

УДК 681.723.28+535.55
<https://doi.org/10.56871/ViM.2026.24.98.003>

Поляризационная микроскопия в медико-биологических исследованиях

Татьяна Юрьевна Яковлева¹, Александр Викторович Бармасов^{1,2}, Анна Михайловна Бармасова¹,
Татьяна Сергеевна Демьянова¹, Анастасия Андреевна Зуйкова¹, Ангелина Владимировна Семёнова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, 194100, г. Санкт-Петербург, ул. Литовская, д. 2, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9, Российская Федерация

Для цитирования: Яковлева Т.Ю., Бармасов А.В., Бармасова А.М., Демьянова Т.С., Зуйкова А.А., Семёнова А.В.

Поляризационная микроскопия в медико-биологических исследованиях. *Визуализация в медицине*. 2026;8(2):29–40.
<https://doi.org/10.56871/ViM.2026.24.98.003>.

Поступила: 24.04.2026

Одобрена: 14.07.2026

Принята к печати: 10.08.2026

Резюме. Поляризационная микроскопия представляет собой высокоинформативный метод оптического анализа, предназначенный для визуализации структур биологических тканей и жидкостей, характеризующихся молекулярной упорядоченностью и оптической анизотропией. В отличие от классической световой микроскопии, регистрирующей преимущественно изменения интенсивности и спектрального состава проходящего света, поляризационная микроскопия позволяет выявлять изменения состояния поляризации световой волны при ее взаимодействии с исследуемым объектом. В статье рассмотрены физические основы двойного лучепреломления, устройство и принцип работы поляризационного микроскопа, применение компенсаторов, а также условия корректной интерпретации получаемых изображений. Обобщены основные направления использования метода в клинической и экспериментальной медицине: выявление амилоидных отложений в тканях после окрашивания Конго красным, оценка организации коллагенового матрикса, дифференциальная диагностика кристаллических артропатий по характеристикам кристаллов в синовиальной жидкости, исследование мышечной ткани и кристаллооптических картин высушенной сыворотки крови. Подчеркнуты ограничения метода, связанные с подготовкой проб, толщиной и ориентацией образца, настройкой оптической системы, возможностью появления двулучепреломляющих артефактов и зависимостью результатов от опыта исследователя. Рассмотрены современные направления развития поляризационной микроскопии, включая количественную поляризацию, LC-PolScore, полихроматическую поляризационную микроскопию, интеграцию с Рамановской спектроскопией, мультимодальной визуализацией и алгоритмами машинного обучения. Эти подходы расширяют возможности объективной количественной оценки оптически анизотропных структур и совершенствования диагностических протоколов.

Ключевые слова: поляризационная микроскопия, двойное лучепреломление, оптическая анизотропия, амилоидоз, коллаген, кристаллические артриты, компенсатор, синовиальная жидкость, количественная поляриметрия

✉ Анна Михайловна Бармасова. E-mail: abarmasova@yandex.ru

© Коллектив авторов, 2026

<https://doi.org/10.56871/ViM.2026.24.98.003>

Polarization microscopy in medical and biological research

Tatiana Yu. Yakovleva¹, Alexander V. Barmasov^{1,2}, Anna M. Barmasova¹, Tatiana S. Demyanova¹, Anastasia A. Zuikova¹, Angelina V. Semenova¹

¹ Saint Petersburg State Pediatric Medical University, 2 Litovskaya str., Saint Petersburg, 194100, Russian Federation

² Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya emb., Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Yakovleva T.Yu., Barmasov A.V., Barmasova A.M., Demyanova T.S., Zuikova A.A., Semenova A.V. Polarization microscopy in medical and biological research. *Visualization in Medicine*. 2026;8(2):29–40. (In Russ.). <https://doi.org/10.56871/ViM.2026.24.98.003>.

Received: 24.04.2026

Revised: 14.07.2026

Accepted: 10.08.2026

Abstract. Polarization microscopy is a highly informative optical analysis method intended for the visualization of structures in biological tissues and fluids characterized by molecular ordering and optical anisotropy. Unlike conventional light microscopy, which primarily records changes in the intensity and spectral composition of transmitted light, polarization microscopy makes it possible to detect changes in the polarization state of the light wave resulting from its interaction with the specimen. The article discusses the physical basis of birefringence, the design and operating principles of the polarization microscope, the use of compensators, and the conditions required for correct interpretation of the resulting images. The main applications of the method in clinical and experimental medicine are summarized, including the detection of amyloid deposits in tissues after Congo red staining, assessment of collagen matrix organization, differential diagnosis of crystal arthropathies based on the characteristics of crystals in synovial fluid, examination of muscle tissue, and crystalloscopic analysis of dried blood serum. The limitations of the method related to sample preparation, specimen thickness and orientation, adjustment of the optical system, the possible presence of birefringent artifacts, and the dependence of the results on observer experience are emphasized. Current trends in the development of polarization microscopy are also considered, including quantitative polarimetry, LC-PolScope, polychromatic polarization microscopy, integration with Raman spectroscopy, multimodal imaging, and machine-learning algorithms. These approaches expand the possibilities for objective quantitative assessment of optically anisotropic structures and for improving diagnostic protocols.

Keywords: polarization microscopy, birefringence, optical anisotropy, amyloidosis, collagen, crystal arthropathies, compensator, synovial fluid, quantitative polarimetry

✉ Anna M. Barmasova. E-mail: abarmasova@yandex.ru

© 2026 by the authors

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая микроскопия традиционно занимает центральное место среди методов медико-биологических исследований и клинической диагностики. Однако традиционные методы наблюдения в проходящем свете регистрируют преимущественно изменения интенсивности и спектрального состава светового потока, не учитывая его поляризационные характеристики. Поляризационная микроскопия восполняет этот пробел, вводя в аналитическую практику принципиально иное измерение — регистрацию состояния поляризации света после его прохождения через изучаемую среду. Данное расширение информационного поля делает поляризационную микроскопию важным инструментом для изучения биологических тканей и жидкостей, обладающих структурной анизотропией на молекулярном и надмолекулярном уровнях.

В последнее время наблюдается устойчивый рост интереса к поляризационным методам в биомедицинской оптике. Об этом свидетельствуют публикации фундаментальных обзоров и монографий, в которых систематизированы теоретические основы и методологические подходы к исследованию поляризационных свойств биологических тканей [1, 2]. Взаимодействие поляризованного света с нормальными и патологически измененными участками ткани позволяет выявить особенности ее микроструктуры, связанные с конкретными заболеваниями. Это открывает новые горизонты для неинвазивной и малоинвазивной диагностики.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА: ДВОЙНОЕ ЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ И АНИЗОТРОПИЯ

С позиций волновой теории свет представляет собой поперечную электромагнитную волну. В естественном (неполяризованном) свете вектор напряженности электрического поля колеблется хаотично во всех направлениях, перпендикулярных направлению распространения луча. Линейно поляризованным называют свет, в котором вектор напряженности электрического поля колеблется в одном фиксированном направлении в плоскости, перпендикулярной направлению распространения волны. Фундаментальным физическим явлением, лежащим в основе метода, служит двойное лучепреломление — способность анизотропных сред разделять падающий луч света на два: обыкновенный (ordinary) и необыкновенный (extraordinary), распространяющиеся с различными скоростями. Данное свойство обусловлено анизотропией показателя преломления n (различием значений n_o

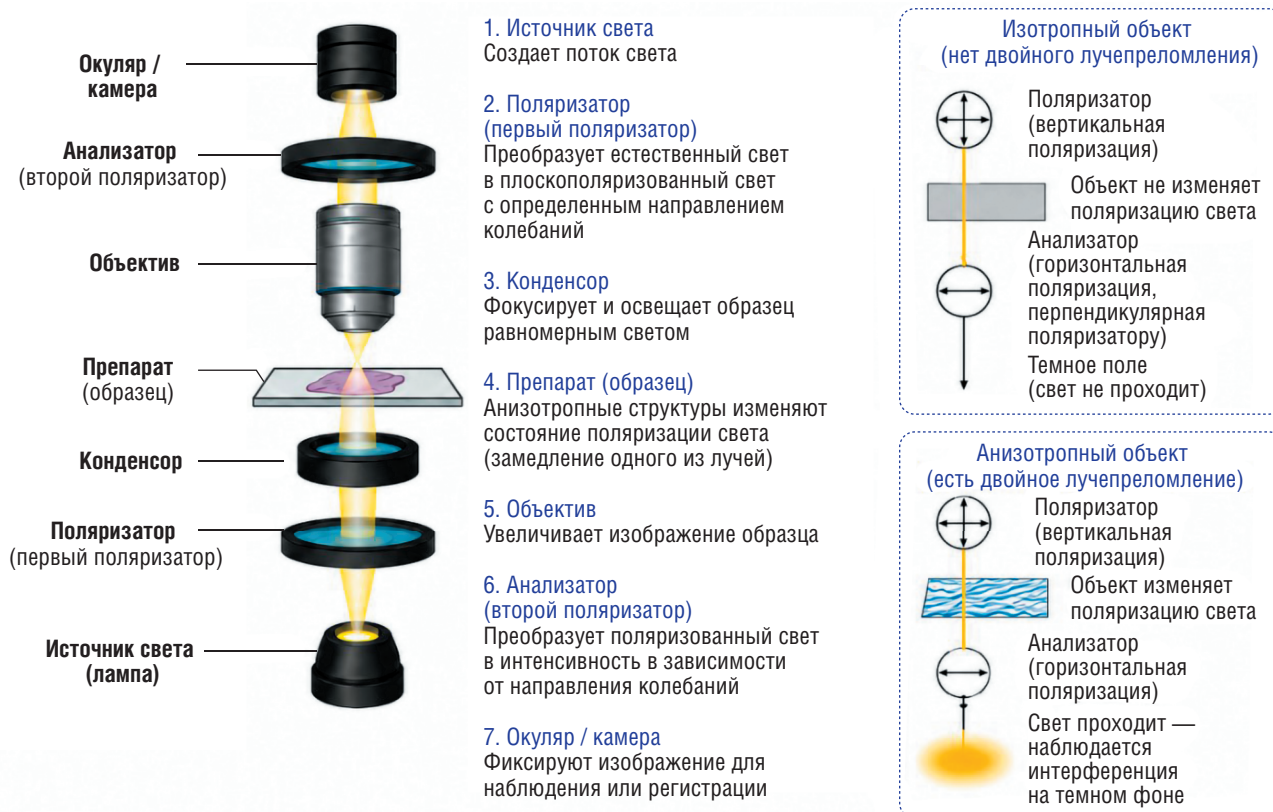
и n_e) и характерно для кристаллических веществ (за исключением кристаллов кубической сингонии), а также для биологических структур с упорядоченной молекулярной архитектурой — коллагеновых волокон, входящих в состав хрящей, сухожилий, костной ткани, роговицы и других биологических тканей, миофибрилл, амилоидных фибрилл и кристаллических депозитов.

Показатель преломления n среды, согласно законам оптики, определяется отношением скорости света в вакууме c к скорости света в данной среде v : $n = c/v$. В оптически изотропных средах эта величина постоянна для всех направлений. В анизотропных средах показатель преломления зависит от направления распространения световой волны и ориентации вектора напряженности электрического поля относительно оптических осей среды [3]. Именно это различие приводит к возникновению разности хода между обыкновенным и необыкновенным лучами, что в конечном счете проявляется интерференционной окраской при наблюдении через анализатор. Данный эффект подчиняется законам преломления света и приобретает особую значимость в контексте биологических объектов с регулярной фибриллярной структурой [4].

ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО МИКРОСКОПА

Конструкция поляризационного микроскопа отличается от оптического наличием двух поляризационных фильтров (призм Николя, или поляроидов): поляризатора, помещаемого под предметным столиком (перед конденсором), и анализатора, устанавливаемого в оптическом тракте между объективом и окуляром. Предметный столик прибора выполнен вращающимся вокруг продольной оси микроскопа на 360° , что позволяет точно ориентировать образец относительно осей поляризаторов. В стандартном режиме работы («скрещенные поляризаторы») плоскости пропускания поляризатора и анализатора ориентированы взаимно перпендикулярно, вследствие чего поле зрения оказывается темным. Принципиальная схема поляризационного микроскопа составлена авторами на основе принципов, изложенных в [5], и представлена на рис. 1.

Если на предметный столик помещен оптически изотропный образец, он не изменяет плоскости поляризации света и анализатор полностью гасит луч — объект остается невидимым. Помещение анизотропного объекта приводит к повороту плоскости поляризации. В результате свет частично проходит через анализатор и объект становится видимым на темном фоне, часто демонстрируя характерные интерференционные цвета (характер интерференционной



При сохранении поляризатора (поляризация) и анализатора (анализ поляризации) анизотропные структуры изменяют фазовую задержку и амплитуду света, что приводит к интерференционным цветам.

Рис. 1. Принципиальная схема поляризационного микроскопа. Световой поток проходит через поляризатор, становится линейно поляризованным и затем взаимодействует с исследуемым образцом. Анизотропные структуры изменяют состояние поляризации света, благодаря чему часть излучения проходит через анализатор и формирует изображение на темном фоне (рисунок составлен авторами)

Fig. 1. The basic scheme of a polarization microscope. The light flux passes through the polarizer, becomes linearly polarized, and then interacts with the sample under study. Anisotropic structures change the state of light polarization, so that a part of the radiation passes through the analyzer and forms an image on a dark background (the figure was compiled by the authors)

окраски зависит от величины оптической задержки, длины волны, толщины образца и его ориентации относительно поляризатора и анализатора).

Для количественного анализа и точного определения знака двойного лучепреломления применяют компенсаторы (пластинка $\lambda/4$, кварцевый клин, компенсатор Берека), вводимые в оптический путь микроскопа. Они позволяют измерять разность хода и устанавливать оптический знак вещества (положительный или отрицательный), что принципиально важно, например, для дифференциальной диагностики типов кристаллов при артритах (рис. 2) [6].

ОГРАНИЧЕНИЯ И УСЛОВИЯ КОРРЕКТНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Достоверность результатов поляризационной микроскопии зависит от качества взятия и подготовки материала, толщины препарата, ориентации исследуемых структур, настройки оптической си-

стемы, спектрального состава освещения вследствие дисперсии двойного лучепреломления, а также от опыта исследователя [7].

При анализе синовиальной жидкости аспирацию следует выполнять до внутрисуставного введения глюкокортикостероидов, поскольку кристаллы лекарственных препаратов могут имитировать патологические включения [8].

Выявление светлых или окрашенных объектов в скрещенных поляризаторах само по себе не является специфическим диагностическим признаком. Двойное лучепреломление могут демонстрировать не только патологические кристаллы и биологические структуры, но и различные экзогенные включения и артефакты, в том числе крахмальные гранулы, некоторые виды шовного материала, хлопковые и бумажные волокна [9–12]. Именно поэтому интерпретация должна учитывать морфологию и локализацию объекта, характер интерференционной окраски, изменение

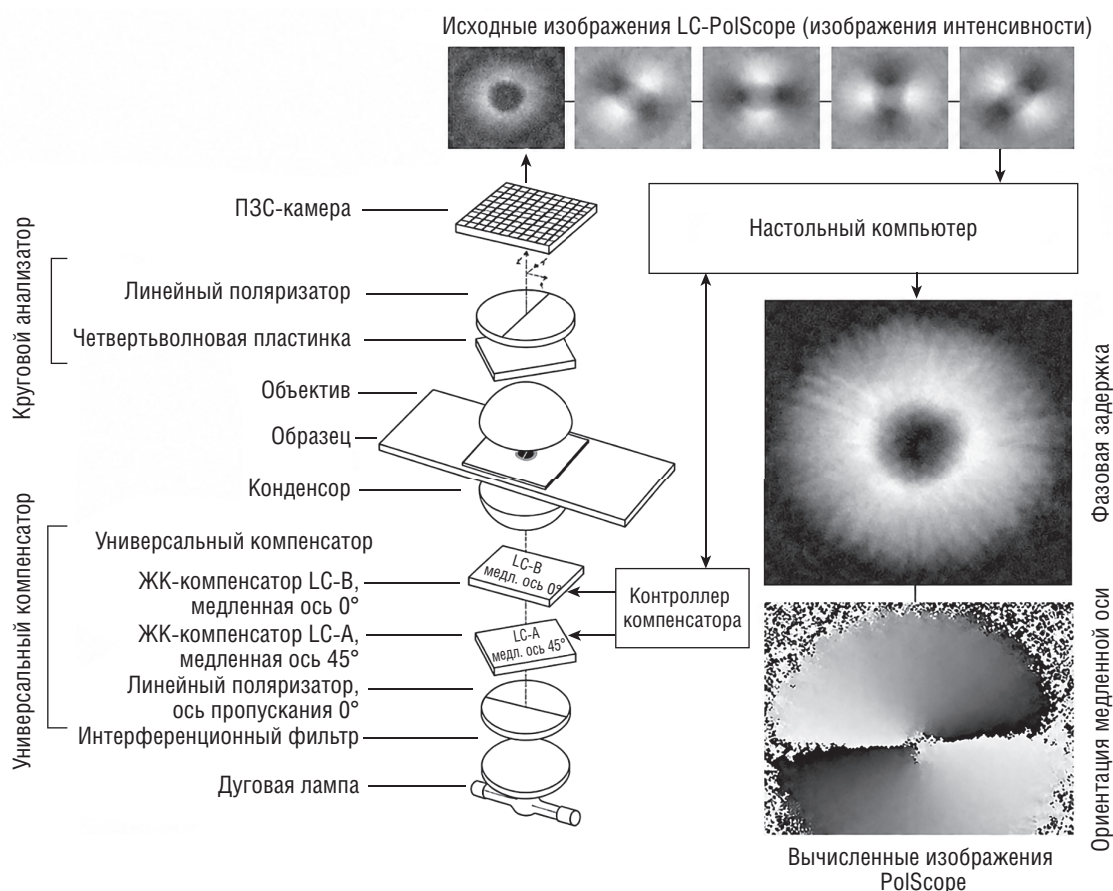


Рис. 2. Схема LC-PolScope для количественной визуализации двойного лучепреломления. Серию изображений интенсивности регистрируют при пяти заданных состояниях поляризации освещения. На основании полученных данных вычисляют пространственные карты оптической задержки и ориентации медленной оптической оси образца. Для измерений используют квазимонохроматическое излучение с ограниченной шириной спектральной полосы [6]

Fig. 2. LC-PolScope system for quantitative birefringence imaging. A series of intensity images is acquired using five predefined polarization states of illumination. The resulting data are used to calculate spatial maps of optical retardance and slow-axis orientation. Quasi-monochromatic illumination with a limited spectral bandwidth is used for the measurements [6]

оптической картины при вращении предметного столика и результаты исследования с компенсатором.

Возможности метода зависят от природы исследуемого вещества. Компенсатор необходим для дифференциации кристаллов моноурата натрия и дигидрата пирофосфата кальция [13], тогда как кристаллы основных фосфатов кальция обычно не выявляются вследствие их субмикроскопического размера и отсутствия двойного лучепреломления [14]. Интерференционные цвета амилоида и коллагена также зависят от толщины, ориентации и организации исследуемых структур и не должны интерпретироваться изолированно [15–19].

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ В МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Поляризационную микроскопию используют в различных областях медико-биологической диа-

гностики, однако информативность метода зависит от природы исследуемого объекта, выраженности оптической анизотропии и корректности подготовки препарата. Основные направления применения метода представлены в табл. 1.

Анализ коллагенового матрикса

Коллагеновые волокна I и III типов являются классическими примерами биологических структур, обладающих выраженным двойным лучепреломлением. Окрашивание пикросириусом красным (Picrosirius red) в сочетании с поляризационной микроскопией позволяет выявлять коллагеновые волокна и оценивать особенности их организации по характеру интерференционной окраски. Данный подход, впервые систематически описанный в работе [17], сохраняет актуальность для гистологического анализа соединительной ткани.

Таблица 1

Основные направления применения поляризационной микроскопии

Table 1

The main applications of polarization microscopy

Объект или метод / Object or method	Возможности метода / Possibilities of the method	Статус и источники / Status and sources	Основные ограничения / Main limitations
Синовиальная жидкость / Synovial fluid	Выявление кристаллов моноурата натрия и дигидрата пирофосфата кальция; дифференциация подагры и пирофосфатной артропатии / Detection of monosodium urate and calcium pyrophosphate dihydrate crystals; differentiation of gout and pyrophosphate arthropathy	Рутинное клиническое применение [8, 13, 14] / Routine clinical use [8, 13, 14]	Зависимость от опыта и пробоподготовки; мелкие и редкие кристаллы могут быть пропущены; основные фосфаты кальция обычно не выявляются / Dependence on experience and sample preparation; small and rare crystals may be missed; basic calcium phosphates are usually not detected
Амилоидные отложения / Amyloid deposits	Подтверждение наличия амилоида после окрашивания Конго красным / Confirmation of the presence of amyloid after Congo red staining	Рутинное гистологическое применение [15] / Routine histological application [15]	Не позволяет типировать амилоид; окраска зависит от толщины среза, ориентации фибрилл и настройки микроскопа / Does not allow typing of amyloid; the coloration depends on the thickness of the slice, the orientation of the fibrils, and microscope settings
Коллагеновый матрикс / Collagen matrix	Оценка ориентации, упорядоченности и плотности упаковки коллагеновых волокон / Evaluation of the orientation, orderliness and packing density of collagen fibers	Дополнительное диагностическое и исследовательское применение [13–15] / Additional diagnostic and research application [13–15]	Интерференционная окраска не является специфичным признаком типа или зрелости коллагена / Interference staining is not a specific indicator of collagen type or maturity
Мышечная ткань / Muscle tissue	Оценка организации миофибрилл и структурной целостности мышечных волокон / Evaluation of myofibril organization and structural integrity of muscle fibers	Исследовательское применение [20] / Research application [20]	Преимущественно экспериментальные модели; отсутствуют критерии для рутинной диагностики / Mainly experimental models; no criteria for routine diagnosis
Высушенная сыворотка крови / Dried blood serum	Анализ кристаллооптических картин, связанных с составом биологической жидкости / Analysis of crystal-optical patterns related to the composition of biological fluid	Исследовательское применение [12] / Research application [12]	Высокая зависимость от условий высушивания и пробоподготовки; недостаточная стандартизация и специфичность / High dependence on drying and sample preparation conditions; insufficient standardization and specificity
Количественные и мультимодальные методы / Quantitative and multimodal methods	Карты оптической задержки и ориентации структур; автоматизированный и химический анализ / Optical delay and structure orientation maps; automated and chemical analysis	Перспективные технологии [6, 19, 21–23] / Promising technologies [6, 19, 21–23]	Требуются специальное оборудование, стандартизация и клиническая валидация / Requires specialized equipment, standardization and clinical validation

Таблица составлена авторами / The table is compiled by the authors

Поляризационная микроскопия предоставляет информацию об ориентации, толщине, плотности упаковки и степени упорядоченности коллагеновых волокон в рубцовой ткани, строме опухолей и сосудистой стенке. Исследования показали, что различные патологические состояния, сопровождающиеся изменением дермального коллагена [18] (дерматофиброма, морфея, склероатрофический

лихен, гипертрофические рубцы и келоиды), демонстрируют характерные модели двойного лучепреломления, что позволяет использовать метод в качестве дополнительного инструмента для дифференциальной диагностики (рис. 3) [19].

Перспективным направлением является количественная оценка организации коллагеновых волокон с помощью жидкокристаллической поляризационной

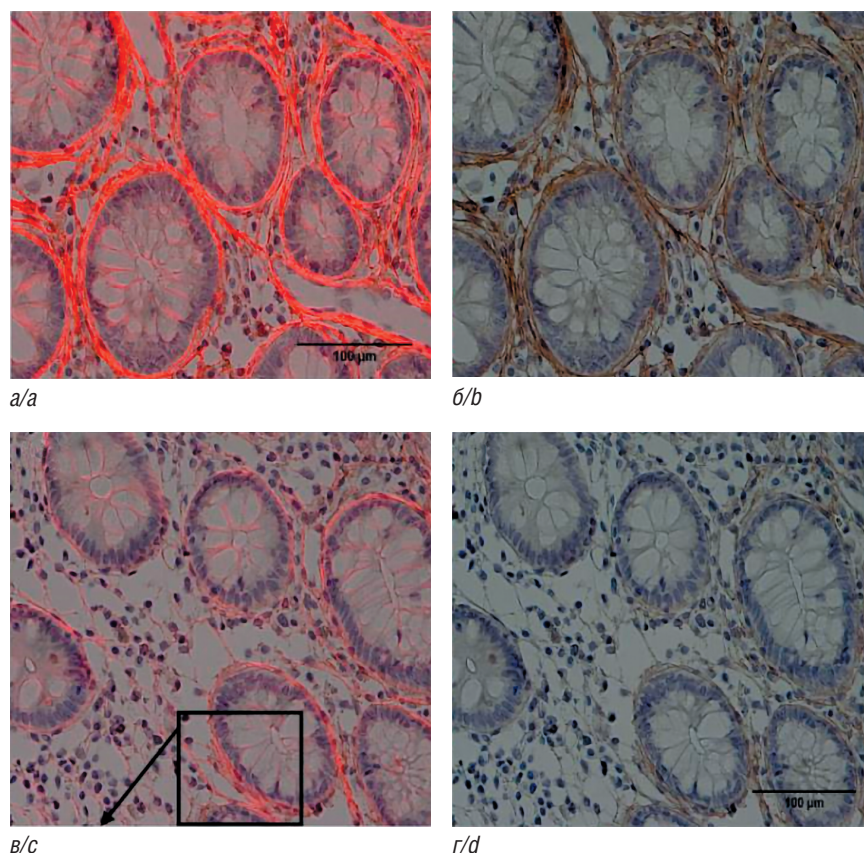


Рис. 3. Обнаружение с помощью PolScope коллагеновых волокон ткани толстой кишки, окрашенных антителами к коллагену I типа. Образец ткани толстой кишки, окрашенный антителами к коллагену I типа, представлен в режиме светлого поля (б), (д) и с наложением изображения PolScope в красном канале на светлое поле (а), (в) [19]

Fig. 3. PolScope detection of collagen fibers in colon tissue stained with antibodies against type I collagen. A colon tissue sample stained with antibodies to type I collagen is shown in bright-field mode (b), (d) and with a PolScope image overlay in the red channel on the bright-field (a), (c) [19]

микроскопии (LC-PolScope), которая представляет собой доступную альтернативу методу генерации второй гармоники (SHG) и демонстрирует хорошую корреляцию с ним при оценке ориентации и степени выравнивания фибриллярного коллагена в гистологических срезах.

Данный подход открывает путь к объективной численной характеристике степени фиброза и архитектоники внеклеточного матрикса.

Диагностика амилоидоза

Амилоидоз — группа заболеваний, связанных с отложением в тканях патологического фибриллярного белка — амилоида. Амилоидные фибриллы представляют собой удлиненные структуры диаметром приблизительно 10–15 нм и длиной несколько микрометров, образующиеся в результате неправильного сворачивания белков. После окраски срезов красителем Конго красным молекулы красителя внедряются в промежутки β -складчатых структур амилоидных фибрилл, создавая молекулярную

упорядоченность и анизотропию диэлектрических свойств, что и порождает двойное лучепреломление.

Окрашенный Конго красным (Congo red) амилоид обладает двойным лучепреломлением при исследовании в поляризационном микроскопе. Традиционно считается, что амилоидные отложения, окрашенные Конго красным, при наблюдении в скрещенных поляризаторах демонстрируют характерную зеленую интерференционную окраску. На протяжении более 50 лет этот признак рассматривался как «золотой стандарт» гистологической верификации амилоидоза. Однако современные исследования [15] показывают, что окраска может включать не только зеленые, но и желтые, оранжевые и синие оттенки, обусловленные особенностями структуры, толщиной и ориентацией амилоидных отложений. Несмотря на это, в клинической практике наблюдаемую картину нередко описывают исключительно как «зеленое двойное лучепреломление», что упрощает реальную оптическую картину и может приводить к ошибочной интерпретации.

Следует отметить, что некоторые одонтогенные образования, например кальцифицирующая одонтогенная киста и опухоль Пиндборга, могут содержать участки, положительно окрашивающиеся Конго красным, но не дающие характерной зеленой интерференционной окраски при исследовании в поляризованном свете. Это требует особой осторожности при интерпретации результатов.

Дифференциальная диагностика кристаллических артритов

Кристаллические артропатии (артриты) — группа заболеваний, чаще всего встречающихся у лиц пожилого возраста, обусловленных отложением в суставах и периартикулярных тканях различных кристаллов: моноурата натрия (подагра), дигидрата пирофосфата кальция (псевдоподагра), основных фосфатов кальция и других (оксалаты, липиды, холестерин). Несмотря на сходный патогенез, подходы к лечению каждого из кристаллических артритов существенно различаются, что делает своевременную дифференциальную диагностику принципиально важной.

Исследование нативной синовиальной жидкости под поляризационным микроскопом с компенсатором признано «золотым стандартом» диагностики подагры и псевдоподагры [8]. Кристаллы моноурата натрия при подагре имеют игловидную форму, могут располагаться внутриклеточно и демонстрируют сильное отрицательное двойное лучепреломление. При исследовании в поляризационном микроскопе с компенсатором они «гаснут» (сливаются с цветом фона), когда длинная ось кристалла ориентирована параллельно одной из осей пропускания скрещенных поляризаторов. При ориентации параллельно оси красного компенсатора первого порядка кристаллы урата приобретают желтую интерференционную окраску (отрицательный оптический признак [13]).

Кристаллы дигидрата пирофосфата кальция при псевдоподагре демонстрируют слабое положительное двойное лучепреломление. Они, как правило, мельче кристаллов уратов, чаще располагаются внутри фаголизосом и дают менее яркие цвета, что может затруднять их обнаружение.

Метод компенсированной поляризационной микроскопии (compensated polarized light microscopy, CPLM) имеет ряд ограничений, включая недостаточную чувствительность при обнаружении мелких и редко расположенных кристаллов, трудности их дифференциации от артефактов и загрязнений, а также зависимость результатов от опыта исследователя. Одним из перспективных направлений является полихроматическая поляризационная микроскопия (polychromatic polarization microscopy,

PPM), позволяющая выявлять двулучепреломляющие частицы с низкой оптической задержкой независимо от ориентации их медленной оптической оси, что потенциально повышает чувствительность исследования [21]. В отличие от традиционной поляризационной микроскопии, при которой слабо двулучепреломляющие объекты могут иметь низкий контраст, метод PPM формирует цветокодированное изображение: цветовой тон зависит от ориентации медленной оптической оси объекта, а характеристики окраски связаны с величиной оптической задержки.

Исследование мышечной ткани

У мышечных волокон наблюдается оптическая анизотропия. Само название «поперечнополосатые скелетные мышцы» связано с различием оптических свойств отдельных участков мышечного волокна. Исследование мышечного волокна в поляризованном свете показывает, что оно состоит из чередующихся более темных анизотропных участков, обладающих двойным лучепреломлением, и более светлых изотропных участков, что формирует характерный поперечнополосатый рисунок. Это явление используют для оценки степени повреждения миофибрилл при миопатиях и в экспериментальных исследованиях физиологии мышц.

Кристаллооптическое исследование сыворотки крови

Перспективным направлением является применение поляризационной микроскопии для экспресс-диагностики метаболических нарушений путем кристаллооптического исследования структур сыворотки крови. При контролируемом высушивании капли сыворотки крови между двумя изотропными пластинами и последующем исследовании в поляризованном свете выявляют специфические кристаллические структуры, характерные для различных типов метаболических расстройств: веерообразные дендриты указывают на гипероксалурию, друзы и дендритоподобные сферолиты — на гиперкреатининемию, оолитовые сферолиты — на гиперкальциемию, мелкозернистые частицы — на гиперглицинемию, перистые лучи — на гиперурикемию, крестообразные сферолиты — на гиперхолестерининемию [16]. Данный метод позволяет улучшить контроль над типом метаболического нарушения и может использоваться в экспресс-диагностике предпатологии и патологии обмена веществ. В дальнейшем для постановки более точного окончательного диагноза следует провести другие лабораторные тесты сыворотки крови.

Поляризационную микроскопию также применяют для выявления инородных включений и исследования других оптически анизотропных биологических структур [24].

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Современное развитие поляризационной микроскопии связано с интеграцией методов машинного обучения и искусственного интеллекта для автоматического анализа изображений, что значительно повышает объективность и скорость диагностики. Мюллер-матричная поляриметрия и поляризационно-чувствительная оптическая когерентная томография расширяют возможности количественной оценки анизотропных свойств биологических тканей *in vivo* [1, 2].

Активно развиваются подходы, сочетающие атомно-силовую микроскопию с поляризационной микроскопией для точной локализации участков фиброза на основе двойного лучепреломления коллагеновых волокон с последующим измерением локальных упругих модулей ткани. Поляризационную визуализацию в сочетании с традиционной микро-

скопией используют для построения интерпретируемых моделей машинного обучения, способных обеспечить количественную диагностику предраковых поражений, например поражений шейки матки [1].

Кроме того, разработка новых компенсаторов с высоким пространственным разрешением и автоматизированных систем сканирования позволяет проводить картирование двулучепреломления по всей площади гистологического среза, что открывает путь к созданию «оптических биомаркеров» для оценки тяжести фиброза печени, почек и миокарда (рис. 4) [22].

Одним из перспективных направлений является интеграция поляризационной микроскопии с рамановской спектроскопией для анализа синовиальной жидкости. Поляризационная микроскопия позволяет быстро обнаружить кристаллы и оценить их морфологию, тогда как рамановская спектроскопия дает информацию об их химическом составе. Такой комбинированный подход может повысить объективность диагностики подагры и пирофосфатной артропатии, особенно в случае мелких, слабо двулучепреломляющих или трудно различимых кристаллов. В современных исследованиях рамановскую спектроскопию,

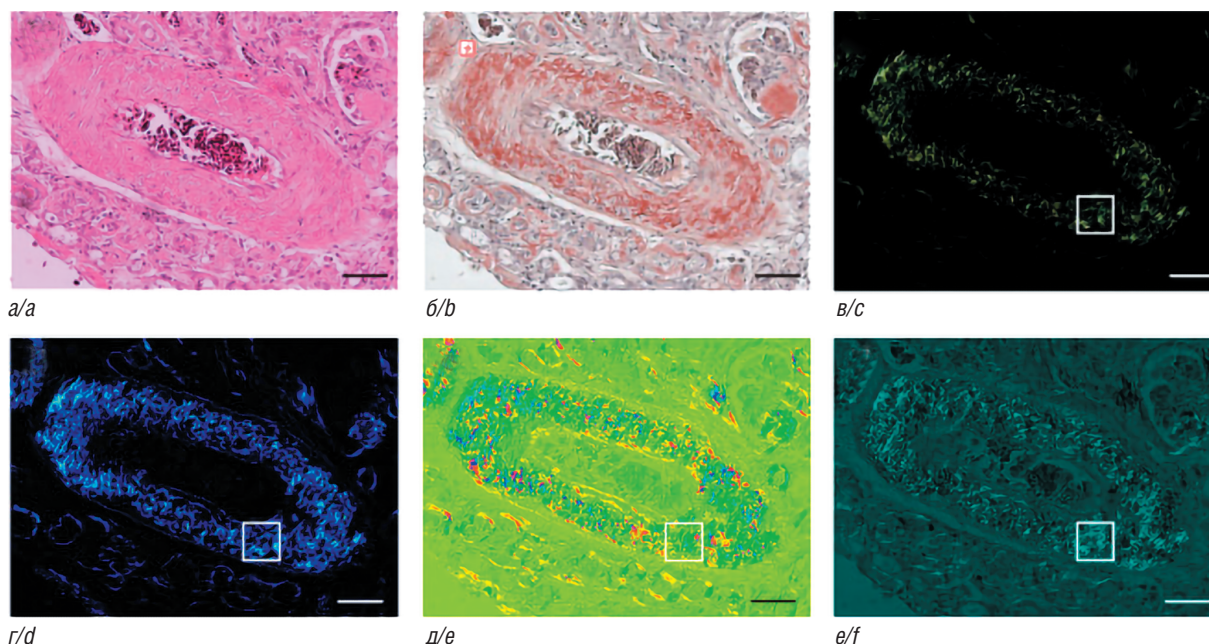


Рис. 4. Визуализация двойного лучепреломления и дихроизма почечных артерий: *a* — изображение соседних патологических срезов, окрашенных гематоксилином и эозином; *b* — изображение, окрашенное Конго красным (без анализатора); *c* — наблюдение окраски Конго красным в скрещенных николях при $\theta=0^\circ$; двумерное распределение (*d*) оптической задержки, (*e*) азимутального угла и (*f*) дихроизма, рассчитанное с использованием распределения интенсивности зеленого спектрального диапазона. Масштабные линейки на изображениях (*a–e*) соответствуют 50 мкм [22]

Fig. 4. Birefringence and dichroism imaging of renal arteries: *a* — image of adjacent pathological sections stained with hematoxylin and eosin; *b* — Congo red-stained image (without analyzer); *c* — observation of Congo red staining in crossed nicols at $\theta=0^\circ$; two-dimensional distribution of (*d*) retardance, (*e*) azimuthal angle, and (*f*) dichroism, calculated using the intensity distribution of the green spectral band. The scale bars in the images (*a–f*) correspond to 50 μm [22]

интегрированную с поляризационной микроскопией, рассматривают как технологию следующего поколения для анализа синовиальной жидкости [23].

В поляризационном птихографическом микроскопе без линз (PS-PtychoLM) используются поляризационный датчик изображения с оптической модуляцией по маске и светодиодная подсветка. Птихографическое восстановление фазы позволяет получать изображения высокого разрешения различных прозрачных анизотропных объектов с двойным лучепреломлением, в том числе кристаллов урата натрия и миокарда мыши [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, поляризационная микроскопия представляет собой информативный и экономически доступный метод исследования, основанный на фундаментальных законах физики твердого тела и волновой оптики. Для диагностики подагры, пирофосфатной артропатии и амилоидоза данный метод действительно может рассматриваться как «золотой стандарт» при условии строгого соблюдения правил пробоподготовки, использования компенсатора и учета его диагностических ограничений. Понимание физической природы двойного лучепреломления и конструктивных особенностей микроскопа позволяет клиницисту и исследователю извлекать максимум информации из на первый взгляд простого оптического изображения. Дальнейшее развитие технологий поляризационной микроскопии, включая ее интеграцию с методами машинного обучения и мультимодальной визуализации, открывает новые горизонты для количественной оценки патологических изменений в тканях и совершенствования диагностических протоколов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. All authors made substantial contributions to the conception of the study; the acqui-

sition, analysis, and interpretation of data; the drafting and revision of the article; and the final approval of the version to be published. All authors agree to be accountable for all aspects of the study.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. This study was not supported by any external sources of funding.

ЛИТЕРАТУРА

1. He C., He H., Chang J. et al. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light Sci Appl.* 2021;10(1):194. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00639-x>.
2. Optical Polarimetric Modalities for Biomedical Research. N. Mazumder, Y.V. Kistenev, E. Borisova, Shama Prasada K., eds. Springer; 2023. 452 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-31852-8>.
3. de Boer J.F., Hitzenberger C.K., Yasuno Y. Polarization sensitive optical coherence tomography — a review. *Biomedical Optics Express.* 2017;8(3):1838–1873. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.001838>.
4. van Turnhout M.C., Kranenbarg S., van Leeuwen J.L. Modeling optical behavior of birefringent biological tissues for evaluation of quantitative polarized light microscopy. *Journal of Biomedical Optics.* 2009;14(5):054018. <https://doi.org/10.1117/1.3241986>.
5. Oldenbourg R. Polarized light microscopy: principles and practice. *Cold Spring Harbor Protocols.* 2013;2013(11):1023–1036. <https://doi.org/10.1101/pdb.top078600>.
6. Mehta S.B., Shribak M., Oldenbourg R. Polarized light imaging of birefringence and diattenuation at high resolution and high sensitivity. *Journal of Optics.* 2013;15(9):094007. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/9/094007>.
7. Канюков В.Н., Стадников А.А., Трубина О.М., Стрекаловская А.Д. Методы исследования в биологии и медицине. Оренбург: ОГУ; 2013. 192 с.
8. Нестерович И.И., Ночевная К.В., Минеев В.Н. Поляризационная микроскопия синовиальной жидкости как «золотой стандарт» дифференциальной диагностики кристаллических артритов. *Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения.* 2012;7(1):438–439. EDN: SHNBTL.
9. Jadhav K.B., Gupta N., Ahmed M.B.R. Maltese cross: Starch artifact in oral cytology, divulged through polarized microscopy. *Journal of Cytology.* 2010;27(1):40–41. <https://doi.org/10.4103/0970-9371.66698>.
10. Kardam P., Jain K., Mehendiratta M., Mathias Y. Kaleidoscope of oral artifacts: A vivid picture through light and polarizing microscope. *Indian Journal of Pathology and Microbiology.* 2016;59(1):31–34. <https://doi.org/10.4103/0377-4929.178218>.
11. Perino G., Sunitsch S., Huber M. et al. Diagnostic guidelines for the histological particle algorithm in the periprosthetic neosynovial tissue. *BMC Clinical Pathology.* 2018;18:7. <https://doi.org/10.1186/s12907-018-0074-3>.

12. Grover S., Naik R., Jayadeva H.M., Ahmed M.B.R. Suture artefacts: Explored through polarising microscope. *Sultan Qaboos University Medical Journal*. 2012;12(2):247–248. <https://doi.org/10.18295/2075-0528.1374>.
13. Елисеев М.С., Барскова В.Г. Современные принципы диагностики и лечения подагры. *Русский медицинский журнал*. 2007;15(26):1984–1986.
14. Zell M., Zhang D., FitzGerald J. Diagnostic advances in synovial fluid analysis and radiographic identification for crystalline arthritis. *Current Opinion in Rheumatology*. 2019;31(2):134–143. <https://doi.org/10.1097/BOR.0000000000000582>.
15. Howie A.J. Origins of a pervasive, erroneous idea: The “green birefringence” of Congo red-stained amyloid. *International Journal of Experimental Pathology*. 2019;100(4):208–221. <https://doi.org/10.1111/iep.12330>.
16. Савина Л.В., Павлищук С.А., Самсыгин В.Ю. и др. Поляризационная микроскопия в диагностике обменных нарушений. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2003;(3):11–13. EDN: OIWGFT.
17. Junqueira L.C., Cossermelli W., Brentani R. Differential staining of collagens type I, II and III by Sirius Red and polarization microscopy. *Archivum Histologicum Japonicum*. 1978;41(3):267–274. <https://doi.org/10.1679/aohc1950.41.267>.
18. Elbendary A., Valdebran M., Parikh K., Elston D.M. Polarized Microscopy in Lesions With Altered Dermal Collagen. *The American Journal of Dermatopathology*. 2016;38(8):593–597. <https://doi.org/10.1097/DAD.0000000000000550>.
19. Keikhosravi A., Liu Yu., Drifka C., Woo K. et al. Quantification of collagen organization in histopathology samples using liquid crystal based polarization microscopy. *Biomedical Optics Express*. 2017;8(9):4243–4256. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.004243>.
20. Smith L.L., Beggs A.H., Gupta V.A. Analysis of skeletal muscle defects in larval zebrafish by birefringence and touch-evoked escape response assays. *Journal of Visualized Experiments*. 2013;(82):e50925. <https://doi.org/10.3791/50925>.
21. Jum'ah H., Shribak M., Keikhosravi A. et al. Detection of crystals in joint fluid aspirates with polychromatic polarization microscopy. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 2023;82(11):1501–1502. <https://doi.org/10.1136/ard-2023-224331>.
22. Wakayama T., Yokouchi S., Kayano H., Higashiguchi T. Shadowless amyloid imaging with quantitative birefringence contrast. *Scientific Reports*. 2025;15:28776. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11795-0>.
23. Niessink T., Giesen T., Efde M. et al. Test characteristics of Raman spectroscopy integrated with polarized light microscopy for the diagnosis of acute gouty arthritis. *Joint Bone Spine*. 2023;90(6):105611. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2023.105611>.
24. Колтовой Н.А. Поляризационная микроскопия в диагностике биологических объектов. *Фотоника*. 2011;(6):46–49. <https://www.photonics.su/journal/article/3075>.
25. Kim J., Song S., Kim H. et al. Ptychographic lens-less birefringence microscopy using a mask-modulated polarization image sensor. *Scientific Reports*. 2023;13(1):19263. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46496-z>.

REFERENCES

1. He C., He H., Chang J. et al. Polarisation optics for biomedical and clinical applications: a review. *Light Sci Appl*. 2021;10(1):194. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00639-x>.
2. Optical Polarimetric Modalities for Biomedical Research. N. Mazumder, Y.V. Kistenev, E. Borisova, Shama Prasada K., eds. Springer; 2023. 452 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-31852-8>.
3. de Boer J.F., Hitzenberger C.K., Yasuno Y. Polarization sensitive optical coherence tomography — a review. *Biomedical Optics Express*. 2017;8(3):1838–1873. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.001838>.
4. van Turnhout M.C., Kranenbarg S., van Leeuwen J.L. Modeling optical behavior of birefringent biological tissues for evaluation of quantitative polarized light microscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 2009;14(5):054018. <https://doi.org/10.1117/1.3241986>.
5. Oldenbourg R. Polarized light microscopy: principles and practice. *Cold Spring Harbor Protocols*. 2013;2013(11):1023–1036. <https://doi.org/10.1101/pdb.top078600>.
6. Mehta S.B., Shribak M., Oldenbourg R. Polarized light imaging of birefringence and diattenuation at high resolution and high sensitivity. *Journal of Optics*. 2013;15(9):094007. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/15/9/094007>.
7. Kanyukov V.N., Stadnikov A.A., Trubina O.M., Strekalovskaya A.D. Research Methods in Biology and Medicine. Orenburg: Orenburg State University; 2013. 192 p. (In Russ.).
8. Nesterovich I.I., Nochivnaya K.V., Mineev V.N. Polarization microscopy of synovial fluid as the “Gold standard” of differential diagnosis of crystalline arthritis. *Zdorov'ye — Osnova Chelovecheskogo Potentsiala: Problemy i Puti Ikh Resheniya*. 2012;7(1):438–439. (In Russ.). EDN: SHNBTL.
9. Jadhav K.B., Gupta N., Ahmed M.B.R. Maltose cross: Starch artifact in oral cytology, divulged through polarized microscopy. *Journal of Cytology*. 2010;27(1):40–41. <https://doi.org/10.4103/0970-9371.66698>.
10. Kardam P., Jain K., Mehendiratta M., Mathias Y. Kaleidoscope of oral artifacts: A vivid picture through light and polarizing microscope. *Indian Journal of Pathology and Microbiology*. 2016;59(1):31–34. <https://doi.org/10.4103/0377-4929.178218>.
11. Perino G., Sunitich S., Huber M. et al. Diagnostic guidelines for the histological particle algorithm in the periprosthetic neo-synovial tissue. *BMC Clinical Pathology*. 2018;18:7. <https://doi.org/10.1186/s12907-018-0074-3>.
12. Grover S., Naik R., Jayadeva H.M., Ahmed M.B.R. Suture artefacts: Explored through polarising microscope. *Sultan Qaboos University Medical Journal*. 2012;12(2):247–248. <https://doi.org/10.18295/2075-0528.1374>.
13. Eliseev M.S., Barskova V.G. Modern principles of diagnosis and treatment of gout. *Russian Medical Journal*. 2007;15(26):1984–1986. (In Russ.).

14. Zell M., Zhang D., FitzGerald J. Diagnostic advances in synovial fluid analysis and radiographic identification for crystal-line arthritis. *Current Opinion in Rheumatology*. 2019;31(2): 134–143. <https://doi.org/10.1097/BOR.0000000000000582>.
15. Howie A.J. Origins of a pervasive, erroneous idea: The “green birefringence” of Congo red-stained amyloid. *International Journal of Experimental Pathology*. 2019;100(4):208–221. <https://doi.org/10.1111/iep.12330>.
16. Savina L.V., Pavlishchuk S.A., Samsygin V.Yu. et al. Polarization microscopy in the diagnosis of metabolic disorders. *Clinical Laboratory Diagnostics*. 2003;(3):11–13. (In Russ.). EDN: OIWGFT.
17. Junqueira L.C., Cossermelli W., Brentani R. Differential staining of collagens type I, II and III by Sirius Red and polarization microscopy. *Archivum Histologicum Japonicum*. 1978; 41(3):267–274. <https://doi.org/10.1679/aohc1950.41.267>.
18. Elbendary A., Valdebran M., Parikh K., Elston D.M. Polarized Microscopy in Lesions With Altered Dermal Collagen. *The American Journal of Dermatopathology*. 2016;38(8):593–597. <https://doi.org/10.1097/DAD.0000000000000550>.
19. Keikhosravi A., Liu Yu., Drifka C., Woo K. et al. Quantification of collagen organization in histopathology samples using liquid crystal based polarization microscopy. *Biomedical Optics Express*. 2017;8(9):4243–4256. <https://doi.org/10.1364/BOE.8.004243>.
20. Smith L.L., Beggs A.H., Gupta V.A. Analysis of skeletal muscle defects in larval zebrafish by birefringence and touch-evoked escape response assays. *Journal of Visualized Experiments*. 2013;(82):e50925. <https://doi.org/10.3791/50925>.
21. Jum'ah H., Shribak M., Keikhosravi A. et al. Detection of crystals in joint fluid aspirates with polychromatic polarization microscopy. *Annals of the Rheumatic Diseases*. 2023;82(11):1501–1502. <https://doi.org/10.1136/ard-2023-224331>.
22. Wakayama T., Yokouchi S., Kayano H., Higashiguchi T. Shadowless amyloid imaging with quantitative birefringence contrast. *Scientific Reports*. 2025;15:28776. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11795-0>.
23. Niessink T., Giesen T., Efde M. et al. Test characteristics of Raman spectroscopy integrated with polarized light microscopy for the diagnosis of acute gouty arthritis. *Joint Bone Spine*. 2023;90(6):105611. <https://doi.org/10.1016/j.jbspin.2023.105611>.
24. Koltovoi N.A. Polarization microscopy in the diagnostics of biological objects. *Photonics*. 2011;(6):46–49. <https://www.photonics.su/journal/article/3075>. (In Russ.).
25. Kim J., Song S., Kim H. et al. Ptychographic lens-less birefringence microscopy using a mask-modulated polarization image sensor. *Scientific Reports*. 2023;13(1):19263. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46496-z>.

ОБ АВТОРАХ

Татьяна Юрьевна Яковлева — к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры медицинской биофизики и физики. E-mail: yakovtat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7317-9254>; SPIN: 7152-1204

Александр Викторович Бармасов — к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры медицинской биофизики и физики, Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; доцент кафедры общей физики 2, Санкт-Петербургский государственный университет. E-mail: barmasov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7356-8903>; SPIN: 6452-2860

✉ **Анна Михайловна Бармасова** — старший преподаватель кафедры медицинской биофизики и физики. E-mail: abarmasova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0521-5337>; SPIN: 4538-1150

Татьяна Сергеевна Демьянова — к.ф.-м.н., старший преподаватель кафедры медицинской биофизики и физики. E-mail: demyanovats@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2146-9037>; SPIN: 8383-8789

Анастасия Андреевна Зуйкова — ассистент кафедры медицинской биофизики и физики. E-mail: a-zuykova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8905-0467>; SPIN: 5602-6598

Ангелина Владимировна Семёнова — студентка 2-го курса педиатрического факультета. E-mail: angelinasemenova801@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-8408-9533>; SPIN: 1651-0252

AUTHORS' INFO

Tatiana Yu. Yakovleva — Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Biophysics and Physics. E-mail: yakovtat@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7317-9254>; SPIN: 7152-1204

Alexander V. Barmasov — Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Biophysics and Physics; Associate Professor of the Department of General Physics 2, Saint Petersburg State University. E-mail: barmasov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7356-8903>; SPIN: 6452-2860

✉ **Anna M. Barmasova** — Senior Lecturer at the Department of Medical Biophysics and Physics. E-mail: abarmasova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0521-5337>; SPIN: 4538-1150

Tatiana S. Demyanova — Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Lecturer of the Department of Medical Biophysics and Physics. E-mail: demyanovats@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-2146-9037>; SPIN: 8383-8789

Anastasia A. Zuikova — Assistant Professor of the Department of Medical Biophysics and Physics. E-mail: a-zuykova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8905-0467>; SPIN: 5602-6598

Angelina V. Semenova — 2nd-year student of the Faculty of Pediatrics. E-mail: angelinasemenova801@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-8408-9533>; SPIN: 1651-0252