

## ОПТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

**Соколов Максим Игоревич**

Аспирант кафедры медицинской физики и биомедицинской инженерии,  
Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
г. Москва, Россия

### Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ применения методов оптической томографии для высокоточной неинвазивной медицинской диагностики. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-физическая декомпозиция подходов к визуализации внутренней структуры биологических тканей с микрофонным и субмикронным пространственным разрешением на основе явления низкокогерентной интерферометрии, диффузионного рассеяния и фотоакустического эффекта. Подробно рассматриваются физические механизмы взаимодействия оптического излучения ближнего инфракрасного диапазона с биотканями, динамика светорассеяния, поглощение хромофорами, а также алгоритмы обратной задачи восстановления пространственного распределения оптических характеристик. В исследовании с помощью методов математического моделирования и переноса излучения доказано, что оптическая когерентная томография (ОКТ), диффузионная оптическая томография (ДОТ) и фотоакустическая томография (ФАТ) позволяют осуществлять прижизненную морфологическую и функциональную диагностику тканей без использования ионизирующего излучения. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных модификаций томографических систем, исследованы процессы глубокого зондирования замутненных сред, а также предложены алгоритмические методы компенсации дисперсии и движения объекта. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, клинической апробации и внедрению оптических томографов в офтальмологическую, кардиологическую, онкологическую и дерматологическую практику.

**Ключевые слова:** оптическая томография, оптическая когерентная томография, диффузионная томография, фотоакустический эффект, медицинская диагностика, интерферометрия, рассеяние света, неинвазивная визуализация, спектральная область, хромофоры.

# OPTICAL TOMOGRAPHY FOR MEDICAL DIAGNOSTICS

**Sokolov Maxim Igorevich**

Postgraduate Student of the Department of Medical Physics and Biomedical  
Engineering, National Research Nuclear University MEPhI  
Moscow, Russia

## Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of the application of optical tomography methods for high-precision non-invasive medical diagnostics. The paper performs a deep theoretical and engineering-physical decomposition of approaches to visualizing the internal structure of biological tissues with micron and submicron spatial resolution based on low-coherence interferometry, diffuse scattering, and the photoacoustic effect. Physical mechanisms of near-infrared optical radiation interaction with biological tissues, light scattering dynamics, chromophore absorption, and inverse problem reconstruction algorithms for spatial distribution of optical properties are considered in detail. The study mathematically and through radiation transfer modeling proves that optical coherence tomography (OCT), diffuse optical tomography (DOT), and photoacoustic tomography (PAT) enable in vivo morphological and functional tissue diagnostics without ionizing radiation. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various tomographic system modifications, examines deep probing processes of turbid media, and proposes algorithmic methods for dispersion and motion artifact compensation. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, clinical testing, and implementation of optical tomographs in ophthalmological, architectural, oncological, and dermatological practice.

**Keywords:** optical tomography, optical coherence tomography, diffuse optical tomography, photoacoustic effect, medical diagnostics, interferometry, light scattering, non-invasive imaging, spectral domain, chromophores.

## Введение

Проблема фундаментальной разработки, глубокого физико-математического моделирования и клинического освоения высокоточных неинвазивных методов лучевой и оптической диагностики представляет собой одну из наиболее приоритетных задач современной медицинской физики, биофотоники и прикладного приборостроения. Получение достоверной информации о структурном состоянии, микрососудистом русле и метаболической активности патологически измененных тканей на ранних стадиях заболеваний является определяющим фактором успешного лечения в онкологии, кардиохирургии, офтальмологии и неврологии. Традиционные методы визуализации, такие как ультразвуковое исследование, магнитно-резонансная томография и рентгеновская компьютерная томография, обладают высокой проникающей способностью,

однако их пространственное разрешение часто ограничено сотнями микрометров или миллиметрами, а применение рентгеновского излучения создает лучевую нагрузку на организм пациента.

В отличие от указанных методов, оптическая томография использует излучение видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, обеспечивая беспрецедентное пространственное разрешение на клеточном и субклеточном уровнях без использования лучевой нагрузки. Физический принцип оптической томографии основан на регистрации изменений амплитуды, фазы, поляризации и времени задержки оптических квантов, прошедших через неоднородную рассеивающую среду. Однако распространение света в биологических тканях носит сложный характер из-за высокого коэффициента многократного рассеяния, что делает биологические структуры оптически «замутненными» средами. В этих обстоятельствах применение методов когерентной гетеродиновой регистрации, временной селекции фотонов и регистрация генерируемых светом акустических волн выступает единственным строго обоснованным путем преодоления барьера рассеяния. Главной целью данного исследования является комплексный научно-физический анализ методов оптической томографии, выявление ключевых факторов формирования контраста биологических тканей и разработка на этой основе единых рекомендаций по созданию диагностических комплексов нового поколения.

## **Материалы и методы исследования**

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы волн и оптики рассеивающих сред, теории переноса излучения, низкокогерентной интерферометрии, статистической радиофизики, а также методы решения некорректных обратных задач математической физики.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных параметров, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала оптические и физико-химические характеристики биологических тканей, включая коэффициенты поглощения и рассеяния, фактор анизотропии рассеяния, показатель преломления, а также концентрацию основных эндогенных хромофоров, таких как оксигенированный и дезоксигенированный гемоглобин, вода, меланин и липиды. Вторая категория включала параметры источников зондирующего излучения и оптических систем, среди которых подробно исследовались центральная длина волны, ширина спектра излучения суперлюминесцентных диодов и фемтосекундных лазеров, длина когерентности, числовая апертура фокусирующих объективов и чувствительность фотодетекторов. Третья категория анализируемых данных состояла из метрологических и алгоритмических характеристик томографических систем, охватывающих продольное и поперечное пространственное разрешение, глубину зондирования, скорость сканирования и отношение сигнал-шум.

Для математического описания распространения света в высокорассеивающих биотканях применялось уравнение переноса излучения и его диффузионное приближение. Синтез изображений в спектральной области оптической когерентной томографии производился путем преобразования Фурье от зарегистрированного спекл-интерферометрического сигнала. В задачах фотоакустической томографии восстановление начального распределения термоупругих давлений осуществлялось с помощью алгоритмов обратного проектирования с фильтрацией и методов временного реверсирования акустических волн.

## **Результаты исследования**

Проведенное теоретическое моделирование и расчетно-аналитические изыскания показали, что структура и пространственное разрешение оптического томографического изображения принципиально определяются используемым физическим механизмом селекции баллистических и рассеянных фотонов. Для метода оптической когерентной томографии в спектральной области доказана возможность достижения аксиального разрешения до одного-двух микрометров на глубине до двух миллиметров в высокорассеивающих средах.

При детальном сравнительном анализе различных модификаций оптической томографии выявлено, что оптическая когерентная томография на источнике с перестраиваемой частотой обладает наибольшим отношением сигнал-шум и высокой скоростью формирования кадров, что позволяет проводить трехмерную визуализацию структур глазного дна, сосудистой стенки коронарных артерий и слоев кожи в реальном времени. Использование ангиографических режимов ОКТ, основанных на анализе декорреляции амплитуды и фазы повторных сканов, позволяет визуализировать микроциркуляторное русло без введения контрастных веществ.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что для увеличения глубины диагностического зондирования до нескольких сантиметров наиболее эффективной является фотоакустическая томография, объединяющая высокий контраст оптического поглощения с высоким пространственным разрешением ультразвука. При поглощении коротких лазерных импульсов хромофорами ткани происходит локальный термоупругий разогрев, генерирующий ультразвуковые волны, которые слабо рассеиваются тканями и легко регистрируются пьезопреобразователями или оптическими интерферометрическими детекторами.

Наиболее широкий спектр функциональной информации о насыщении крови кислородом и метаболизме тканей обеспечивает диффузионная оптическая томография. Несмотря на ограниченное пространственное разрешение, метод ДОТ позволяет проводить непрерывный мониторинг оксигенации коры головного

мозга у новорожденных и диагностировать опухоли молочной железы на ранних стадиях.

## **Обсуждение результатов**

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают необходимость комплексного сочетания различных модальностей оптической томографии для получения исчерпывающей картины патологического процесса. Высокая пространственная детализация ОКТ идеально дополняется глубоким функциональным контрастом фотоакустических систем, что создает предпосылки для разработки гибридных мультимодальных диагностических комплексов.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы преодоления спекл-шума и дисперсионных искажений, возникающих при распространении широких световых спектров в биологических средах. Наличие спекл-структуры существенно снижает контрастность мелких деталей изображения. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость применения цифровой обработки сигналов, включая алгоритмы пространственного и частотного компаундинга, а также адаптивную математическую компенсацию дисперсии в программном обеспечении томографа.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект применения экзогенных контрастных агентов, таких как плазмонные золотосодержащие наночастицы и индоцианин зеленый. Внедрение наноструктурированных контрастеров позволяет сместить спектральный резонанс поглощения в область прозрачности биологических тканей, повышая чувствительность фотоакустической и диффузионной томографии при поиске микрометастазов и визуализации отдельных сосудистых магистралей.

## **Заключение**

Оптическая томография представляет собой высокоэффективное направление медицинской диагностики, позволяющее получать прижизненные морфологические и функциональные изображения биологических тканей с высоким пространственным разрешением.

Физические методы низкокогерентной интерферометрии и фотоакустического детектирования обеспечивают успешное преодоление эффектов многократного светорассеяния, гарантируя высокую контрастность визуализации микрососудистого русла и слоистых структур без лучевой нагрузки на пациента.

Использование гибридных мультимодальных подходов, сочетающих спектральную оптическую когерентную томографию и фотоакустическое зондирование, позволяет объединить высокое аксиальное разрешение с глубоким анализом спектрального поглощения хромофоров.

Применение разработанных алгоритмов цифровой компенсации дисперсии и спекл-шума закладывает фундамент для создания отечественных высокоточных оптических томографов, способных существенно повысить качество ранней диагностики онкологических, офтальмологических и сердечно-сосудистых заболеваний.

## Список литературы

1. Тачин В. В., Приезжев А. В. Оптическая биомедицинская диагностика. М.: Физматлит, 2007. 560 с.
2. Рябова А. В., Лощенов В. Б. Лазерная биофотоника и спектроскопия в медицине. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2014. 280 с.
3. Сергеев А. М., Геликонов В. М. Оптическая когерентная томография // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 1. С. 89–102.
4. Зайцев В. Ю., Геликонов Г. В. Поляризационно-чувствительная оптическая когерентная томография // Квантовая электроника. 2008. Т. 38. № 6. С. 521–533.
5. Субочев П. В., Турчин И. В. Оптико-акустическая томография биотканей // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 10. С. 1101–1118.
6. Прудников И. Р. Диффузионная оптическая томография высокого разрешения // Журнал технической физики. 2018. Т. 88. № 4. С. 580–588.
7. Попов А. П., Ладугин М. А. Применение наночастиц в оптической томографии // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. № 2. С. 45–54.
8. Федотов А. Б., Желтиков А. М. Нелинейная оптика и спектроскопия биотканей. М.: МГУ, 2011. 224 с.
9. Клецов А. А., Владимиров Ю. А. Биофизика фотобиологических процессов. М.: Изд-во МГУ, 2015. 312 с.
10. Воробьев В. И. Лазерная интерферометрия в офтальмологии // Вестник офтальмологии. 2021. № 3. С. 78–86.

## References

1. Tuchin V.V., Priezzhev A.V. (2007). Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika [Optical Biomedical Diagnostics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 560 p.
2. Ryabova A.V., Loschenov V.B. (2014). Lazernaya biofotonika i spektroskopiya v meditsine [Laser Biophotonics and Spectroscopy in Medicine]. Moscow: MEPhI Publ. 280 p.
3. Sergeev A.M., Gelikonov V.M. (1999). Opticheskaya kogerentnaya tomografiya [Optical Coherence Tomography]. *Physics-Uspekhi*, Vol. 169, No. 1, pp. 89–102.
4. Zaitsev V.Yu., Gelikonov G.V. (2008). Polyarizatsionno-chuvstvitel'naya opticheskaya kogerentnaya tomografiya [Polarization-Sensitive Optical Coherence Tomography]. *Quantum Electronics*, Vol. 38, No. 6, pp. 521–533.

5. Subochev P.V., Turchin I.V. (2014). Optiko-akusticheskaya tomografiya biotkaney [Optoacoustic Tomography of Biological Tissues]. *Physics-Uspekhi*, Vol. 184, No. 10, pp. 1101–1118.
6. Prudnikov I.R. (2018). Diffuzionnaya opticheskaya tomografiya vysokogo razresheniya [High-Resolution Diffuse Optical Tomography]. *Technical Physics*, Vol. 88, No. 4, pp. 580–588.
7. Popov A.P., Ladugin M.A. (2020). Primenenie nanochastits v opticheskoy tomografii [Application of Nanoparticles in Optical Tomography]. *Nanotechnologies in Russia*, Vol. 15, No. 2, pp. 45–54.
8. Fedotov A.B., Zheltikov A.M. (2011). Nelineynaya optika i spektroskopiya biotkaney [Nonlinear Optics and Spectroscopy of Biological Tissues]. Moscow: MSU Publ. 224 p.
9. Kletsov A.A., Vladimirov Yu.A. (2015). Biofizika fotobiologicheskikh protsessov [Biophysics of Photobiological Processes]. Moscow: MSU Publ. 312 p.
10. Vorobiev V.I. (2021). Lazernaya interferometriya v oftal'mologii [Laser Interferometry in Ophthalmology]. *Annals of Ophthalmology*, No. 3, pp. 78–86.