

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра оптики и биофотоники

**Методы классической и квантовой поляриметрии и их применение в  
исследовании биологических тканей (критический анализ литературы)**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2223 группы

направления 03.04.02 «Физика»  
профиль «Квантовые технологии»  
Института физики

Алексюниной Полины Игоревны

Научный руководитель  
Проф., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН  
должность, ученая степень, уч. звание

  
подпись, дата

В.В. Тучин  
Инициалы Фамилия

Зав. кафедрой оптики и биофотоники  
Проф., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН  
должность, ученая степень, уч. звание

  
подпись, дата

В.В. Тучин  
Инициалы Фамилия

Саратов 2026 г.

**ВВЕДЕНИЕ** Тема работы посвящена критическому анализу методов классической и квантовой поляриметрии и их применения в исследовании биологических тканей.

Актуальность исследования заключается в том, что поляриметрические методы позволяют извлекать информацию о микроструктуре ткани непосредственно из анализа изменения состояния поляризации зондирующего излучения, не прибегая к окраске образцов, как это делается в традиционной гистологии. Классическая поляриметрия, которая достигла отличных результатов в диагностических исследованиях, имеет сильные ограничения при исследовании биологических объектов, связанные с дробовым шумом и фоном от многократного рассеяния света. Использование неклассических состояний света обещает подавление дробового шума, фона от многократного рассеяния и возможность визуализации при низких интенсивностях. Однако, в исследовании реальных биологических тканей доминировать продолжают классические методы, а квантовые методы используются пока только в лабораторных условиях. В связи с этим появилась необходимость в критическом сопоставлении классических и квантовых методов, которое помогло бы определить реальные перспективы и направления дальнейших исследований в области поляризационных измерений в биологии и медицине.

Цель работы – на основе критического анализа научной литературы выполнить сравнительную оценку потенциала и фундаментальных ограничений классической и квантовой поляриметрии применительно к исследованиям биологических тканей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Систематизировать физико-математический аппарат описания поляризационных состояний в рамках классической и квантовой теории.
2. Выполнить обзор ключевых современных экспериментальных схем классической поляриметрии биологических тканей.
3. Проанализировать направления квантовой поляриметрии и оценить их применимость к сильно рассеивающим биологическим средам.

4. Провести анализ количественных показателей, достигнутых в классических и квантовых исследованиях.

5. Сформулировать обоснованную рекомендацию по сочетанию сильных сторон обоих методов.

Объект исследования – оптические методы исследования биологических тканей, основанные на поляризационных характеристиках света.

Предмет исследования – сравнительная информативность классических и квантовых методов в условиях, характерных для реальных биотканей.

Работа состоит из введения, трех основных разделов, заключения и списка использованных источников.

В первом разделе с названием «Классическая поляриметрия биологических тканей» представлены физические основы классической поляриметрии в случайных средах, методы классической поляриметрии, их практическое применение и расширение классической поляриметрии в виде терагерцовой поляриметрической визуализации. Раздел дает полное представление о классическом подходе.

Во втором разделе с названием «Квантовая поляриметрия биологических тканей» представлены неклассические состояния света и их применение в исследованиях биотканей.

В третьем разделе под названием «Сравнительный анализ» производится сравнительный анализ классической и квантовой поляриметрии, а также в нем предложены подходы объединяющие сильные стороны двух методов.

В заключении приведены основные выводы о проведенном исследовании.

Список использованных источников содержит 40 наименований.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые проведено сопоставление классической и квантовой поляриметрии, охватывающее фундаментальные шумовые пределы и практическое применение для исследования биоткани, и на основе выявленных достоинств и недостатков методов предложены гибридные методы, которые сочетают в себе классическую и квантовую поляриметрию.

Научная значимость. Полученные результаты формируют рекомендательную базу для обоснования выбора поляризационного метода под конкретную задачу и служат основой для дальнейшего планирования экспериментальных исследований в области поляриметрии биологических тканей.

### **Основное содержание работы**

**Раздел 1 Классическая поляриметрия биологических тканей** В разделе изложены физические основы взаимодействия поляризованного света с биологическими тканями. Описаны математические методы: вектор Стокса и матрица Мюллера  $4 \times 4$  [1, 2], которые полностью характеризуют поляризационные свойства образца. Приведен метод полярной декомпозиции, позволяющий разделить вклад дихроизма, фазовой задержки и деполяризации [3].

Рассмотрены экспериментальные реализации классической поляриметрии. Поляризационная дискриминация (со- и кросс-поляризационные визуализации) позволяющая визуализировать отдельно поверхностные и глубинные слои кожи [1]. Полная матричная поляриметрия на примере рака молочной железы показала, что некоторые элементы матрицы Мюллера статистически различаются по интенсивности между здоровой и раковой тканью [3]. Двухугловой поляриметр Мюллера в сочетании с численным моделированием позволил выделить шесть поляризационных признаков для бесконтактного анализа формы, размера и показателя преломления одиночных эритроцитов [4].

Поляризационная отражательная спектроскопия с волоконно-оптическими жгутами дает дифференциальные спектры остаточной поляризации, чувствительные к содержанию крови и эпидермиса. Поляризационная микроскопия роговицы позволяет картировать ориентацию коллагеновых ламелей. Метод Монте-Карло для белого вещества мозга показал, что деполяризация является маркером опухоли на глубине около 0.4 мм, а скачок азимута указывает на пересечение волокон. Рассмотрены пучки с орбитальным угловым моментом, чья фазовая закрученность сохраняется даже при многократном рассеянии и позволяет передавать информацию через сильно рассеивающие среды [5]. Отдельно рассмотрена терагерцовая

поляриметрия, которая использует поглощение воды и диэлектрический контраст для наблюдений в реальном времени гидродинамики растений.

**Раздел 2 Квантовая поляриметрия биологических тканей** Представлено квантовое описание поляризационных состояний, с помощью операторов рождения и уничтожения. Представлен аналог вектора Джонса в классической поляриметрии через чистое состояние одного фотона. Обращено внимание на квантовый аналог вектора Стокса с информацией о квантовых флуктуациях, которые лежат в основе преодоления дробового шума. Рассмотрены неклассические состояния: сжатый свет и поляризационно-запутанные фотоны.

Рассмотрены практические применения квантовой поляризации. Метод визуализации по совпадению из запутанности, который в 25 раз устойчивее к рассеянному свету, чем классические методы и позволяет количественно измерить двулучепреломление на фоне многократного рассеяния [6]. Работа [7], в которой сжатый по амплитуде свет применен в микроскопии комбинационного рассеяния живых дрожжевых клеток. Подавление шума на 35% позволило улучшить соотношение сигнал/шум без фотоповреждения клеток [7]. Предложено применение нейронных сетей для калибровки квантового фазового сенсора при их обучении без использования аналитической модели [8]. Рассмотрен новый подход к квантовой поляризационной микроскопии, основанный на интерферометре Хонга-У-Манделя, который использует двухфотонную интерференцию для количественного анализа двулучепреломляющих свойств образцов [9].

**Раздел 3 Сравнительный анализ** Проведено сравнение по важным критериям.

Шумы и ошибки: классическая поляриметрия ограничена дробовым шумом, в то время как квантовая поляриметрия демонстрирует подавление шума на 35% и в 25 раз более высокую устойчивость к рассеянному свету.

Глубина зондирования: для классической поляриметрии в режиме отражения глубина около 200-400 мкм, а поляризационно-чувствительная оптическая когерентная томография позволяет получать карты деполяризации и

двулучепреломления на глубине 1-2мм. Квантовая поляриметрия показывает 0.4-1.5 мм, но абсолютная глубина меньше.

Скорость: когда классические работают в реальном времени (несколько кадров в секунду), квантовые требуют накопления совпадений (десятки секунд на одно изображение).

Так же в разделе предложены гибридные методы, использующие классические источники с квантовыми методами обработки сигнала, сочетание временного стробирования с квантовым корреляционным детектированием.

Сделан вывод о том, что квантовая и классическая поляриметрия могут решать разные задачи, поэтому гибридные системы являются перспективными.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ** В результате выполненной работы проведен критический анализ литературы по теме классической и квантовой поляриметрии в исследовании биологических тканей. На основе анализа были сделаны следующие выводы:

1. Классическая поляриметрия является хорошо разработанной технологией, широко применяемой в биологии и медицине. Она позволяет получать полные матрицы Мюллера, выделять параметры дихроизма, двулучепреломления и деполяризации, достигать глубины зондирования 1-2 мм и работать в реальном времени. Она используется для диагностики рака кожи и молочной железы, анализа эритроцитов и структуры коллагеновых волокон. Основным ограничением является дробовой шум и фон многократного рассеяния, снижающие чувствительность и контраст изображений

2. Квантовая поляриметрия демонстрирует фундаментальное превосходство в чувствительности: подавление шума на 35-51% и устойчивость к рассеянному свету в 25 раз выше классической. Имеют возможность преодоления фотоповреждения в микроскопии живых клеток, так как используют малоинтенсивные потоки фотонов. Однако, остаются сравнительно медленными (получение одного поляризационного изображения занимает порядка 10 секунд). Также они требуют сложной аппаратуры и калибровки.

3. Сравнительный анализ показал, что классическая и квантовая поляриметрия в основном не конкурируют, а часто решают разные задачи. Классические методы подходят там, где важна скорость, глубина и простота. Квантовые методы – там, где нужна минимальная интенсивность облучения или подавление шумов.

4. Наиболее перспективны гибридные подходы, которые могут обеспечить высокую глубину зондирования, устойчивость к рассеянию и сохранение квантовых корреляций.

Таким образом, цель работы достигнута и задачи, поставленные в работе выполнены.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Тучин, В. В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / В. В. Тучин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 812 с.
- 2 Azzam, R. M. A. Mueller-matrix polarimetry: A review of the monographic literature / R. M. A. Azzam // Journal of the Optical Society of America A. – 2016. – Т. 33, № 7. – С. 1396-1406.
- 3 Pham, T. T. Analysis of polarization features of human breast cancer tissue by Mueller matrix visualization / T. T. Pham, T. N. Quach, Q. H. Vo // J Biomed Opt. – 2024. – Т. 29, № 5. – С. 052917.
- 4 Yao, S. Analysis of erythrocyte deformation characteristics based on dual-angle Mueller matrix measurement / S. Yao, C. Guan, N. Zeng, H. He // Front Optoelectron. – 2025. – Т.18, № 1. – С. 23.
- 5 Tuchin, V. V. [и др.] Optical Polarization in Biomedical Applications / V. V. Tuchin, T. Novikova, L. V. Wang, D. A. Zimnyakov, H. Ma, M. V. Alonova, J. Wan. – 2nd ed. – Basel : Springer Nature Switzerland AG, 2026. – 444 p. – (Springer Series in Biophysics ; 28).
- 6 Zhang, Y. [и др.] Quantum imaging of biological organisms through spatial and polarization entanglement / Y. Zhang, Z. He, X. Tong, D. C. Garrett, R. Cao, L. V. Wang // Science Advances. – 2024. – Vol. 10.
- 7 Casacio, C. A. [и др.] Quantum-enhanced nonlinear microscopy / C. A. Casacio, L. S. Madsen, A. Terrasson [et al.] // Nature. – 2021. – Vol. 594. – P. 201–206.
- 8 Cimini, V. [и др.] Calibration of Quantum Sensors by Neural Networks / V. Cimini, I. Gianani, N. Spagnolo, F. Leccese, F. Sciarrino, M. Barbieri // Phys Rev Lett. – 2019. – Vol. 123. – P. 230502.
- 9 Goncalves, C. [и др.] Quantum Imaging of Birefringent Samples using Hong-Ou-Mandel Interference / C. Goncalves, T. D. Ferreira, C. S. Monteiro, N. A. Silva // arXiv preprint. – 2025. – arXiv:2512.19637.



Алексюнина П.И

подпись, дата