

РОЛЬ ОКТ-АНГИОГРАФИИ В ИССЛЕДОВАНИИ РЕТИНАЛЬНОЙ ПЕРФУЗИИ ПОСЛЕ ЭНДОВИТРЕАЛЬНОГО ВМЕШАТЕЛЬСТВА ПО ПОВОДУ РЕГМАТОГЕННОЙ ОТСЛОЙКИ СЕТЧАТКИ

Р.Р. Файзрахманов^{1,2}, А.В. Суханова², О.А. Павловский^{1,2}, Е.А. Ларина^{1,2}

¹ Национальный медико-хирургический центр имени Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

² Институт усовершенствования врачей Национального медико-хирургического центра имени Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

Оптическая когерентная томография с ангиографией (ОКТ-ангиография, ОКТА) — неинвазивный метод исследования, позволяющий провести качественный и количественный анализ сосудов сетчатки и хориоидеи. При оперативном лечении регматогенной отслойки сетчатки с использованием различных тампонирующих сред происходит изменение перфузии ретиальной ткани. Целью обзора ставился анализ данных клинических исследований, изучающих изменения в микроциркуляторном русле сетчатки и сосудистой оболочке глаза и их влияние на остроту зрения по данным ОКТА после витрэктомии с использованием эндотампонады по поводу регматогенной отслойки. Обзор литературы проведен с использованием поисковых систем PubMed, Embase, Cochrane Library, выполнен анализ источников литературы по заданной теме, опубликованных по апрель 2020 года. Авторы пришли к выводу, что особенности изменения сосудистого русла сетчатки и хориоидеи по данным ОКТА после витрэктомии по поводу регматогенной отслойки сетчатки с использованием различных видов тампонады могут выступать в качестве предикторов зрительных функций в послеоперационном периоде, кроме того, являться основой для определения оптимальных сроков разрешения силиконовой тампонады. Данная проблема мало изучена и требует проведения дополнительных клинических исследований.

Ключевые слова: ОКТА, регматогенная отслойка сетчатки, перфузия.

(Для цитирования: Файзрахманов Р.Р., Суханова А.В., Павловский О.А., Ларина Е.А. Роль ОКТ-ангиографии в исследовании ретиальной перфузии после эндовитреального вмешательства по поводу регматогенной отслойки сетчатки. *Клиническая практика*. 2020;11(3):61–67. doi: 10.17816/clinpract33960)

THE ROLE OF OCT ANGIOGRAPHY IN A STUDY OF RETINAL PERFUSION AFTER ENDOVITREAL INTERVENTION DUE TO RHEGMATOGENOUS RETINAL DETACHMENT

R.R. Fayzrakhmanov^{1,2}, A.V. Sukhanova², O.A. Pavlovsky^{1,2}, E.A. Larina^{1,2}

¹ National Medical and Surgical Center named after N.I. Pirogov, Moscow, Russian Federation

² Institute of Advanced Training of Physicians N.I. Pirogov National Medical Surgical Center, Moscow, Russian Federation

OCT angiography is a non-invasive method of the qualitative and quantitative analysis of the retinal perfusion. After rhegmatogenous retinal detachment and vitrectomy with endotamponade, the retinal perfusion changes. Aim: To analyze the data from the clinical studies that evaluate the changes in the blood microcirculation of the retina and choroid and their effect on the visual acuity by OCTA after vitrectomy with endotamponade due to rhegmatogenous retinal detachment. A literature search was conducted using PubMed, Cochrane Library, and Embase until April, 2020. The authors conclude that the specific changes in the retinal perfusion after vitrectomy due to regmatogenous retinal detachment using various types of tamponade may act as predictors of visual outcomes, and also may become a basis for determining the optimal time of the silicone oil tamponade resolution. Evaluation of these changes according to the data obtained using OCTA is promising and little-studied. Thus, additional clinical studies are required.

Keywords: OCTA, rhegmatogenous retinal detachment, perfusion.

(For citation: Fayzrakhmanov RR, Sukhanova AV, Pavlovsky OA, Larina EA. The Role of OCT Angiography in a Study of Retinal Perfusion After Endovitreal Intervention Due to Rhegmatogenous Retinal Detachment. *Journal of Clinical Practice*. 2020;11(3):61–67. doi: 10.17816/clinpract33960)

ОСОБЕННОСТИ ОКСИГЕНАЦИИ СЕТЧАТКИ В НОРМЕ

Как известно, питание сетчатки осуществляется из двух разных сосудистых русел. Ретинальная сосудистая сеть находится между внутренней пограничной мембраной и наружным плексиформным слоем, тогда как хориоидальная располагается под мембраной Бруха. В норме пространство между наружным плексиформным слоем и мембраной Бруха является аваскулярным [1].

Выделяют 4 сосудистых сплетения сетчатки, имеющих морфологически разное расположение. Центральная артерия сетчатки, дихотомически делясь, формирует поверхностное сосудистое сплетение, которое, главным образом, располагается в слое ганглиозных клеток (ganglion cell layer, GCC), состоит из более крупных артерий, артериол, капилляров, венул и вен. Глубжележащие капиллярные сети — промежуточная (intermediate capillary plexus) и глубокая (deep capillary plexus, DCP) — располагаются, соответственно, выше и ниже внутреннего ядерного слоя (inner nuclear layer, INL). Питание данных сетей происходит посредством вертикальных анастомозов из поверхностного сосудистого сплетения. Четвертая сеть — радиальное перипапиллярное капиллярное сплетение (radial peripapillary capillary, RPC). Капилляры этого сплетения идут параллельно аксонам слоя нервных волокон [2–4]. Впервые упоминание этой сети у человека встретилось у I. Michaelson в 1954 г. [5].

По данным P. Tap и др. [3], плотность капиллярной сети представляется наибольшей в сети GCC (26,74%), значительно выше, чем в сетях в слое нервных волокон (13,69%), внутреннем плексиформном слое (inner plexiform layer, IPL) (11,28%) и INL (16,12%). По данным D. Snodderly и R. Weinhaus [6, 7], диаметр капилляров в сетях GCC и IPL значительно меньше, чем в других сетях. Выявлено, что внутренние и наружные капиллярные сети имеют плоскую конфигурацию, в то время как сеть в слое GCC и промежуточная капиллярная сеть — трехмерную структуру. P. Tap с соавт. [3] высказали предположение, что данные особенности структуры этих сетей указывают на высокую скорость обмена кислорода и метаболическую активность в GCC и IPL и могут быть особенно уязвимы при остром, преходящем и умеренном гипоксическом стрессе.

Метаболическая активность сетчатки крайне высока. Описывается, что потребление сетчаткой кислорода выше, чем тканью мозга [8].

Фовеальная аваскулярная зона (foveal avascular zone, FAZ) представляет собой зону без капилляров с высокой плотностью фоторецепторов и метаболической активностью. Предполагается, что FAZ изменяется при различных заболеваниях сетчатки и системной патологии и может коррелировать со зрительными функциями [9].

D. Yu и S. Cringle [10] провели ряд значимых экспериментальных исследований на животных, проанализировали уровень потребления кислорода и его распределение в сетчатке. Было продемонстрировано, что распределение кислорода в различных слоях сетчатки неравномерное. В условиях эксперимента на сетчатке крысы, в которой выделяют 2 сосудистых сплетения, было выявлено, что парциальное давление кислорода в самых внутренних слоях сетчатки составляет 22 мм рт.ст., затем, постепенно уменьшаясь с глубиной, достигает 5 мм рт.ст. на уровне 35% глубины, что соответствует IPL. Затем определяется второй пик — 15 мм рт.ст., что составляет от 60 до 70% глубины сетчатки и соответствует глубокому капиллярному сплетению, которое располагается в наружном плексиформном слое. По мере приближения к сосудистой оболочке наблюдается плато с последующим ростом давления по градиенту к сосудистой оболочке, где давление кислорода достигает 42 мм рт.ст., при этом системное парциальное давление кислорода артериальной крови составляет 85 мм рт.ст., углекислого газа — 35 мм рт.ст. при физиологической pH (7,4), артериальное давление — 115 мм рт.ст. Таким образом, наименьшее парциальное давление кислорода определяется во внутренних слоях сетчатки крысы между поверхностным и глубоким капиллярным сплетениями.

Измерение распределения кислорода на бессосудистой сетчатке морской свинки продемонстрировало при нормальных условиях дыхания воздухом крайне низкое, фактически неотличимое от нуля напряжение кислорода на большей части внутренних слоев сетчатки [11]. Распределение кислорода напоминает таковое у крыс в аваскулярной зоне — растет круто к вершине в сосудистой оболочке. Парциальное давление в собственной сосудистой оболочке составляет 34 мм рт.ст., что также ниже, чем системное артериальное парциальное давление кислорода у морской свинки (73 мм рт.ст.). Кроме того, по данным ряда экспериментальных исследований на животных было выявлено, что наибольшее парциальное давление

кислорода наблюдается на границе раздела мембрана хориокапилляра–мембрана Бруха с уменьшением давления по градиенту к наружным слоям сетчатки. Хориоида представляется основным источником кислорода для фоторецепторов сетчатки приматов [12–14].

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является стандартом исследования в клинической практике офтальмолога, поскольку позволяет оценить архитектуру сетчатки в реальном времени. ОКТ-ангиография (ОКТА) занимает постепенно лидирующее место в исследованиях сосудистой патологии сетчатки, такой как возрастная макулярная дегенерация, диабетическая ретинопатия, пахихориоидальные состояния и др. [15–18]. Ангиоаналитика в ОКТА предоставляет возможность качественной и количественной оценки площади васкуляризованных и аваскулярных участков сетчатки, плотности сосудистых сплетений, а также площади FAZ [9]. В последнем десятилетии кровоснабжение сетчатки преимущественно оценивалось посредством флуоресцентной ангиографии. Главным преимуществом ОКТА перед ангиографией является возможность проводить неинвазивный анализ.

На данный момент при проведении исследования ОКТА используется метод сегментации капиллярной сосудистой сети только на два крупных сплетения — поверхностное капиллярное сплетение сетчатки (surface capillary plexus, SCP) и DCP. Основная причина заключается в возникновении проекционного артефакта: поверхностные сосуды, проецирующиеся тени на более глубокие слои, неправильно определяются как поток, ограничивая визуализацию нижележащей сосудистой сети [19].

АНАЛИЗ ПЕРФУЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В ГРУППЕ БЕЗ ОФТАЛЬМОПАТОЛОГИИ

W. Samara с соавт. [20] изучали состояние FAZ в нормальных глазах с помощью ОКТ и ОКТА. Исследовано 70 глаз, обнаружено 2 сосудистых сплетения в сетчатке: SCP в слое GCC и DCP в слое INL. Площадь FAZ в среднем составила $0,266 \pm 0,097$ мм² в SCP (диапазон $0,071$ – $0,527$ мм²) и $0,495 \pm 0,227$ мм² в DCP (диапазон $0,160$ – $0,795$ мм²). Площадь FAZ была значительно больше в DCP (deep foveal avascular zone, dFAZ) по сравнению с SCP (superior foveal avascular zone, sFAZ). Параметр площади FAZ в обоих сплетениях был обратно пропорционален

показателю центральной толщины макулы (foveal macular thickness, FMT) и центральному макулярному объему. Не было обнаружено значительной корреляции между площадью FAZ с возрастом или полом.

С другой стороны, F. Gómez-Ulla с соавт. [21], проведя анализ 240 глаз 120 здоровых пациентов, показали, что общий средний размер sFAZ у женщин ($0,297 \pm 0,110$ мм²) был значительно больше ($p = 0,002$), чем у мужчин ($0,254 \pm 0,098$ мм²), как и dFAZ у женщин ($0,322 \pm 0,111$ мм²) был выше ($p < 0,001$), чем у мужчин ($0,273 \pm 0,099$), но только в группах моложе 20 и старше 50 лет. У женщин как для sFAZ, так и для dFAZ группа 20–29 лет имела меньший размер FAZ, чем группа 50–59 лет. Мужчины не показали различий между шестью возрастными группами.

АНАЛИЗ ПЕРФУЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕ ХИРУРГИЧЕСКОГО ЛЕЧЕНИЯ РЕГМАТОГЕННОЙ ОТСЛОЙКИ СЕТЧАТКИ

Группой авторов [22] был проведен анализ параметра площади FAZ, SCP и DCP посредством ОКТА в глазах после выполнения витрэктомии (pars plana vitrectomy, PPV), которая завершалась газовой тампонадой SF6 по поводу первичной регматогенной отслойки сетчатки (РОС) с вовлечением (macula-off) и без вовлечения (macula-on) макулярной зоны. В группе глаз macula-on максимально скорректированная острота зрения (МКОЗ) имела прямую корреляционную связь с плотностью (vessel density, VD) DCP в парафовеальной зоне ($p = 0,001$). МКОЗ после эндовитреальной хирургии по поводу РОС macula-off имела корреляционную взаимосвязь с VD SCP в парафовеа ($p = 0,012$), VD DSP в парафовеа ($p < 0,001$) и в зоне фовеа ($p = 0,012$).

J. Woo с соавт. [23] также изучали изменение параметра FAZ после PPV с газовой тампонадой C3F8 по поводу РОС macula-on и macula-off в сравнении со здоровыми глазами. Все исследования проводились после полного рассасывания газа в сроки до 2 мес. Как предоперационная, так и послеоперационная МКОЗ была достоверно выше в группе macula-on. FMT достоверно не отличалась между группами. FAZ была достоверно больше как в DCP, так и в SCP при РОС macula-off, чем в группе контроля и группе РОС macula-on. При этом FAZ в DCP и SCP в группе macula-on не отличались от группы сравнения. Корреляционный анализ показал, что FAZ в DCP и SCP имеет отри-

цательную корреляцию с МКОЗ в послеоперационном периоде в группе macula-off.

Е. Hong с соавт. [24] провели сравнительный анализ VD и FMT между глазами с macula-off и macula-on первичными РОС. В исследование включены 11 глаз с РОС macula-on и 20 глаз РОС macula-off, из них 11 имели, а 9 не имели дефекта в наружных слоях центральной зоны сетчатки. Результаты исследования второго глаза у каждого пациента были приняты за контрольные параметры. Средняя длительность РОС составила $7,2 \pm 6,1$ дней. Дооперационная и постоперационная МКОЗ была достоверно лучше в РОС macula-on группе ($1,02 \pm 0,7$), чем в РОС macula-off ($1,45 \pm 0,57$) ($p < 0,001$). Толщина зоны «эллипсоидная зона–пигментный эпителий сетчатки» была достоверно меньше в группе с РОС macula-off, чем в контроле, и достоверно меньше в группе с дефектом наружных слоев сетчатки, чем без него. Центральная плотность хориокапиллярного сплетения была значительно меньше в группе с дефектом наружных слоев сетчатки ($56,4 \pm 4,8\%$) в сравнении с контрольными значениями ($60,2 \pm 4,0\%$) ($p = 0,026$). SCP и DCP достоверно не отличались от контрольных показателей и между группами. По данным ОКТ и ОКТА, в группе РОС macula-on только параметр плотности хориокапилляров продемонстрировал прямую корреляционную взаимосвязь с МКОЗ ($p = 0,012$). Таким образом, авторы предполагают, что восстановленный хориоидальный кровоток может благоприятно повлиять на восстановление наружного слоя сетчатки.

ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРФУЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ СИЛИКОНОВОЙ ТАМПОНАДЕ

Осложнения, возникающие после удаления силиконового масла (СМ), включают рецидив отслойки сетчатки, гипотонию, экспульсивное кровоизлияние, гемофтальм [25]. По данным литературы, удаление СМ может привести к рецидиву отслойки сетчатки в 9,5–27% случаев [26–29].

В ряде публикаций описаны случаи с «необъяснимым» снижением МКОЗ после удаления СМ, что дает основание для более глубокого анализа перфузии и изменения нейроархитектоники сетчатки на фоне тампонады СМ [30–32].

W. Xiang с соавт. [33] провели исследование, где оценивали состояние центральной зоны сетчатки у 23 пациентов, которым была выполнена PPV в сочетании с силиконовой тампонадой, а также у 20 пациентов, которым требовалось удаление СМ. Средняя продолжительность силиконовой

тампонады в группе с удалением СМ составила $5,56 \pm 2,17$ мес. Результаты показали, что площадь FAZ и показатель FMT по данным ОКТА VD SCP и VD DCP сохранялись на стабильном уровне после силиконовой тампонады ($p > 0,05$), а также после удаления СМ ($p > 0,05$).

J. Lee с соавт. [34] в начале 2020-го исследовали изменения микроциркуляторного русла сетчатки на 3-м мес после завершения силиконовой тампонады, выполненной по поводу первичной РОС. Площадь FAZ в DCP была достоверно больше ($p < 0,001$), чем в группе контроля. При этом VD DCP была достоверно снижена ($p = 0,022$), а продолжительность силиконовой тампонады имела прямую корреляцию с показателем площади FAZ и обратную с VD DCP. Авторы отмечают, что несмотря на включение в исследование 71,1% глаз с первичной РОС macula-off, выявленная корреляция FAZ DCP и VD DCP с длительностью силиконовой тампонады дает возможность предположить связь этих изменений с влиянием тампонирующей среды, а не первичным нарушением целостности блока «пигментный эпителий сетчатки–нейроэпителий».

ОБСУЖДЕНИЕ

Немногочисленные работы, в которых с помощью ОКТА исследуется изменение кровоснабжения центральной зоны после PPV с использованием СМ по поводу РОС включает РОС macula-off. Этот факт не позволяет исключить негативное влияние метаболических изменений в фовеолярной зоне, обусловленной нарушением адгезии ретинальной ткани, и сделать достоверный вывод о влиянии тампонирующей среды на перфузию макулы.

J. Lee с соавт. [34] предполагают, что рост параметра площади FAZ DCP и снижение VD DCP с длительностью тампонады СМ свидетельствует о негативном влиянии тампонирующей среды. Тем не менее отслойка нейроэпителиальной ретинальной ткани, обусловленная накоплением субретинальной жидкости, приводит к возникновению ишемии в наружных слоях сетчатки, для которых собственно сосудистая оболочка является единственным источником кровоснабжения [12–14]. Ишемия сопровождается накоплением глутамата и аспартата, запускающих каскад патологических реакций, приводящих к эксайтотоксичности и апоптозу рецепторов нейроэпителиального слоя сетчатки. Так, в условиях эксперимента на кошках [35] было показано, что уже на третьи сутки после искусствен-

но вызванной отслойки сетчатки среднее значение фоторецепторов было достоверно снижено в сравнении с контролем (207 и 257 ядер/мм соответственно; $p = 0,03$). По результатам ряда исследований обнаружено, что апоптоз рецепторного слоя имеет стереотипную динамику развития, появляясь в первые часы после отслойки, достигая пика ко 2–3-му дню и снижаясь до наименьшего уровня на 7-е сут [36–38]. Молекулярные изменения в ткани сетчатки, возникшие в первый час после отслойки, не могут быть нивелированы сразу после прилегания сетчатки. При этом достижение анатомического прилегания в сроки от 1 до 24 ч в условиях эксперимента при анализе молекулярных параметров клеточного апоптоза и клеточной пролиферации дает схожие результаты, более длительный интервал отслойки сетчатки делает эти события труднопредотвратимыми [36]. Таким образом, процесс ремоделирования сетчатки в фовеолярной зоне, вызванный первичными метаболическими изменениями ретиальной ткани, не позволяет исключить влияние этого фактора на изменение в микроциркуляторном русле сетчатки и хориоидеи в послеоперационном периоде при использовании силиконовой тампонады.

Так, в исследовании J. Woo с соавт. [23] параметр FAZ после PPV с использованием газовоздушной тампонады был достоверно больше в группе POC macula-off во всех сосудистых сплетениях сетчатки, чем в группе контроля и POC macula-on, где FAZ DCP и SCP не отличались от группы контроля. Таким образом, можно предположить, что именно первичные гистохимические и морфофункциональные изменения, обусловленные нарушением ретиальной адгезии, ведут к увеличению фовеолярной аваскулярной зоны. Между тем, по данным ряда авторов, CM как тампонирующая среда может играть значительную роль в каскаде патологических реакций эксайтотоксичности. Клетки Мюллера являются основными глиальными клетками сетчатки и принимают на себя многие функции, выполняемые астроцитами, олигодендроцитами и эндимимальными клетками в других областях центральной нервной системы [39]. Множество экспериментальных данных свидетельствует о том, что клетки Мюллера выступают в качестве буфера ионов K^+ [40–43]. Объем внутриглазной жидкости при тампонаде силиконовым маслом, неспособным к растворению ионов, недостаточен для клиренса K^+ и других ионов (например, H^+) клетками Мюллера в витреальную по-

лость. Увеличение $[K^+]$ вызывает деполяризацию клеточной мембраны, запуская порочный круг эксайтотоксичности, и ведет, в конечном итоге, к дегенерации нервных клеток [44].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОКТА — неинвазивный метод исследования, позволяющий оценить качественные и количественные параметры микроциркуляторного русла сетчатки и собственно сосудистой оболочки глаза. Сложность нейроархитектоники центральной зоны сетчатки объясняет высокую метаболическую активность и потребность в поддержании перфузионных параметров слоев сетчатки на оптимальном уровне. По данным ряда исследований, базирующихся на результатах ОКТА, после проведения витрэктомии с использованием различных видов тампонады выявляются изменения в микроциркуляторном русле сетчатки и хориоидеи, обусловленные влиянием тампонирующей среды. При этом проведенные исследования не позволяют исключить влияния метаболических изменений, вызванных нарушением ретиальной адгезии в центральной зоне, на микроциркуляторное русло. Дальнейшее изучение проблемы изменений в сосудистом русле, по данным ОКТА, после PPV с использованием большего количества случаев и исследованием зон сетчатки, не вовлеченных в первичную альтерацию, должны позволить выявить предикторы оптимальных сроков разрешения силиконовой тампонады для достижения наилучшего функционального результата.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Поисково-аналитическая работа проведена на личные средства авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

А.В. Суханова, Р.Р. Файзрахманов — концепция и дизайн исследования, написание текста; А.В. Суханова, Р.Р. Файзрахманов, О.А. Павловский, Е.А. Ларина — сбор и обработка материала; Р.Р. Файзрахманов — редактирование. Все авторы приняли активное участие в выполнении работы, прочли, внесли правки и одобрили окончательную версию статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Jia Y, Bailey ST, Hwang TS, et al. Quantitative optical coherence tomography angiography of vascular abnormalities in the living human eye. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2015;112(18):E2395–E2402. doi: 10.1073/pnas.1500185112.
2. Provis JM. Development of the primate retinal vasculature. *Prog Retin Eye Res*. 2001;20(6):799–821. doi: 10.1016/s1350-9462(01)00012-x.
3. Tan PE, Yu PK, Balaratnasingam C, et al. Quantitative confocal imaging of the retinal microvasculature in the human retina. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2012;53(9):5728–5736. doi: 10.1167/iovs.12-10017.
4. Campbell JP, Zhang M, Hwang TS, et al. Detailed vascular anatomy of the human retina by projection-resolved optical coherence tomography angiography. *Sci Rep*. 2017;7:42201. doi: 10.1038/srep42201.
5. Michaelson IC. Retinal circulation in man and animals. *Am J Ophthalmology*. 1954;38(3):419–420. doi: 10.1016/0002-9394(54)90870-3.
6. Snodderly DM, Weinhaus RS. Retinal vasculature of the fovea of the squirrel monkey, *Saimiri sciureus*: three-dimensional architecture, visual screening, and relationships to the neuronal layers. *J Comp Neurol*. 1990;297(1):145–163. doi: 10.1002/cne.902970111.
7. Snodderly DM, Weinhaus RS, Choi JC. Neural-vascular relationships in central retina of macaque monkeys (*Macaca fascicularis*). *J Neurosci*. 1992;12(4):1169–1193. doi: 10.1523/JNEUROSCI.12-04-01169.1992.
8. Ames A, Li YY, Heher EC, et al. Energy metabolism of rabbit retina as related to function: high cost of Na⁺ transport. *J Neurosci*. 1992;12(3):840–853. doi: 10.1523/JNEUROSCI.12-03-00840.1992.
9. Mihailovic N, Eter N, Alnawaiseh M. Foveal avascular zone and OCT angiography. An overview of current knowledge. *Ophthalmologie*. 2019;116(7):610–616. doi: 10.1007/s00347-018-0838-2.
10. Yu DY, Cringle SJ. Oxygen distribution and consumption within the retina in vascularised and avascular retinas and in animal models of retinal disease. *Prog Retin Eye Res*. 2001;20(2):175–208. doi: 10.1016/s1350-9462(00)00027-6.
11. Yu DY, Cringle SJ, Alder VA, Su EN, Yu PK. Intraretinal oxygen distribution and choroidal regulation in the avascular retina of guinea pigs. *Am J Physiol*. 1996;270(3 Pt 2):H965–H973. doi: 10.1152/ajpheart.1996.270.3.H965.
12. Ahmed J, Braun RD, Dunn R, et al. Oxygen distribution in the Macaque retina. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1993;34:516–521.
13. Alder VA, Cringle SJ. Intraretinal and preretinal PO₂ response to acutely raised intraocular pressure in cats. *Am J Physiol*. 1989;25:H1627–H1634. doi: 10.1152/ajpheart.1989.256.6.H1627.
14. Pournaras CJ, Tsacopoulos M, Riva CE, et al. Diffusion of O₂ in normal and ischemic retinas of anesthetized miniature pigs in normoxia and hyperoxia. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 1990;28(2):138–142. doi: 10.1007/BF00935723.
15. Файзрахманов Р.Р. Режимы назначения анти-VEGF-препаратов при терапии неоваскулярной возрастной макулярной дегенерации // *Вестник офтальмологии*. — 2018. — Т.134. — №6. — С. 107–115. [Fayzrakhmanov RR. Anti-VEGF dosing regimen for neovascular age-related macular degeneration treatment. *Vestnik oftal'mologii*. 2018;134(6):107–115. (In Russ.)] doi: 10.17116/oftalma2018134061107.
16. Файзрахманов Р.Р. Анти-VEGF терапия неоваскулярной возрастной макулярной дегенерации: от рандомизированных исследований к реальной клинической практике // *Российский офтальмологический журнал*. — 2019. — Т.12. — №2. — С. 97–105. [Fayzrakhmanov RR. Anti-VEGF therapy of neovascular age-related macular degeneration: from randomized trials to routine clinical practice. *Russian Ophthalmological Journal*. 2019;12(2):97–105. (In Russ.)] doi: 10.21516/2072-0076-2019-12-2-97-105.
17. Файзрахманов Р.Р. Озурдекс в терапии диабетического макулярного отека. Когда назначать? // *Вестник офтальмологии*. — 2019. — Т.135. — №4. — С. 121–127. [Fayzrakhmanov RR. Ozurdex in the treatment of diabetic macular edema. When to prescribe? *Vestnik oftal'mologii*. 2019;135(4):121–127. (In Russ.)] doi: 10.17116/oftalma2019135041121.
18. Файзрахманов Р.Р., Будзинская М.В. Макулярные пигменты при дегенеративных процессах сетчатки // *Вестник офтальмологии*. — 2018. — Т.5. — №1. — С. 134–140. [Fayzrakhmanov RR, Budzinskaya MV. Macular pigments in retinal degenerative processes. *Vestnik oftal'mologii*. 2018;5(1):134–140. (In Russ.)] doi: 10.17116/oftalma2018134051135.
19. Garrity ST, Iafe NA, Phasukkijwatana N, et al. Quantitative analysis of three distinct retinal capillary plexuses in healthy eyes using optical coherence tomography angiography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2017;58(12):5548. doi: 10.1167/iovs.17-22036.
20. Samara WA, Say EA, Khoo CT, et al. Correlation of foveal avascular zone size with foveal morphology in normal eyes using optical coherence tomography angiography. *Retina*. 2015;35(11):2188–2195. doi: 10.1097/IAE.0000000000000847.
21. Gómez-Ulla F, Cutrin P, Santos P, et al. Age and gender influence on foveal avascular zone in healthy eyes. *Exp Eye Res*. 2019;189:107856. doi: 10.1016/j.exer.2019.107856.
22. Bonfiglio V, Ortisi E, Scollo D, et al. Vascular changes after vitrectomy for rhegmatogenous retinal detachment: optical coherence tomography angiography study. *Acta Ophthalmol*. 2019. doi: 10.1111/aos.14315.
23. Woo JM, Yoon YS, Woo JE, et al. Foveal avascular zone area changes analyzed using OCT angiography after successful rhegmatogenous retinal detachment repair. *Curr Eye Res*. 2018;43(5):674–678. doi: 10.1080/02713683.2018.1437922.
24. Hong EH, Cho H, Kim DR, et al. Changes in retinal vessel and retinal layer thickness after vitrectomy in retinal detachment via swept-source OCT angiography. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2020;61(2):35. doi: 10.1167/iovs.61.2.35.
25. Casswell AG, Gregor ZT. Silicone oil removal. II. Operative and postoperative complications. *Br J Ophthalmol*. 1987;71(12):898–902. doi: 10.1136/bjo.71.12.898.
26. Jonas JB, Knorr HL, Rank RM, Budde WM. Retinal reattachment after removal of intraocular silicone oil tamponade. *Br J Ophthalmol*. 2001;85(10):1203–1207. doi: 10.1136/bjo.85.10.1203.
27. Bassat IB, Desatnik H, Alhalel A, et al. Reduced rate of retinal detachment following silicone oil removal. *Retina*. 2000;20(6):597–603. doi: 10.1097/00006982-200011000-00002.
28. Zilis JD, McCuen BW, de Juan EJ, et al. Results of silicone oil removal in advanced proliferative vitreoretinopathy. *Am J Ophthalmol*. 1989;108(1):15–21. doi: 10.1016/s0002-9394(14)73254-4.
29. Casswell AG, Gregor ZJ. Silicone oil removal. I. The effect on the complications of silicone oil. *Br J Ophthalmol*. 1987;71(12):893–897. doi: 10.1136/bjo.71.12.893.
30. Newsom RS, Johnston R, Sullivan PM, et al. Sudden visual loss after removal of silicone oil. *Retina*. 2004;24(6):871–877. doi: 10.1097/00006982-200412000-00005.
31. Satchi K, Bolton A, Patel CK. Loss of vision once silicone oil has been removed. *Retina*. 2005;25(6):807–808. doi: 10.1097/00006982-200509000-00030.
32. Williams PD, Fuller CG, Scott IU, et al. Vision loss associated with the use and removal of intraocular silicone oil. *Clin Ophthalmol*. 2008;2(4):955–959.
33. Xiang W, Wei Y, Chi W, et al. Effect of silicone oil on macular capillary vessel density and thickness. *Exp Ther Med*. 2020;19(1):729–734. doi: 10.3892/etm.2019.8243.
34. Lee JY, Kim JY, Lee SY, et al. Foveal microvascular structures in eyes with silicone oil tamponade for rhegmatogenous retinal detachment: a swept-source optical coherence tomography angiography study. *Sci Rep*. 2020;10(1):2555. doi: 10.1038/s41598-020-59504-3.
35. Lewis GP, Charteris DG, Sethi CS, et al. The ability of rapid retinal reattachment to stop or reverse the cellular and molecular events initiated by detachment. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2002;43(7):2412–2420.
36. Hisatomi T1, Sakamoto T, Goto Y, et al. Critical role of photoreceptor apoptosis in functional damage after retinal detachment. *Curr Eye Res*. 2002;24(3):161–172. doi: 10.1076/ceyr.24.3.161.8305.

37. Yang L, Bula D, Arroyo JG, et al. Preventing retinal detachment-associated photoreceptor cell loss in bax-deficient mice. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2004;45(2):648–654. doi: 10.1167/iovs.03-0827.
38. Arroyo JG, Yang L, Bula D, et al. Photoreceptor apoptosis in human retinal detachment. *Am J Ophthalmol*. 2005;139(4):605–610. doi: 10.1016/j.ajo.2004.11.046.
39. Newman E, Reichenbach A. The Müller cell: a functional element of the retina. *Trends Neurosci*. 1996;19(8):307–312. doi: 10.1016/0166-2236(96)10040-0.
40. Newman EA. Distribution of potassium conductance in mammalian Müller (glial) cells: a comparative study. *J Neurosci*. 1987;7(8):2423–2432.
41. Newman EA. Sodium-bicarbonate cotransport in retinal Müller (glial) cells of the salamander. *J Neurosci*. 1991;11(12):3972–3983. doi: 10.1523/JNEUROSCI.11-12-03972.1991.
42. Newman EA, Frambach DA, Odette LL. Control of extracellular potassium levels by retinal glial cell K⁺ siphoning. *Science*. 1984;225(4667):1174–1175. doi: 10.1126/science.6474173.
43. Oakley B, Katz BJ, Xu Z, et al. Spatial buffering of extracellular potassium by Müller (glial) cells in the toad retina. *Exp Eye Res*. 1992;55(4):539–550. doi: 10.1016/s0014-4835(05)80166-6.
44. Choi DW. Excitotoxic cell death. *J Neurobiol*. 1992;23(9):1261–1276. doi: 10.1002/neu.480230915.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Суханова Анна Викторовна [Anna V. Sukhanova]; адрес: 105293, Россия, Москва, ул. Нижняя Первомайская, д. 65 [address: 65 Nizhnyaya Pervomayskaya St, 105293 Moscow, Russia];
e-mail: anna.sukhanova.as@gmail.com, **SPIN-код:** 8306-6010, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8482-5637>

Файзрахманов Ринат Рустамович, д.м.н., профессор [**Rinat R. Fayzrakhmanov**, MD, PhD, Professor];
e-mail: rinatrf@gmail.com, **SPIN-код:** 1620-0083, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-4341-3572>

Павловский Олег Александрович [Oleg A. Pavlovsky]; e-mail: olegpavlovskiy@yandex.ru,
SPIN-код: 6781-1504, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3470-6282>

Ларина Евгения Артёмовна [Evgenia A. Larina, postgraduate student of ophthalmology at Pirogov's National Medical Research Center]; **e-mail:** alisme93@yandex.ru, **SPIN-код:** 8969-9526,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5343-3350>