа ОКТ

сканов, так и в части апробирования развитых методов применительно к экспериментальным данным, полученным соавторами для различных реальных биотканей.

В ходе развития методов ОКТ-ангиографии автор диссертации играл ведущую роль при формулировке алгоритмов компенсации маскирующих движений живой ткани и выполнял численное моделирование ОКТ-сигналов для получения синтетических данных 3D-сканирования областей ткани с модельными сосудами. Диссертант также проводил сравнение работоспособности различных алгоритмов (включая предложенный в работе новый подход к реализации ОКТ-ангиографии на основе аналогии с ОКТ-эластографией) с использованием как синтезированных данных, так и реальных ОКТ-сканов, полученных как лично, так и соавторами. Автор также лично участвовал в ряде экспериментов по получению ангиографических ОКТ-данных на добровольцах и на животных.

В ходе развития алгоритмов картирования деформаций на основе векторного подхода автор диссертации играл ведущую роль при формулировке методов адаптивного выбора параметров обработки сравниваемых ОКТ сканов, т.е. масштаба оценивания градиента межкадровых вариаций фазы и размера области усреднения комплексных амплитуд пикселей перед оцениванием фазовых градиентов.

Все публикации по теме диссертации подготовлены при активном участии диссертанта. Постановка задач и обсуждение результатов исследования выполнены совместно с научным руководителем и соавторами.

Научная новизна и основные результаты диссертационного исследования

1. Предложена новая модель формирования ОКТ сканов, сочетающая реалистичность и высокую вычислительную эффективность и позволяющая естественно учитывать произвольные смещения рассеивателей от скана к скану. Это открыло возможность генерировать большие объемы ОКТ данных для имитации наиболее распространенного типа ОКТ приборов со слабо фокусированным зондирующим пучком, что позволило тестировать и развивать новые варианты ангиографического и эластографического анализа ОКТ-сигналов в строго контролируемых и гибко варьируемых условиях, что очень сложно или даже невозможно обеспечить в физических экспериментах.

2. Предложены новые методы эффективной компенсации амплитудно-фазовых декорреляционных искажений вызываемых маскирующими движениями среды, включая неоднородные по глубине деформационные смещения рассеивателей в ткани, окружающей сосуды, что критически важно для реализации ОКТ-ангиографии.

3. Предложен новый подход к визуализации сосудов с движущимися рассеивателями в кровотоке. В отличие от известных методов ОКТ-ангиографии, основанных на анализе временной изменчивости сигнала от движущихся рассеивателей, сечения сосудов в этом подходе выделяются как области локально повышенной «деформации» на основе аналогии с методом визуализации деформаций ткани в фазочувствительной ОКТ-эластографии.

4. Впервые выявлена тесная взаимосвязь используемых масштабов области усреднения фазочувствительных ОКТ сканов и масштаба оценивания градиента межкадровых вариаций фазы, а также впервые предложены методы адаптивного

автоматического выбора отмеченных выше параметров обработки ОКТ-сканов для повышения качества эластографической визуализации без ухудшения разрешения реконструируемого поля деформаций.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Все полученные в диссертации результаты обладают высокой степенью достоверности и являются обоснованными. Моделируемые ОКТ сканы на основе развитого в диссертации вычислительно эффективного метода для описания наиболее распространенных ОКТ систем со слабо фокусированным зондирующим пучком хорошо согласуются в соответствующем приближении с результатами более строгих, но вычислительно многократно более требовательных моделей, описывающих ОКТ системы с произвольной степенью фокусировки пучка. В части ангиографической реконструкции применение предложенного в диссертации нового метода показало хорошее согласование с результатами ранее предложенного метода ОКТ-ангиографии на основе высокочастотной фильтрации. В части эластографического анализа с использованием векторного метода с адаптивным выбором параметров, реконструированные поля деформаций на основе смоделированных ОКТ сканов показали хорошее согласование задаваемым в модели полем деформаций, определяющих смещения рассеивателей. В целом результаты диссертации не противоречат устоявшимся представлениям, приведенным в научной литературе, а дополняют их. Полученные результаты были признаны научной общественностью при обсуждениях на специализированных конференциях и опубликованы в рецензируемых научных журналах.

Практическая и теоретическая значимость результатов исследования

Теоретическая и практическая значимость исследований, проведенных в данной работе, обусловлена широким спектром актуальных проблем, решаемых в области биомедицины с использованием ОКТ-визуализации, включая методы ОКТ-ангиографии и ОКТ-эластографии. Получавшиеся в ходе выполнения диссертационной работы результаты уже использовались при выполнении проектов в рамках грантов РФФИ (№ 19-02-00645 и № 18-42-520018) и РНФ (грант РНФ № 16-15-10274 (“Новые ОКТ методы как основа контрольных систем с обратной связью при разработке нового поколения лазерных медицинских технологий для управляемой коррекции формы хрящей и роговицы глаза”) и № 22-12-00295 (“Оптическая когерентная эластография и родственные модальности: развитие физических принципов и демонстрации новых применений”).

Часть выполняемых исследований велись по приоритетным направлениям научно-технологического развития в рамках соглашения No. 075-15-2020-906 - НЦМУ «Фотоника».

Основные результаты работы, представленные в диссертации, были получены в рамках выполнения данных НИР и поэтому имеют непосредственную практическую значимость.

Список работ, опубликованных в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук

Материалы диссертации с достаточной полнотой представлены на международных конференциях и в публикациях по теме работы. По теме диссертации опубликовано 7 журнальных статей и 9 докладов в трудах конференций, индексируемых в WoS и Scopus, 7 докладов в трудах российских конференций, а также глава в монографии).

Статьи в рецензируемых журналах:

- [1A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Sovetsky, A.A.; Zaitsev, V.Y. Flexible Computationally Efficient Platform for Simulating Scan Formation in Optical Coherence Tomography with Accounting for Arbitrary Motions of Scatterers. J. of Biomedical Photonics and Engineering, 2021, 7, 010304, doi:10.18287/JBPE21.07.010304. (Scopus)
- [2A] Zaitsev, V.Y.; Ksenofontov, S.Y.; Sovetsky, A.A.; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; **Zykov, A.A.**; Gelikonov, G.V. Real-Time Strain and Elasticity Imaging in Phase-Sensitive Optical Coherence Elastography Using a Computationally Efficient Realization of the Vector Method. Photonics 2021, 8, 527, doi:10.3390/photonics8120527 (WOS, Scopus)
- [3A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Shabanov, D.V.; Zaitsev, V.Y. Novel Elastography-Inspired Approach to Angiographic Visualization in Optical Coherence Tomography. Photonics 2022, 9, 401, doi:10.3390/photonics9060401. (WOS, Scopus)
- [4A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Zaitsev, V.Y. Numerical Study of Supra-Wavelength Axial Motion Compensation in Contact-Mode Optical Coherence Angiography Using Fourier-Shift Procedures. J. of Biomedical Photonics and Engineering, 2022, 8, 040303, doi:10.18287/JBPE22.08.040303. (Scopus)
- [5A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Sovetsky, A.A.; Matveev, L.A.; Zaitsev, V.Y. Vector Method of Strain Estimation in OCT-Elastography with Adaptive Choice of Scale for Estimating Interframe Phase-Variation Gradients. Laser Phys. Lett. 2023, 20, 095601, doi:10.1088/1612-202X/ace253. (WOS, Scopus)
- [6A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Sovetsky, A.A.; Zaitsev, V.Y. Optimization of Preliminary Vector Averaging for Improving Strain-Estimation Accuracy in Phase-Sensitive Optical Coherence Elastography, J. of Biomedical Photonics and Engineering, 2023, 9, 040311, doi:10.18287/JBPE23.09.040311. (Scopus)
- [7A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Assaad, M.; Zaitsev, V.Y. Computationally Efficient Adaptive Optimization of Vector-Method Parameters for Phase-Sensitive Strain Estimation in Optical Coherence Elastography. Laser Phys. Lett. 2024, 21, 085601, doi:10.1088/1612-202X/ad552c (WOS, Scopus)

Глава в книге, написанная с соавторством диссертанта:

- [8A] Зайцев В.Ю., Матвеев А.Л., Матвеев Л.А., **Зыков А.А.**, Советский А.А. «Компрессионная оптическая когерентная эластография. Количественная оценка параметров жесткости: распределение значений жесткости и нелинейность» в книге

Мультимодальная оптическая когерентная томография в клинической медицине (под ред. Н.Д. Гладковой, Г.В. Геликонова, Е.Б. Киселевой). М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. — 336 с. — ISBN 978-5-9221-1926-9

Наиболее важные публикации в трудах конференций

[9A] Matveyev, A.L.; **Zykov, A.A.**; Matveev, L.A.; Moiseev, A.A.; Sovetsky, A.A.; Gelikonov, G.V.; Zaitsev, V.Y. Semi-Analytical Full-Wave Model of OCT-Scan Formation for Various Degrees of OCT-Beam Focusing with Implication of Motion of Scatterers // In Proceedings of the Biomedical Spectroscopy, Microscopy, and Imaging; Popp, J., Gergely, C., Eds.; SPIE: Online Only, France, April 1 2020; Vol. 11359, p. 113591H (1-5).

[10A] Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; **Zykov, A.A.**; Moiseev, A.A.; Sovetsky, A.A.; Gelikonov, G.V.; Zaitsev, V.Y. Computationally Efficient Spectral Model of OCT-Scan Formation with Easily Accounted Scatterer Motions for Simulating Multimodal OCT // In Proceedings of the Optical Coherence Imaging Techniques and Imaging in Scattering Media IV; Wojtkowski, M., Yasuno, Y., Vakoc, B.J., Eds.; SPIE: Online Only, Germany, December 9 2021; Vol. 11924, 119241A (1-3)

[11A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Zaitsev, V.Y. Numerical Simulations of Phase-Amplitude Compensation of Masking Strain-Induced Motions of Scatterers in Contact-Mode Optical Coherence Angiography // In Proceedings of the 2022 International Conference Laser Optics (ICLO); IEEE: Saint Petersburg, Russian Federation, June 20 2022; pp. 1–1.

[12A] **Zykov, A.A.**; Matveyev, A.L.; Matveev, L.A.; Shabanov, D.V.; Zaitsev, V.Y. Strain-Estimation-Based OCT Angiography // In Proceedings of the 2022 International Conference Laser Optics (ICLO); IEEE: Saint Petersburg, Russian Federation, June 20 2022; pp. 1–1.

[13A] **Zykov, A.A.**; Sovetsky, A.A.; Matveev, L.A.; Matveyev, A.L.; Zaitsev, V.Y. Adaptive Selection of Spatial Scale to Estimate Axial Gradients of Inter-Frame Phase Variations for Mapping Strains in Optical Coherence Elastography // In Proceedings of the Optics in Health Care and Biomedical Optics XIII; Luo, Q., Li, X., Gu, Y., Zhu, D., Eds.; SPIE: Beijing, China, November 27 2023; Vol. 12770, p. 127700Q (1-7)

Ценность научных работ диссертанта отражается высоким уровнем публикаций в рецензируемых международных журналах и призовыми местами на конкурсах студенческих докладов. Они неоднократно обсуждались на различных конференциях и семинарах, получили высокую оценку ведущих специалистов и имеют высокую цитируемость.

Результаты, представленные в диссертационной работе, в полной мере изложены в работах, опубликованных соискателем ученой степени. Формулировки результатов изложены в соответствии с личным вкладом автора в каждую из опубликованных статей. Ссылки на источники заимствования материалов оформлены корректно.

Научная специальность, которой соответствует диссертация: 1.3.4. Радиофизика.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертация соответствует критериям, установленным в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации от 23 августа 1996 года № 127-ФЗ "О науке и государственной научно-технической политике".

Диссертация «Развитие методов эластографической и ангиографической визуализации в оптической когерентной томографии на основе реалистичного численного моделирования ОКТ-сканов» Зыкова Алексея Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

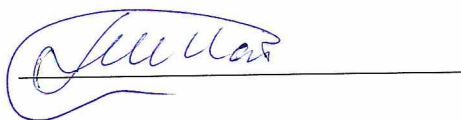
Настоящее заключение составлено на основании решения Ученого совета отделения геофизических исследований и Центра гидроакустики ИПФ РАН по проведению итоговой аттестации по программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по научной специальности: 1.3.4. Радиофизика.

Присутствовало на заседании 15 чел.

Результаты голосования: «за» — 15 чел., «против» — 0 чел., «воздержалось» — 0 чел.
протокол № 7 от «18» июня 2025 г.



Мареев Евгений Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
Председатель Ученого совета отделения
геофизических исследований и Центра
гидроакустики ИПФ РАН



Шаталина Мария Викторовна,
кандидат физико-математических наук,
Учёный секретарь отделения геофизических
исследований и Центра гидроакустики,
научный сотрудник отдела 260