



<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-107-114>

Инфракрасная визуализация морфологических стадий регматогенной отслойки сетчатки

В.В. Нероев^{1,2}, С.В. Милаш¹✉, Н.В. Нероева¹, О.В. Зайцева^{1,2}, А.И. Ушаков¹,
Г.Ю. Захарова¹, О.А. Уткина¹, А.Г. Бриллиантова¹

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, ул. Долгоруковская, д. 4, Москва, 127006, Россия

Цель работы — изучить особенности инфракрасной (ИК) визуализации при регматогенной отслойке сетчатки (РОС) в зависимости от морфологических стадий изменений ее наружных слоев. **Материал и методы.** В исследование включены 60 пациентов (60 глаз) с первичной дисрегулируемой, прогрессирующей РОС (32 женщины и 28 мужчин; средний возраст — $46,7 \pm 13,3$ года). Перед операцией все пациенты проходили стандартное офтальмологическое обследование. Дополнительно всем пациентам проводилась диагностика на мультимодальной ультраширокопольной платформе Mirante (Nidek, Япония) с параллельной регистрацией ИК-изображений и сканов структурной оптической когерентной томографии (ОКТ), фиксирующих стадийные изменения нейроэпителия при РОС. ОКТ-сканирование выполняли от области разрыва до границ отслойки сетчатки с определением каждой стадии. Далее сопоставляли полученные данные ОКТ с ИК-изображениями. **Результаты.** Методом ИК-визуализации описаны последовательные морфологические изменения наружных слоев сетчатки при дисрегулируемой РОС. В ИК-свете стадии РОС характеризуются: 1–2-я стадии не различались между собой и визуализировались как гипорефлективная область, менее выраженная, чем на 3-й и 4-й стадиях; 3-я стадия — гипорефлективный фон с различными по высоте и амплитуде, хаотично расположенными, четко очерченными гиперрефлективными складками; 4-я стадия — выраженная гипорефлективность без видимых складок; 5а стадия — на гиперрефлективном фоне пятнистый рисунок («изъеденная молью сетчатка»), чередование гипо- (утолщенные фоторецепторы) и гиперрефлективных (потеря фоторецепторов) зон; 5б стадия — выраженная зона гиперрефлективности с отчетливыми границами. **Заключение.** Методом ИК-визуализации выявлены характерные диагностические признаки стадийных морфологических изменений нейроэпителия после РОС, коррелирующие с данными ОКТ. Полученные результаты подтверждают клиническую значимость ИК-офтальмоскопии в оценке структурных изменений сетчатки, расширяющей диагностические возможности ИК-визуализации при диагностике и мониторинге пациентов с РОС.

Ключевые слова: регматогенная отслойка сетчатки; инфракрасная визуализация; стадии отслойки сетчатки; ультраширокое поле; мультимодальная визуализация; оптическая когерентная томография

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Нероев В.В., Милаш С.В., Нероева Н.В., Зайцева О.В., Ушаков А.И., Захарова Г.Ю., Уткина О.А., Бриллиантова А.Г. Инфракрасная визуализация морфологических стадий регматогенной отслойки сетчатки. Российский офтальмологический журнал. 2026; 19 (1): 107-14. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-107-114>

Infrared imaging of the morphological stages of rhegmatogenous retinal detachment

Vladimir V. Neroev^{1,2}, Sergei V. Milash¹✉, Natalia V. Neroeva¹, Olga V. Zaytseva^{1,2}, Alexander I. Ushakov¹, Galina Yu. Zakharova¹, Olga A. Utkina¹, Angelina G. Brilliantova¹

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

² Russian University of Medicine, Dolgorukovskaya St., 4, Moscow, 127006, Russia

sergey_milash@yahoo.com

Purpose of this study is to investigate the features of infrared (IR) imaging in rhegmatogenous retinal detachment (RRD) depending on the morphological stages of changes in the outer layers of the retina. **Material and methods.** The study included 60 patients (60 eyes) with primary dysregulated, progressive RRD (32 women and 28 men; mean age 46.7 ± 13.3 years). Before surgery all patients underwent a standard ophthalmological examination. As an additional diagnostic method, a study was performed on a Mirante device (Nidek, Japan) with parallel registration of IR images and structural optical coherence tomography (OCT) scans that record the stage-by-stage changes in the neuroepithelium during RRD. OCT scans were performed from the area of the tear to the boundaries of the retinal detachment, with each stage being determined. The obtained OCT data were then compared with the IR images. **Results.** IR-imaging was used to describe sequential morphological changes in the outer retinal layers in dysregulated RRD. In IR light, the stages of RRD are characterized by: stages 1–2 — they had no distinguishing features among themselves and were visualized as a hyporeflective area, less expressed than in stages 3 and 4; stage 3 — a hyporeflective background with different heights and amplitudes, randomly arranged, clearly outlined hyperreflective folds; stage 4 — expressed hyperreflectivity without visible folds; stage 5a — a spotted pattern (“moth-eaten retina”) on a hyperreflective background, alternating hypo — (thickened photoreceptors) and hyperreflective (loss of photoreceptors) zones. Stage 5b is an expressed hyperreflective zone with distinct boundaries. **Conclusions.** IR-imaging revealed characteristic diagnostic signs of stage morphological changes of neuroepithelium after RRD, correlated with the OCT. The obtained results confirm the clinical significance of IR ophthalmoscopy in assessing structural changes of the retina, expanding the diagnostic capabilities of IR-imaging in the diagnosis and monitoring of patients with RRD.

Keywords: rhegmatogenous retinal detachment; infrared imaging; stages of retinal detachment; ultra-wide field; multimodal visualization; optical coherence tomography

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Neroev V.V., Milash S.V., Neroeva N.V., Zaytseva O.V., Ushakov A.I., Zakharova G.Yu., Utkina O.A., Brilliantova A.G. Infrared imaging of the morphological stages of rhegmatogenous retinal detachment. Russian ophthalmological journal. 2026; 19 (1): 107-114 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2026-19-1-107-114>

Регматогенная отслойка сетчатки (РОС) остается одной из наиболее угрожающих зрению патологий, требующей своевременного хирургического вмешательства для достижения оптимальных функциональных результатов [1].

На сегодняшний день анамнез продолжительности потери центрального зрения у пациента является определяющим фактором при принятии решения о срочности хирургического лечения, однако он не всегда отражает фактическую длительность отслойки сетчатки в макуле и структурные изменения в нейросенсорной сетчатке. Пациент может в течение какого-то времени не замечать снижения центрального зрения одного из глаз либо, напротив, принимать за снижение зрения усиление плавающих помутнений в поле зрения, сопутствующих РОС на периферии глазного дна [2]. Решение о срочности хирургического лечения при РОС с захватом макулярной области, основанное только на данных анамнеза пациента, не гарантирует точность оценки структурных изменений нейроэпителия макулярной зоны и функционального прогноза.

Определение сроков хирургического вмешательства должно основываться не на субъективных симптомах пациента или длительности их проявления, а на объективных результатах визуализации, дающих четкую картину исходного анатомического состояния сетчатки.

Многочисленные исследования подтвердили ценность оптической когерентной томографии (ОКТ) в оценке РОС, благодаря чему метод прочно вошел в рутинную практику пред- и послеоперационного наблюдения [3]. Современные исследования, основанные на данных ОКТ, позволили идентифицировать важные биомаркеры, достоверно прогнозирующие послеоперационные зрительные исходы при РОС, что легло в основу новой перспективной морфологической системы стадирования I. Melo и соавт. [4]. Авторы *in vivo* с помощью ОКТ описали 5 воспроизводимых объективных стадий последовательных структурных изменений в наружных слоях сетчатки с течением времени при дисрегулируемой РОС. Первая стадия определяется как отделение нейроэпителия от пигментного эпителия сетчатки без видимых изменений в слое фоторецепторов; на 2-й стадии слой фоторецепторов утолщается и визуализируется в виде однородной гиперрефлективной линии; 3-я стадия характеризуется образованием складок наружных слоев сетчатки (СНСС) и подразделяется на 2 подстадии: 3a — низкочастотные, низкоамплитудные и 3b — высокочастотные, высокоамплитудные; на 4-й стадии происходит дальнейшая прогрессирующая потеря четкости СНСС, бациллярный слой значительно утолщен, возможно появление множества гиперрефлективных точек; 5-я стадия характеризуется очаговой («изъеденная молью»

сетчатка») или полной потерей фоторецепторов («голая» наружная пограничная мембрана). Описанные стадии на ОКТ коррелировали с предыдущими экспериментальными исследованиями на животных, где были показаны последовательные гистологические изменения в разные сроки после хирургически вызванной РОС [5–7].

Клиническая значимость представленной классификации заключается в ее способности прогнозировать послеоперационную максимальную корригируемую остроту зрения (МКОЗ) и определять оптимальные подходы к лечению и сроки проведения операции [8, 9]. Более продвинутая исходная стадия изменений нейроэпителлия связана с худшими функциональными и анатомическими результатами после лечения [8, 9].

Несмотря на высокую информативность ОКТ, проведение этого исследования у пациентов с РОС сопряжено с существенными техническими трудностями. К основным проблемам относятся: плохая фиксация взора пациента, возникновение артефактов (чаще зеркальный артефакт), сложности с фокусировкой и получением качественных изображений, а также снижение прозрачности оптических сред. Эти факторы требуют участия в визуализации опытного оператора и значительных временных затрат для получения достоверных данных. Еще большие диагностические проблемы вызывает ОКТ периферических отделов отслойки. Оценка структурных изменений наружных слоев сетчатки по стадиям на периферии также может оказаться полезной для выбора тактики хирургического лечения РОС.

Инфракрасная (ИК) визуализация с использованием широкопольной и ультраширокопольной оптики — один из описанных в литературе методов, который может быть полезен при обследовании и мониторинге пациентов с РОС [10–14]. Данный метод визуализации обладает важными преимуществами для клинической практики. Он является неинвазивным и бесконтактным, что повышает комфорт пациента и сокращает время обследования. В отличие от традиционной офтальмоскопии, исследование возможно даже при узком зрачке и обеспечивает детальную визуализацию глазного дна, включая крайнюю периферию. Поскольку метод использует ИК-излучение, он не требует яркого света, что снижает дискомфорт для пациента и позволяет проводить осмотр глазного дна (динамическая ИК-офтальмоскопия) при недостаточно прозрачных оптических средах. Кроме того, ИК-визуализация дает возможность оценивать патологические изменения, невидимые при стандартной офтальмоскопии. В практике предоперационного обследования пациентов с РОС этот метод позволяет детально визуализировать и документировать изменения на глазном дне (включая крайнюю периферию): границы и топографию отслойки, складки сетчатки, локализацию и морфометрическую характеристику разрывов и зон периферических витреохориоретинальных дистрофий (ПВХРД) [14]. В ИК-свете зона отслойки сетчатки обычно выглядит как гипорефлективная область, что обусловлено, вероятно, рассеиванием ИК-излучения субретинальной жидкостью. Однако наши клинические наблюдения за пациентами с РОС демонстрируют значительную вариабельность рефлективных свойств различных участков отслойки в ИК-свете, которая коррелирует со структурными изменениями в наружных слоях отслоенной сетчатки по данным ОКТ. В научной литературе мы не встретили описания ИК-изображений различных морфологических стадий РОС.

ЦЕЛЬ работы — изучить особенности ИК-визуализации при РОС в зависимости от морфологических стадий изменений наружных слоев сетчатки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В исследование включены 60 пациентов с первичной дисрегулируемой, прогрессирующей РОС, проходивших стационарное лечение в отделе патологии сетчатки и зрительно-го нерва ФГБУ «НМИЦ ГБ им. Гельмгольца». Возраст пациентов — 32 женщин и 28 мужчин — составил $46,7 \pm 13,3$ года (от 22 до 73 лет).

В рамках предоперационной подготовки все пациенты проходили стандартный офтальмологический осмотр: сбор анамнеза, визометрию, пневмотонометрию, биомикроскопию, непрямую бинокулярную офтальмоскопию с помощью бесконтактной линзы 78 дптр, офтальмоскопию с 3-зеркальной линзой Гольдмана для детального осмотра периферии глазного дна.

Дополнительно все пациенты обследованы на мультимодальной ультраширокопольной диагностической платформе Mirante (Nidek, Япония) с параллельной регистрацией ИК-изображений и структурных ОКТ-сканов, фиксирующих стадийные изменения нейроэпителлия при РОС. В этом исследовании использовалась система стадирования морфологических изменений наружных слоев сетчатки при РОС, описанная I. Melo и соавт. [4] на основе данных ОКТ. ОКТ-сканирование проводили от области разрыва до границ отслойки сетчатки с определением каждой стадии. Далее сопоставляли полученные данные ОКТ с ИК-изображениями. ИК-визуализация РОС осуществлялась с использованием лазера с длиной волны 790 нм с получением как статических, так и динамических (в режиме реального времени) изображений. Для ультраширокопольной ИК-визуализации применяли специальный адаптер с углом обзора 163° . Динамическая ультраширокопольная ИК-офтальмоскопия проводилась по всем сегментам глазного дна (по аналогии со стандартной офтальмоскопией) и записывалась на видео с помощью установленного программного обеспечения для записи с экрана.

Дисрегулируемая РОС определялась в данном исследовании как острая, прогрессирующая и обширная отслойка, при которой пигментный эпителий сетчатки утрачивает контроль над субретинальным пространством [15]. Дисрегуляция возникает вследствие быстрого и массивного поступления жидкого стекловидного тела в субретинальное пространство, что, как правило, характерно для случаев с клапанными разрывами на фоне острой задней отслойки стекловидного тела. Утрата регуляторной функции пигментного эпителия запускает каскад патологических изменений, включающий прогрессирующую гидратацию наружных слоев сетчатки, изменение модуля их упругости, латеральное расширение и механическую деформацию с последующим формированием СНСС. Наличие СНСС, визуализируемых как при ОКТ, так и при ИК-офтальмоскопии, использовалось в качестве основного критерия диагностики дисрегулируемой РОС.

Статистическую обработку осуществляли при помощи программы Microsoft Excel; в качестве основных показателей использовали среднее значение и стандартное отклонение.

Целью нашего исследования стало детальное описание инфракрасной ретинальной картины при РОС.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По степени протяженности РОС 60 пациентов распределились следующим образом: 29 — распространенная, 22 — субтотальная, 9 — тотальная. МКОЗ составила от 0,01 до 1,0 (в среднем $0,33 \pm 0,31$). По данным ОКТ, 16 пациентов были без захвата макулярной области, а 44 — с захватом. МКОЗ пациентов с вовлечением макулярной зоны при 2-й стадии ($n = 21$) составила $0,13 \pm 0,11$;

Таблица. Характеристика морфологических стадий РОС по данным ОКТ и ИК-визуализации
Table. Characteristics of morphological stages of rhegmatogenous retinal detachment using OCT and IR-imaging

Стадии Stages	ОКТ [4] OCT [4]	ИК-офтальмоскопия IR-imaging
1	Отделение нейроэпителия от пигментного эпителия сетчатки без видимых изменений в слое фоторецепторов Separation of the neuroepithelium from the retinal pigment epithelium without visible changes in the photoreceptor layer	Первая и 2-я стадии не различаются между собой и визуализируются как гипорефлективная область, расположенная между границей прикрепленной и отслоившейся сетчатки с одной стороны и СНСС — с другой. Степень гипорефлективности менее выражена (область выглядит более светлой) по сравнению с 3-й и 4-й стадиями Stages 1 and 2 are indistinguishable from each other and appear as a hyporeflexive area between the attached and detached retina on one side and outer retinal corrugations (ORC) on the other. The degree of hyporeflexivity was less pronounced (the area appeared brighter) compared to stages 3 and 4
2	Утолщение слоя фоторецепторов, который визуализируется в виде однородной гиперрефлективной линии Thickening of the photoreceptor layer, which is visualized as a uniform hyperreflective line	
3	Различные по высоте и амплитуде СНСС: а — низкочастотные и низкоамплитудные, b — высокочастотные и высокоамплитудные Different in height and amplitude of the ORC: a — low-frequency and low-amplitude, b — high-frequency and high-amplitude	Характеризуется наличием на гипорефлективном фоне четко очерченных, хаотично расположенных гиперрефлективных складок различной высоты и амплитуды It is characterized by the presence of clearly defined, chaotically arranged hyperreflective folds of varying height and amplitude against a hyporeflexive background
4	Прогрессирующая потеря четкости СНСС с одновременным утолщением слоя фоторецепторов. Резкое увеличение количества гиперрефлективных точек Progressive loss of clarity of the ORC, accompanied by thickening of the photoreceptor layer. Appearance of hyperreflective dots	Хорошо видимая гипорефлективная область с едва заметными складками, которые могут быть не видны совсем. Интенсивность гипорефлективного сигнала на этой стадии максимальна A clearly visible hyporeflexive area with barely discernible folds that may be completely absent. The hyporeflexive signal intensity reaches its maximum at this stage
5	Потеря фоторецепторов: а — частичная, b — полная Loss of photoreceptors: a — partial, b — complete	а — на гиперрефлективном фоне определяется пятнистая ретиальная структура, представленная штрихами, сочетающими гипорефлективные зоны (соответствуют областям с сохранными фоторецепторами) и гиперрефлективные зоны (соответствуют участкам потери фоторецепторов) b — четко очерченная гиперрефлективная область с хорошо видимыми границами и гипорефлективными сосудами на поверхности a — against a hyperreflective background, a patchy retinal structure is observed, represented by 'streaks' that combine hyporeflexive zones (corresponding to areas with preserved photoreceptors) and hyperreflective zones (corresponding to areas of photoreceptor loss) b — a well-demarcated hyperreflective area with distinct borders and hyporeflexive vessels on the surface

при 3а стадии (n = 8) — $0,09 \pm 0,08$;
 при 3b стадии (n = 14) — $0,05 \pm 0,04$;
 при 4-й стадии (n = 1) — $0,03$.

Для детального описания инфракрасной ретиальной картины при РОС мы провели параллельную визуализацию стадий морфологических изменений в наружных слоях сетчатки, сопоставляя данные ОКТ и ИК-изображений (таблица). При прогрессирующей РОС стадии последовательно распределялись, уменьшаясь от области разрыва к границе прикрепленной и отслоившейся сетчатки. В ИК-свете 1-я и 2-я стадии не различались между собой и визуализировались как гипорефлективная область, расположенная между границей прикрепленной и отслоившейся сетчатки с одной стороны и СНСС — с другой (рис. 1). При этом степень гипорефлективности была менее выражена (зона выглядела более светлой) по сравнению с 3-й и 4-й стадиями. Граница отслойки сетчатки при динамической ИК-офтальмоскопии имела гиперрефлективный сигнал. Третья стадия характеризовалась на-

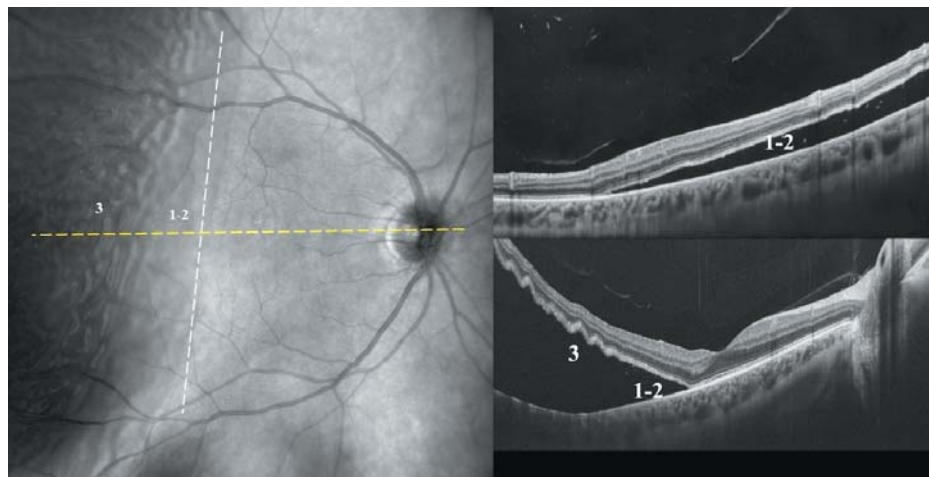


Рис. 1. ИК-изображение и ОКТ-сканы 1–2-й стадии; 1-я и 2-я стадии в ИК-свете не различаются между собой и визуализируются как гипорефлективная область, расположенная между границей прикрепленной и отслоившейся сетчатки с одной стороны и СНСС — с другой. Рефлективность этой области на 1-й и 2-й стадиях выше, чем на 3-й и 4-й. Цифрами обозначены стадии на ИК-изображении и ОКТ-сканах. Пунктирные линии обозначают проекцию сканирования (белый цвет — вертикальный скан, желтый цвет — горизонтальный скан)
Fig. 1. IR-image and OCT scans of stages 1–2. Stages 1 and 2 have no distinguishing features from each other in IR light and are visualized as a hyporeflexive area located between the border of attached and detached retina on one side and ORCs on the other. The reflectivity in the area in stages 1 and 2 was higher than in stages 3 and 4. Numbers indicate stages on the IR image and OCT scans. Dotted lines indicate the scan projection (white color — vertical scan, yellow color — horizontal scan)

личием на гипорефлективном фоне различных по высоте и амплитуде, хаотично расположенных, четко очерченных гиперрефлективных складок (рис. 2). Четвертая стадия при ИК-визуализации представляла собой хорошо видимую гипорефлективную область с едва заметными складками, которые могут быть не видны совсем. Интенсивность гипорефлективного сигнала на этой стадии была максималь-

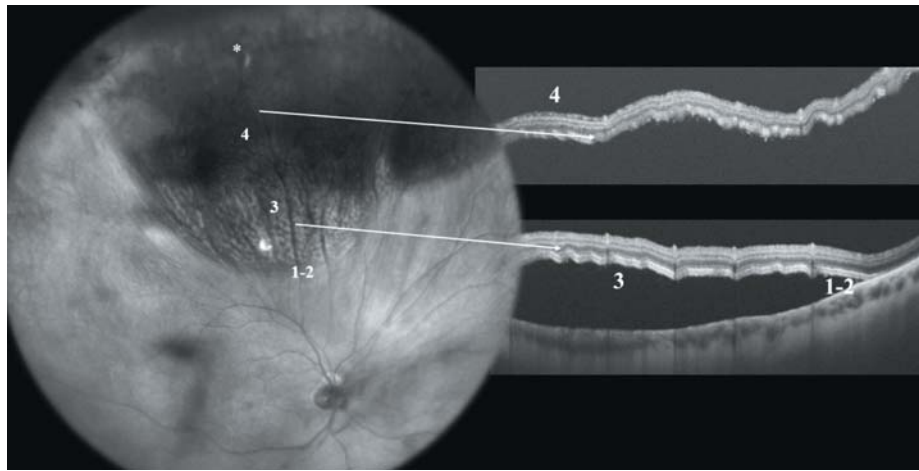


Рис. 2. Третья стадия на ИК-изображении (163°). Расположена между хорошо видимой гипорефлективной зоной, соответствующей 4-й стадии и 1–2-й стадии на границе прикрепленной и отслоившейся сетчатки. Отмечается наличие четких, хаотичных гиперрефлективных складок различной высоты и амплитуды, контрастирующих на гипорефлективном фоне отслоенной сетчатки. Цифрами обозначены стадии на ИК-изображении и ОКТ-сканах
Fig. 2. Stage 3 on IR-image (163°). It is located between the well-visible hyporeflexive zone corresponding to stage 4 and stages 1–2 at the border of attached and detached retina. Note the presence of distinct, chaotic hyperreflexive folds of varying height and amplitude, contrasting against the hyporeflexive background of the detached retina. Numbers indicate stages on the IR-image and OCT scans

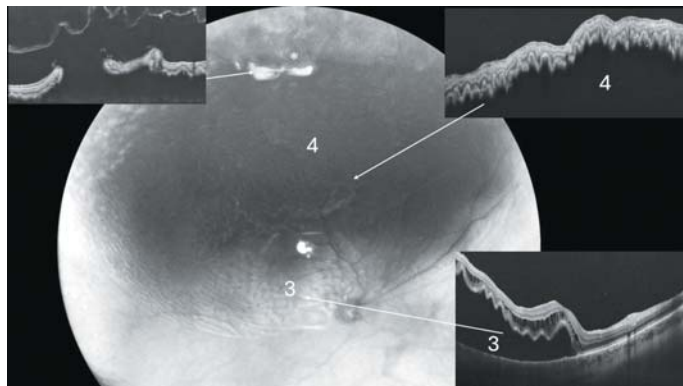


Рис. 3. Четвертая стадия на ИК-изображении (163°). Расположена дистальнее стадии 3 в направлении клапанного разрыва (обозначен звездочкой), проявляется в виде четко очерченной гипорефлективной области со слабо различимыми или полностью отсутствующими складками. При этом интенсивность гипорефлективного сигнала достигает максимальных значений среди всех стадий, что морфологически соответствует выраженной дезорганизации и отеку наружных слоев сетчатки по данным ОКТ. Цифрами обозначены стадии на ИК-изображении и ОКТ-сканах. Белыми стрелками обозначена локализация сканирования
Fig. 3. Stage 4 on IR imaging (163°). The stage 4 area is located distal to stage 3 toward the horseshoe tear (asterisk), appearing as a well-demarcated hyporeflexive zone with barely discernible or completely absent folds. The hyporeflexive signal intensity reaches its maximum compared to other stages, morphologically corresponding to significant disorganization and edema of the outer retinal layers on OCT. Numbers indicate corresponding stages on IR and OCT scans. White arrows mark scanning localisation

ной (рис. 3). На 5-й стадии при ИК-исследовании на фоне общей гиперрефлективности визуализировалась пятнистая ретиальная структура. Она представлена чередующимися гипо- и гиперрефлективными участками, формирующими характерный рисунок в виде штрихов («изъеденная молью сетчатка») (рис. 4). Данные изменения соответствуют областям с сохранными, но утолщенными фоторецепторами (гипорефлективные зоны) и участкам полной потери фоторецепторов (гиперрефлективные зоны). Терминальная стадия изменений наружных слоев сетчатки при РОС в ИК-диапазоне характеризуется выраженной зоной гиперрефлективности с отчетливыми границами и гипорефлективными сосудами на поверхности; на ОКТ фоторецепторные слои полностью отсутствуют (рис. 5).

Кроме того, при ИК-визуализации в проекции 5-й стадии часто обнаруживались участки с ячеистой структурой различной формы, разделенные гипорефлективными границами. На ОКТ данным участкам соответствовали фокальные зоны, содержащие множественные макрокистозные полости с тонкими перегородками между ними.

Первая и 2-я стадии чаще всего встречались на границе между прикрепленной и отслоенной сетчаткой, 3-я стадия — в макулярной области и на средней периферии, а 4–5-я стадии — в проекции разрывов сетчатки и на крайней периферии.

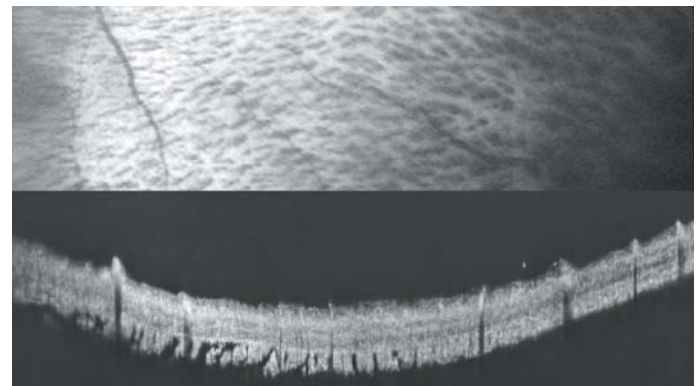


Рис. 4. Морфологические изменения наружных слоев сетчатки на 5а стадии («изъеденная молью сетчатка») в ИК-свете и при ОКТ-визуализации. В зоне длительно существующей отслойки сетчатки визуализируется характерный пятнистый рисунок, образованный чередованием гиперрефлективных и гипорефлективных участков. На ОКТ гиперрефлективные зоны соответствуют областям полной потери фоторецепторов, тогда как гипорефлективные — зонам с сохранными, но утолщенными фоторецепторами
Fig. 4. Morphological changes of the outer retinal layers at stage 5a (“moth-eaten retina”) in IR-light and on OCT imaging. In the area of long-standing retinal detachment, a characteristic patchy pattern is visualized, formed by alternating hyperreflexive and hyporeflexive areas. On OCT, hyperreflexive zones correspond to areas of complete photoreceptor loss, while hyporeflexive zones correspond to areas with preserved but thickened photoreceptors

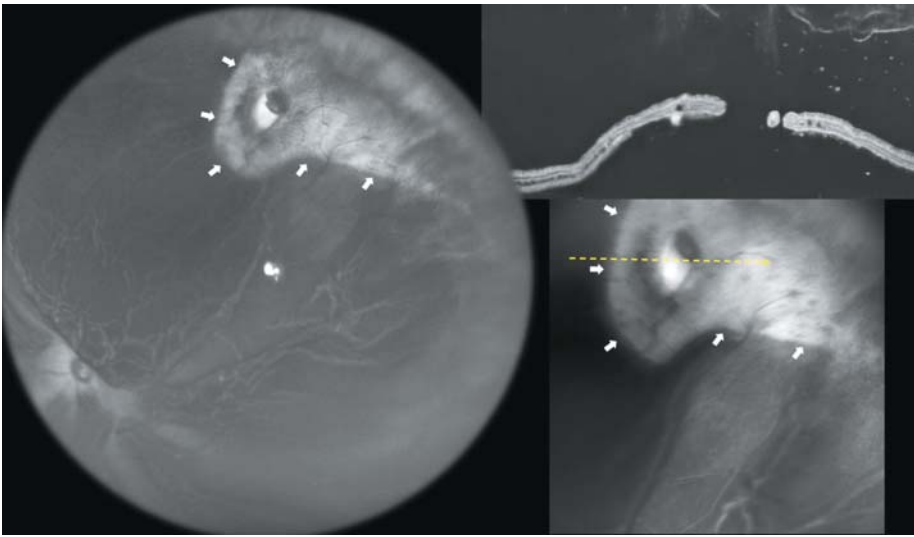


Рис. 5. ИК-изображение (163° и 89°) терминальной стадии и ОКТ-скан в проекции клапанного разрыва. Определяется четко очерченная зона гиперрефлективности с отчетливыми границами (белые стрелки). Данные изменения соответствуют на ОКТ полной потере фоторецепторов и обнажению наружной пограничной мембраны. Желтая пунктирная линия обозначает проекцию сканирования

Fig. 5. IR-image (163° and 89°) of terminal-stage and OCT scan projected onto the horseshoe tear location. A well-demarcated hyperreflective area with distinct borders is identified (white arrows). These changes correspond on OCT to complete photoreceptor loss and exposure of the external limiting membrane. The yellow dotted line indicates the scan projection

ОБСУЖДЕНИЕ

В своей клинической практике мы обнаружили корреляцию между ИК-картиной и данными ОКТ-исследования наружных слоев сетчатки при РОС. Это послужило основанием для проведения данного исследования, направленного на оценку стадийных морфологических изменений после РОС (ранее описанных I. Melo и соавт. [4] на ОКТ) с помощью ИК-визуализации. Стадийные структурные изменения в наружных слоях сетчатки при РОС отражают степень гидратации нейроэпителия и продолжительность отслойки, что проявляется характерными особенностями при визуализации на ОКТ и ИК-изображениях. У наших пациентов с вовлечением фовеа МКОЗ снижалась прогрессивно по мере увеличения стадии. Эти этапные анатомические изменения, несомненно, будут влиять на потенциал восстановления фоторецепторов. Оценка исходных структурных изменений при РОС позволит прогнозировать послеоперационные функциональные результаты и определять тактику хирургического лечения [8, 9].

В ходе исследования мы провели сравнительный анализ структурных изменений по данным ОКТ и ИК-визуализации, что позволило выделить ключевые диагностические признаки морфологических стадий изменения наружных слоев сетчатки при РОС в ИК-диапазоне. Первая и 2-я стадии не имели отличительных признаков между собой в ИК-свете и определялись как зона относительно повышенной рефлективности на фоне общей гиперрефлективности отслоенной сетчатки, локализованная вдоль границы прикрепленной сетчатки с одной стороны и СНСС — с другой (см. рис. 1, 2). По данным I. Melo и соавт. [4], протяженность 1-й стадии на ОКТ-сканах составляет менее 100–200 мкм до момента появления признаков 2-й стадии [8]. Рефлективность в области 1-й и 2-й стадий была выше, чем на 3-й и 4-й стадиях, что, вероятно, связано со степенью отека наружных слоев сетчатки (меньшим поглощением или рассеиванием ИК-лучей) и высотой отслойки.

На 3-й стадии ИК-изображения демонстрируют на гиперрефлективном фоне гиперрефлективные складки различной амплитуды и частоты, проявляющиеся как четко различимые волнистые изменения топографии поверхности отслоенной сетчатки (см. рис. 1–3).

СНСС образуются вследствие продолжающейся интенсивной гидратации фоторецепторных слоев, что приводит к изменению модуля упругости внешних отделов сетчатки (его снижению) относительно внутренних и латеральному расширению бациллярного слоя [15]. Данная стадия специфична для РОС и практически отсутствует при экссудативной отслойке сетчатки, что, вероятно, обусловлено различиями в осмолярности субретинальной жидкости [16]. СНСС были независимым предиктором дисрегуляции насоса пигментного эпителия сетчатки и не выявлялись при регулируемых хронических РОС [17]. Результаты А. Ресаки и соавт. [17] демонстрируют, что 3-я стадия характерна преимущественно для дисрегулируемых случаев РОС и не наблюдается при старых,

хронических отслойках. В работе I. Melo и соавт. [14] отмечается, что высокоамплитудные СНСС могут являться критической точкой, характеризующейся значительными структурными изменениями, которые приводят к худшим функциональным исходам хирургического лечения РОС [8].

Четвертая стадия на ОКТ ассоциирована со значительным утолщением наружных слоев сетчатки и резким увеличением количества гиперрефлективных точек, при дисрегулируемой РОС — с потерей четкости СНСС. На ИК-изображениях эти изменения выглядят как гиперрефлективная зона с повышенной способностью к рассеиванию и поглощению ИК-излучения (см. рис. 2, 3). На этой стадии степень гиперрефлективности отслоенной сетчатки возрастет, достигая максимальных значений по сравнению с другими стадиями. Данные особенности ИК-визуализации обусловлены максимально выраженным отеком бациллярного слоя (наружные и внутренние сегменты фоторецепторов), который достигает наибольшей степени именно на этой стадии.

Пятая стадия наиболее отчетливо определяется при ИК-офтальмоскопии, проявляясь участками в виде штрихов («изъеденная молью сетчатка») (см. рис. 4) и зонами с повышенной рефлективностью, имеющими четкие границы.

Интенсивный гиперрефлективный сигнал возникает вследствие полной или частичной потери фоторецепторных слоев, что приводит к усилению отражения ИК-света от нижележащих структур. При этом его интенсивность остается ниже, чем в зоне разрыва сетчатки. Терминальные изменения наружных слоев сетчатки наиболее выражены в зонах ретинальных разрывов, для которых характерно наиболее длительное присутствие субретинальной жидкости (см. рис. 5). Экспериментальные исследования на животных моделях демонстрируют полную потерю фоторецепторов к 90-му дню наблюдения, подтверждая клинические данные о зависимости степени структурных изменений от длительности отслойки сетчатки [6, 7].

Стадийные изменения нейроэпителия демонстрируют четкую зависимость от скорости накопления субретинальной жидкости. При дисрегулируемой прогрессирующей РОС стадии распределялись последовательно, напоминая «слоеный пирог»: уменьшаясь от области разрыва к границе отслойки сетчатки. Наиболее хорошо это видно на ультраширокопольных ИК-изображениях, демонстрирующих зональные изменения в рефлективности и форме сетчатки (рис. 6).

Такая закономерность распределения структурных изменений существенно облегчает топографическое стадирование. Идентификация даже одной четко выраженной стадии позволяет достоверно определять характер и направленность структурных изменений как по направлению к разрыву, так и в сторону границы отслойки.

Согласно данным А. Ресаки и соавт. [17], при регулируемой РОС, характеризующейся сохранением или восстановлением контроля пигментного эпителия сетчатки над субретинальной жидкостью, такая последовательность морфологических стадий нарушается.

Из-за замедленного притока жидкости не формируются СНСС, что приводит к отсутствию 3-й стадии и модификации 4-й стадии (в виде утолщения слоя фоторецепторов без образования складок).

На сегодняшний день, насколько нам известно, не существует публикаций, в которых бы описывались специфические, различимые при стандартной офтальмоскопии признаки, соответствующие морфологическим стадиям РОС. Наш собственный клинический опыт подтверждает трудности в дифференциации стадий при прямой и непрямой офтальмоскопии. 1–2-я стадии субклинические и не определяются при данном методе осмотра. Мы хорошо визуализируем СНСС, но не можем их стратифицировать по стадиям 3 и 4. Пятая стадия («изъеденная молью сетчатка», или полная потеря фоторецепторов) может проявляться при офтальмоскопии как грубые атрофические изменения или истончение сетчатки, однако эти признаки неспецифичны и могут быть незаметны на фоне общей картины отслойки, особенно при снижении прозрачности оптических сред.

Основными преимуществами ИК-визуализации является простота применения, неинвазивный и бесконтактный характер исследования, а также возможность эффективной визуализации глазного дна без необходимости медикаментозного расширения зрачка [10–13]. Ограничения метода связаны с высокой стоимостью оборудования на основе сканирующего лазерного офтальмоскопа, что затрудняет его широкое внедрение в клиническую практику. Кроме того, при ИК-съемке возможны артефакты, например центральное отражение (блик) оптики. Однако эти артефакты могут быть нивелированы программными методами или устранены при изменении точки фиксации. Предыдущие исследования продемонстрировали диагностическую ценность ИК-визуализации в определении границ отслойки, выявлении ретинальных разрывов и зон ПВХРД, а также дифференциальной диагностике отслойки сетчатки и ретиношизиса [10–14]. Проведенное нами исследование подтверждает, что ИК-офтальмоскопия

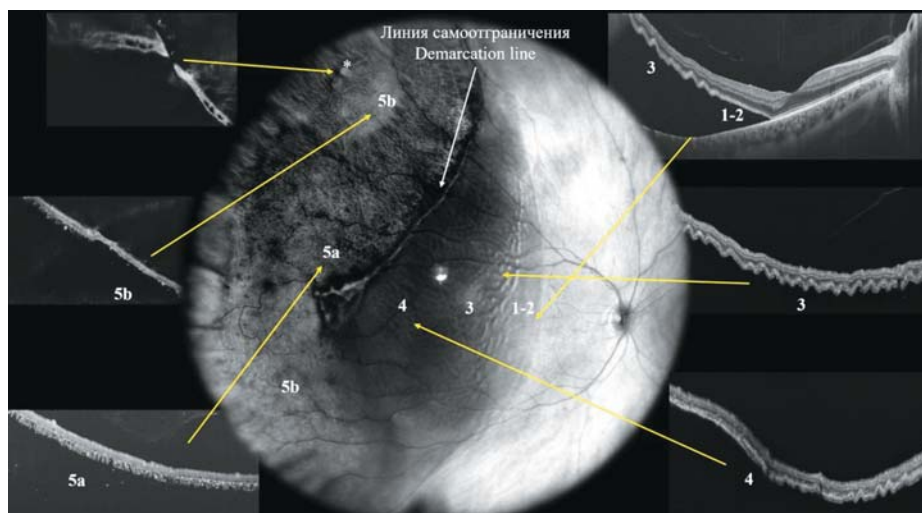


Рис. 6. Ультраширокопольное ИК-изображение (163°) и ОКТ-сканы, демонстрирующие все стадии морфологических изменений наружных слоев сетчатки у пациента с острой дисрегулируемой РОС на фоне хронической. Стадии изменений обозначены цифрами на ИК-снимке и ОКТ-сканах. Желтыми стрелками обозначена локализация сканирования. На линию самоотграничения указывает белая стрелка. Звездой обозначен дырчатый разрыв

Fig. 6. Ultra-widefield IR-image and OCT scans demonstrate all stages of morphological changes in the outer retinal layers in a patient with acute, dysregulated RRD on a chronic RRD. The stages of changes are marked with numbers on the IR image and OCT scans. Yellow arrows indicate the scanning locations. The demarcation line is indicated by a white arrow. An atrophic hole is marked with an asterisk

обладает значительным потенциалом в предоперационной оценке и динамическом наблюдении пациентов с отслойкой сетчатки. Наша работа расширила диагностические возможности метода, установив корреляции между ИК-картиной и стадийными морфологическими изменениями после РОС. ИК-визуализация может быть успешно использована в клинической практике в качестве дополнительного метода оценки РОС. Наибольшая диагностическая ценность достигается при комбинированном применении ИК-офтальмоскопии с ОКТ, что позволяет получить наиболее полную информацию о состоянии отслоенной сетчатки в макуле и на периферии. В тех клинических ситуациях, когда проведение ОКТ у пациентов с РОС невозможно, ИК-визуализация представляет собой альтернативу для определения морфологической стадии. Полученные данные свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения и внедрения ИК-офтальмоскопии в алгоритмы обследования пациентов с отслойкой сетчатки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом ИК-визуализации выявлены характерные диагностические признаки стадийных морфологических изменений нейроэпителия при дисрегулируемой РОС, коррелирующие с данными ОКТ. Полученные результаты подтверждают клиническую значимость ИК-офтальмоскопии в оценке структурных изменений сетчатки, расширяя диагностические возможности ИК-визуализации при диагностике и мониторинге пациентов с РОС.

Литература/References

- Xiong J, Tran T, Waldstein SM, Fung AT. A review of rhegmatogenous retinal detachment: past, present and future. *Wien Med Wochenschr.* 2025; 175 (7–8): 186–202. <https://doi.org/10.1007/s10354-025-01085-9>
- Friberg TR, Eller AW. Prediction of visual recovery after scleral buckling of macula-off retinal detachments. *Am J Ophthalmol.* 1992; 114 (6): 715–22. [https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)74050-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)74050-4)
- Zaidi H, Sridhar J. Optical coherence tomography in retinal detachment: Prognostic biomarkers, surgical planning, and postoperative monitoring.

- Diagnostics (Basel)*. 2025; 15 (7): 871. <https://doi.org/10.3390/diagnostics15070871>
- Melo IM, Bansal A, Naidu S, et al. Morphologic stages of rhegmatogenous retinal detachment assessed using swept-source OCT. *Ophthalmol Retina*. 2023 May; 7 (5): 398–405. <https://doi.org/10.1016/j.oret.2022.11.013>
 - Machemer R, Norton EW. Experimental retinal detachment in the owl monkey. I. Methods of production and clinical picture. *Am J Ophthalmol*. 1968; 66 (3): 388–96. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(68\)91522-5](https://doi.org/10.1016/0002-9394(68)91522-5)
 - Machemer R. Experimental retinal detachment in the owl monkey. II. Histology of retina and pigment epithelium. *Am J Ophthalmol*. 1968; 66 (3): 396–410. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(68\)91523-7](https://doi.org/10.1016/0002-9394(68)91523-7)
 - Anderson DH, Stern WH, Fisher SK, Erickson PA, Borgula GA. Retinal detachment in the cat: the pigment epithelial-photoreceptor interface. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1983; 24 (7): 906–26.
 - Martins MI, Naidu S, Pecaku A, et al. Impact of baseline morphologic stage of rhegmatogenous retinal detachment on postoperative visual acuity. *Ophthalmol Retina*. 2024; 8 (7): 624–32. <https://doi.org/10.1016/j.oret.2024.01.014>
 - El-Sehemy A, Martins Melo I, Pecaku A, et al. Postoperative photoreceptor integrity and anatomical outcomes based on presenting morphologic stage of rhegmatogenous retinal detachment. *Retina*. 2024; 44 (5): 756–63. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000004034>
 - Ho VY, Wehmeier JM, Shah GK. Wide-field infrared imaging: A descriptive review of characteristics of retinoschisis, retinal detachment, and schisis detachments. *Retina*. 2016; 36 (8): 1439–45. <https://doi.org/10.1097/iae.0000000000000963>
 - Banda HK, Shah A, Shah GK. Application of wide-field infrared reflectance imaging in retinoschisis, retinal detachments, and schisis detachments. *Int J Retina Vitreous*. 2019; 5 (Suppl 1): 42. <https://doi.org/10.1186/s40942-019-0188-5>
 - Huang NT, Georgiadis C, Gomez J, et al. Comparing fundus autofluorescence and infrared imaging findings of peripheral retinoschisis, schisis detachment, and retinal detachment. *Am J Ophthalmol Case Rep*. 2020; 18: 100666. <https://doi.org/10.1016/j.ajoc.2020.100666>
 - Shmueli O, Sutter D, Levy J, Fagan X. Near-infrared imaging retinal diagnostic applications—a review. *Int Ophthalmol*. 2024; 45 (1): 20. <https://doi.org/10.1007/s10792-024-03331-2>
 - Нероева Н.В., Зайцева О.В., Ушаков А.И., Милаш С.В. Преимущества мультимодальной визуализации в диагностике ргемаотгенной отслойки сетчатки. *Офтальмология*. 2025; 22 (1): 127–35. [Neroeva N.V., Zaytseva O.V., Ushakov A.I., Milash S.V. The advantages of multimodal imaging in the diagnosis of rhegmatogenous retinal detachment. *Ophthalmology in Russia*. 2025; 22 (1): 127–35 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2025-1-127-135>
 - Muni RH, Darabad MN, Oquendo PL, et al. Outer retinal corrugations in rhegmatogenous retinal detachment: The retinal pigment epithelium-photoreceptor dysregulation theory. *Am J Ophthalmol*. 2023; 245: 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2022.08.019>
 - Oquendo PL, Sodhi GS, Naidu SC, et al. Optical coherence tomography features in fovea-off exudative vs rhegmatogenous retinal detachment. *Am J Ophthalmol*. 2024; 268: 212–21. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2024.07.003>
 - Pecaku A, Naidu SC, Demian S, et al. Morphologic features of regulated vs. dysregulated rhegmatogenous retinal detachment using swept-source optical coherence tomography. *Am J Ophthalmol*. 2024; 268: 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2024.06.033>

Вклад авторов в работу: В.В. Нероев — концепция исследования, окончательное редактирование и утверждение публикуемой версии; С.В. Милаш — концепция исследования, сбор и анализ данных, написание и редактирование статьи, подготовка иллюстраций; Н.В. Нероева, О.В. Зайцева — сбор и анализ данных, редактирование статьи; А.И. Ушаков — сбор и анализ данных, написание и редактирование статьи, подготовка иллюстраций; Г.Ю. Захарова, О.А. Уткина, А.Г. Бриллиантова — сбор и анализ данных.

Authors' contribution: V.V. Neroev — concept of the study, final editing, and approval of the published version; S.V. Milash — concept of the study, data collection and analysis, writing and editing of the article, figure preparation; N.V. Neroeva, O.V. Zaitseva — data collection and analysis, editing of the article; A.I. Ushakov — data collection and analysis, writing and editing of the article, figure preparation; G.Yu. Zakharova, O.A. Utkina, A.G. Brilliantova — data collection and analysis.

Поступила: 07.11.2025. Переработана: 14.12.2025. Принята к печати: 15.12.2025
Originally received: 07.11.2025. Final revision: 14.12.2025. Accepted: 15.12.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногызская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² ФГБОУ ВПО «Российский университет медицины» Минздрава России, ул. Долгоруковская, д. 4, Москва, 127006, Россия

Владимир Владимирович Нероев — академик РАН, д-р мед. наук, профессор, директор¹, заведующий кафедрой глазных болезней факультета дополнительного профессионального образования², ORCID 0000-0002-8480-0894

Сергей Викторович Милаш — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргономики¹, ORCID 0000-0002-3553-9896

Наталья Владимировна Нероева — д-р мед. наук, руководитель отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹, ORCID 0000-0003-1038-2746

Ольга Владимировна Зайцева — канд. мед. наук, заместитель директора, ведущий научный сотрудник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹, доцент кафедры глазных болезней², ORCID 0000-0003-4530-553X

Александр Игоревич Ушаков — младший научный сотрудник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹, ORCID 0000-0003-0556-0149

Галина Юрьевна Захарова — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹

Ольга Александровна Уткина — канд. мед. наук, научный сотрудник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹, ORCID 0000-0001-8463-6337

Ангелина Грантовна Бриллиантова — младший научный сотрудник отдела патологии сетчатки и зрительного нерва¹, ORCID 0000-0001-6424-8724

Для контактов: Сергей Викторович Милаш,
sergey_milash@yahoo.com

¹ Helmholtz National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogyzskaya St., Moscow, 105062, Russia

² Russian University of Medicine, Dolgorukovskaya St., 4, Moscow, 127006, Russia

Vladimir V. Neroev — Academician of RAS, Dr. of Med. Sci., professor, director¹, head of eye diseases chair of the faculty of additional professional education², ORCID 0000-0002-8480-0894

Sergei V. Milash — Cand. of Med. Sci., senior researcher of the refraction pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics department¹, ORCID 0000-0002-3553-9896

Natalia V. Neroeva — Dr. of Med. Sci., head of the department of pathology of the retina and optic nerve¹, ORCID 0000-0003-1038-2746

Olga V. Zaytseva — Cand. of Med. Sci., deputy director, leading researcher of the department of retina and optic nerve pathology¹, assistant professor of the department of eye diseases of the faculty of additional professional education², ORCID 0000-0003-4530-553X

Alexander I. Ushakov — junior researcher of the department of retina and optic nerve pathology¹, ORCID 0000-0003-0556-0149

Galina Yu. Zakharova — Cand. of Med. Sci., leading researcher of the department of pathology of the retina and optic nerve¹

Olga A. Utkina — Cand. of Med. Sci., researcher of the department of retina and optic nerve pathology¹, ORCID 0000-0001-8463-6337

Angelina G. Brilliantova — junior researcher of the department of retina and optic nerve pathology¹, ORCID 0000-0001-6424-8724

For contacts: Sergei V. Milash,
sergey_milash@yahoo.com