

DOI: <https://doi.org/10.17816/OV111903>

Научная статья



Влияние ретинальной перфузии на биоэлектрическую активность сетчатки при сквозных макулярных разрывах

Т.А. Докторова^{1, 2}, А.А. Суетов^{1, 3}, Э.В. Бойко^{1, 2}, С.В. Сосновский¹¹ Санкт-Петербургский филиал Межотраслевого научно-технического комплекса «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Фёдорова, Санкт-Петербург, Россия;² Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова, Санкт-Петербург, Россия;³ Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины, Санкт-Петербург, Россия

Актуальность. Сведения о капиллярной перфузии сетчатки при идиопатическом сквозном макулярном разрыве (ИСМР) ограничены, также нет данных о возможном влиянии кровоснабжения отдельных участков и слоёв сетчатки на их функциональную активность.

Цель исследования — изучить взаимосвязь сосудистой перфузии в поверхностном и глубоком капиллярных сплетениях и биоэлектрической активности сетчатки при ИСМР.

Материалы и методы. На 18 глазах с ИСМР и 10 интактных глазах проведены мультифокальная электроретинография (мФЭРГ), оптическая когерентная томография (ОКТ) и ОКТ в ангио-режиме. В проекции отдельных гексагонов паттерна мФЭРГ сопоставили показатели биоэлектрической активности со структурными изменениями (разрыв, кистозные изменения), плотностью капилляров в поверхностном и глубоком капиллярных сплетениях.

Результаты. В группе ИСМР плотность капилляров в поверхностном капиллярном сплетении коррелировала с латентностью P_1 в гексагонах кольца R_2 ($R = -0,23, p < 0,05$), в зоне разрыва и интратетинальных кистозных изменениях ($R = -0,21$ и $R = -0,22, p < 0,05$), с амплитудой P_1 в зоне разрыва ($R = 0,24, p < 0,05$). В глубоком капиллярном сплетении плотность капилляров коррелировала с латентностью N_1 в точке фиксации и зоне разрыва ($R = -0,57$ и $R = -0,19, p < 0,05$), с латентностью P_1 в зоне разрыва ($R = -0,2, p < 0,05$), с амплитудой P_1 в гексагонах колец R_2 и R_3 ($R = 0,46$ и $R = 0,44, p < 0,05$), более выраженная в зоне разрыва и кистозных изменениях ($R = 0,54$ и $R = 0,29, p < 0,05$).

Выводы. При ИСМР существует взаимосвязь между капиллярной перфузией в различных слоях сетчатки и её биоэлектрической активностью. Снижение перфузии макулярной области на уровне глубокого капиллярного сплетения при длительно существующем разрыве может выступать предиктором низкого функционального прогноза в исходе хирургического лечения ИСМР.

Ключевые слова: сетчатка; перфузия; оптическая когерентная томография-ангиография; мультифокальная электроретинография; макулярный разрыв.

Как цитировать:

Докторова Т.А., Суетов А.А., Бойко Э.В., Сосновский С.В. Влияние ретинальной перфузии на биоэлектрическую активность сетчатки при сквозных макулярных разрывах // Офтальмологические ведомости. 2022. Т. 15. № 4. С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.17816/OV111903>

DOI: <https://doi.org/10.17816/OV111903>

Research Article

The effect of retinal perfusion on the bioelectric activity of the retina in full-thickness macular holes

Taisiia A. Doktorova^{1, 2}, Aleksei A. Suetov^{1, 3}, Ernest V. Boiko^{1, 2}, Sergei V. Sosnovskii¹

¹ S.N. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, St. Petersburg Branch, Saint Petersburg, Russia;

² North-West State Medical University named after I.I. Mechnikov, Saint Petersburg, Russia;

³ State Scientific Research Test Institute of Military Medicine, Saint Petersburg, Russia

BACKGROUND: Information on retinal capillary perfusion in idiopathic full-thickness macular hole (FTMH) is limited, and there are no data on the possible effect of blood supply to individual areas and layers of the retina on their functional activity.

AIM: To study the relationship between vascular perfusion in the superficial and deep capillary plexuses (SCP and DCP) and the bioelectrical activity of the retina in full-thickness macular hole.

MATERIALS AND METHODS: Multifocal electroretinography (mfERG), optical coherence tomography (OCT), and OCT-angiography (OCTA) were performed in 18 eyes with FTMH and 10 intact eyes. In the projection of individual hexagons of the mfERG pattern, parameters of bioelectrical activity were compared with structural changes (hole, cystic changes), capillary density in the SCP and DCP.

RESULTS: In the FTMH group, the density of capillaries in the superficial capillary plexuses correlated with P_1 implicit time in the R_2 ring hexagons ($R = -0.23$, $p < 0.05$), in the hole zone and intraretinal cystic changes ($R = -0.21$ and $R = -0.22$, $p < 0.05$), P_1 amplitude in the hole zone ($R = 0.24$, $p < 0.05$). In deep capillary plexuses, the capillary density correlated with N_1 implicit time at the fixation point and the hole zone ($R = -0.57$ and $R = -0.19$, $p < 0.05$), P_1 implicit time at the hole zone ($R = -0.2$, $p < 0.05$), P_1 amplitude in the hexagons of the R_2 and R_3 rings ($R = 0.46$ and $R = 0.44$, $p < 0.05$), more pronounced in the hole zone and cystic changes ($R = 0.54$ and $R = 0.29$, $p < 0.05$).

CONCLUSIONS: There is a correlation between capillary perfusion in different layers of the retina and its bioelectrical activity in FTMH. A decrease in perfusion in the deep capillary plexus of the macula with a chronic macular hole may be a predictor of a low functional prognosis in the outcome of surgical treatment of FTMH.

Keywords: retina; perfusion; optical coherence tomography-angiography; multifocal electroretinography; macular hole.

To cite this article:

Doktorova TA, Suetov AA, Boiko EV, Sosnovskii SV. The effect of retinal perfusion on the bioelectric activity of the retina in full-thickness macular holes. *Ophthalmology Reports*. 2022;15(4):7-14. DOI: <https://doi.org/10.17816/OV111903>

Received: 15.10.2022

Accepted: 26.12.2022

Published: 30.12.2022

АКТУАЛЬНОСТЬ

Идиопатический сквозной макулярный разрыв (ИСМР) — полнослойный дефект нейросенсорной сетчатки в области фовеа, являющийся одной из частых причин снижения зрения у людей старше 60 лет, преимущественно у женщин [1]. Данные о распространённости ИСМР варьируют в различных исследованиях, составляя с поправкой на пол и возраст до 7,9 случаев на 100 000 населения в год [2].

В патогенезе ИСМР ведущей причиной формирования разрыва считается витреомакулярный тракционный синдром при естественном течении задней отслойки стекловидного тела в условиях его аномальной адгезии в макулярной области [3]. Помимо сквозного дефекта в фовеа при ИСМР развиваются вторичные структурные изменения в окружающей разрыв сетчатке, такие как интратинальные кистозные полости и отслойка нейроэпителия по краю разрыва. Многие аспекты патогенеза вторичных изменений сетчатки остаются предметом дискуссий, при этом их наличие и характер влияют на функциональное состояние сетчатки в макулярной области, в том числе при проведении хирургического лечения [3–5].

Внедрение метода оптической когерентной томографии-ангиографии (ОКТА) позволило *in vivo* изучить и описать особенности кровоснабжения сетчатки при различной патологии органа зрения, например при возрастной макулярной дегенерации, диабетической ретинопатии, ретинальных сосудистых окклюзиях и др. [6]. В то же время, сведения о капиллярной перфузии сетчатки при ИСМР ограничены, в том числе нет данных о возможном влиянии кровоснабжения отдельных участков и слоёв сетчатки на их функциональную активность.

Цель работы — изучить взаимосвязь сосудистой перфузии в поверхностном и глубоком капиллярных сплетениях и биоэлектрической активности сетчатки при идиопатических сквозных макулярных разрывах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено в Санкт-Петербургском филиале ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С. Н. Фёдорова» Минздрава России в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации (в редакции 2003 г.) в 2022 г. Все пациенты подписывали добровольное информированное согласие на диагностическое обследование. Сформированы 2 группы: группа ИСМР (18 пациентов, 18 глаз) и группа сравнения (10 пациентов, 10 глаз) без изменений в сетчатке.

В работу включили пациентов с ИСМР I–IV стадии [1] старше 50 лет, не имевших в анамнезе и на момент осмотра воспалительных заболеваний органа зрения, глаукомы, сосудистых заболеваний сетчатки, дистрофических заболеваний макулы, макулярной неоваскуляризации, миопии более 6 дптр, а также помутнений оптических

сред, препятствующих качественной визуализации и проведению функционального тестирования.

Помимо стандартного офтальмологического обследования всем пациентам проводили ОКТ и ОКТА на томографе Cirrus HD-OCT 5000 (Carl Zeiss Meditec, Jena, Германия). В каждом случае центр области сканирования располагали в центре фовеа, использовали протоколы сканирования в режиме ОКТ, макулярный куб 512–128, и радиальные линейные структурные сканы, в режиме ОКТА область 3 × 3 мм. При регистрации выбирали изображение с уровнем сигнала не менее 8/10. Сегментация слоёв выполнялась прибором автоматически, в отдельных случаях для повышения точности проводили ручную сегментацию [7].

На линейных структурных ОКТ-сканах измеряли апикальный и базальный диаметр разрыва (мкм). На анфас-изображениях, полученных при ОКТ и ОКТА, измеряли общую площадь кистозных изменений (КИ) сетчатки на уровне внутреннего ядерного (ВЯС) и комплекса наружного плексиформного слоя и слоя Генле (НПС + СГ), площадь фовеолярной аваскулярной зоны, плотность поверхностного и глубокого капиллярного сплетения (ПКС и ГКС). Анализ производили с помощью программы Image J (Version 1.49v; NIH, США) по ранее описанным методикам [8], при этом показатели капиллярной перфузии определяли в зонах, соответствующих проекции исследуемых при мультифокальной электроретинографии 19 гексагонов (см. рисунок).

Мультифокальную электроретинографию (мфЭРГ) проводили с помощью электроретинографа «Нейро-ЭРГ» (Нейрософт, Россия) в соответствии со стандартом ISCEV в условиях световой адаптации [9]. При стимуляции использовали паттерн-стимулятор из 61 гексагона, условия предъявления обеспечивали после тестирования на сетчатке 19,7°. В качестве активного электрода использовали ретинографический электрод «крючок»; референтный и заземляющий электроды располагали на висках обследуемого. Анализировали латентность компонентов N_1 и P_1 , амплитуду компонента P_1 в кольцах R_1 – R_3 , а также в 19 отдельных гексагонах (в кольце R_1 — 1 гексагон, в кольце R_2 — 6 гексагонов, в кольце R_3 — 12 гексагонов; см. рисунок).

Для наложения паттерна при мфЭРГ на анфас-изображения слоёв сетчатки при ОКТ и ОКТА в каждом случае автоматически определяли точку фиксации при проведении фундус-контролируемой микропериметрии. Результаты ОКТ, ОКТА и данные регистрации мфЭРГ в отдельных гексагонах сопоставляли путём наложения анфас-изображений соответствующих слоёв на паттерн, используя анатомические ориентиры (диск зрительного нерва, фовеа, ретинальные сосуды; см. рисунок). Кольца паттерна R_1 , R_2 и R_3 проецируются в зонах 0–2,5°, 2,5–5,0° и 5,0–10,0° от точки фиксации и анатомически соответствуют зоне фовеа, парафовеа и перифовеа. Плотность капилляров в ПКС и ГКС в каждом интересующем гексагоне определяли с помощью программы Image J [8].

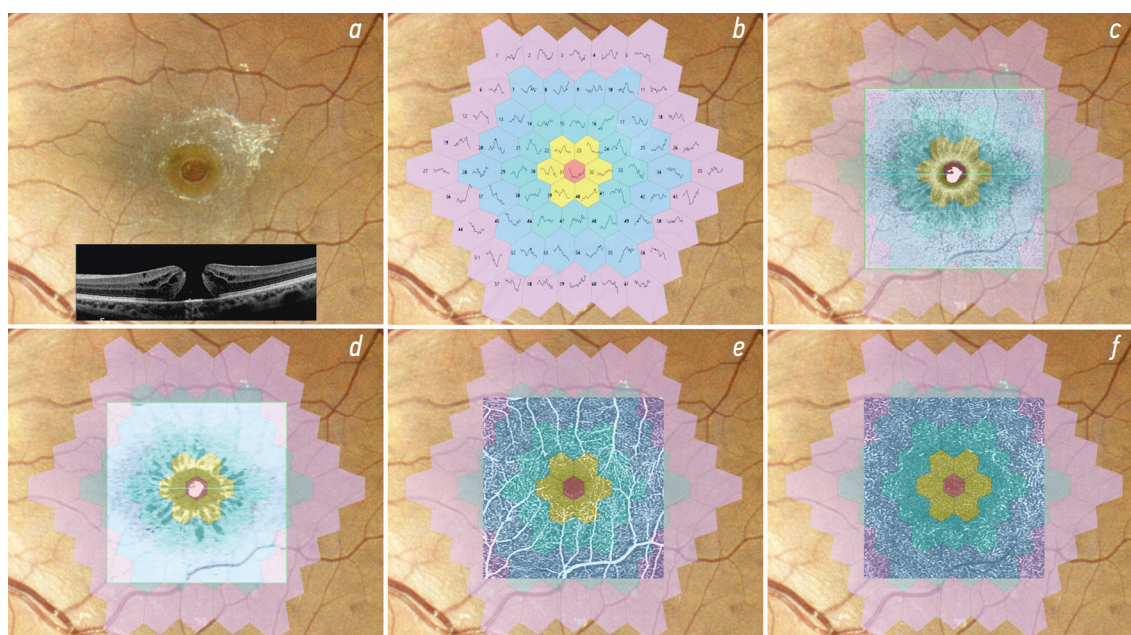


Рисунок. Пример топографического сопоставления данных мультифокальной электроретинографии (мфЭРГ) и анфас-изображений при проведении ОКТ и ОКТА: *a* — изображение глазного дна с идиопатическим сквозным макулярным разрывом и горизонтальный структурный срез через него; *b* — паттерн мфЭРГ, наложенный на изображение глазного дна; *c, d* — паттерн мфЭРГ, наложенный на анфас-изображения кистозных изменений на внутренний ядерный слой и комплекса наружного плексиформного слоя и слоя Генле при проведении ОКТ; *e, f* — паттерн мфЭРГ, наложенный на анфас-изображения поверхностного и глубокого капиллярного сплетения при проведении ОКТА

Figure. An example of topographic overlapping of multifocal electroretinography (mfERG) data and en face images during OCT and OCTA: *a* — image of the fundus with full-thickness macular hole and a horizontal structural OCT section through it; *b* — mfERG pattern superimposed on the fundus image; *c, d* — mfERG pattern superimposed on en face images of cystic changes on the inner nuclear layer and the outer plexiform layer + Henle's fiber layer complex during OCT; *e, f* — mfERG pattern superimposed on en face images of the superficial and deep capillary plexuses during OCTA

Статистическую обработку результатов исследования проводили в программе Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). Все количественные данные представлены в формате $M \pm m$. Сравнение показателей между группами выполняли с помощью непараметрического U -критерия Манна – Уитни, при нормальном распределении в выборках — с помощью t -критерия Стьюдента. Для определения связи между параметрами в группах использовали расчёт рангового коэффициента корреляции или при нормальном распределении коэффициента корреляции Пирсона. Статистически значимыми считали результаты при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пациенты в группе ИСМР и группе контроля значительно не отличались по всем показателям, за исключением максимально скорректированной остроты зрения (табл. 1).

По данным ОКТ в группе ИСМР среднее значение апикального и базального диаметра разрыва составило $421,19 \pm 164,17$ и $932,63 \pm 266,75$ мкм. Во всех случаях вокруг разрыва выявлены КИ: на уровне ВЯС они распространялись на площади $2,51 \pm 1,53$ мм² и имели мелкокистозный характер, а на уровне комплекса НПС + СГ занимали площадь $0,84 \pm 0,63$ мм², были большего размера

Таблица 1. Общая характеристика групп в исследовании, $M \pm m$

Table 1. General characteristics of the study groups, $M \pm m$

Показатель	Группа ИСМР (18 глаз)	Группа контроля (10 глаз)
Средний возраст, лет	$63,56 \pm 5,45$	$64,2 \pm 5,61$
Мужчины/женщины	4/14	1/9
Максимально скорректированная острота зрения	$0,3 \pm 0,14^{***}$	$0,81 \pm 0,25$
Рефракция, дптр	$-0,51 \pm 2,03$	$-0,75 \pm 2,71$
Переднезадний размер глазного яблока, мм	$23,48 \pm 1,02$	$23,4 \pm 1,31$

Примечание. ИСМР — идиопатический сквозной макулярный разрыв. $^{***}p < 0,001$ в сравнении со значениями контроля.

и на анфас-изображениях определялись как спицеобразные вытянутые полости, расходящиеся эксцентрично от области разрыва.

В группе ИСМР выявлены признаки угнетения биоэлектрической активности сетчатки в макулярной области: в кольце R_1 , соответствующем фовеа, наблюдалось значимое увеличение латентности компонентов N_1 ($p = 0,009$) и P_1 ($p = 0,03$) на фоне значимо более низкой амплитуды P_1 ($p = 0,0001$), в кольце R_2 , соответствующем зоне парафовеа, увеличение латентности P_1 ($p = 0,02$; табл. 2).

В центральном гексагоне R_1 и отдельных гексагонах кольца R_2 значения показателей мфЭРГ изменялись в большей степени, что было связано с расположением в их проекции сквозного дефекта (см. рисунок, табл. 2), при этом наличие регистрируемого ответа в зоне разрыва обусловлено тем, что макулярный разрыв не полностью соответствует площади проекции анализируемого гексагона в паттерне.

Вне зоны разрыва наблюдалось значимое различие показателей мфЭРГ между гексагонами, в проекции которых имелись КИ, и гексагонами, соответствующими интактной сетчатке: при наличии КИ как в ВЯС, так и на уровне НПС + СГ у компонента P_1 латентность увеличивалась, а амплитуда снижалась (табл. 2).

Несмотря на интратретиальные КИ, распространявшиеся в проекции отдельных гексагонов, в кольце R_3 , наоборот, выявлено значимое увеличение амплитуды P_1 в сравнении с контролем ($p = 0,01$; табл. 2), что, возможно, обусловливается перераспределением функциональной активности в сетчатке вне разрыва.

Площадь фовеолярной аваскулярной зоны по данным ОКТА в группе ИСМР была значимо больше, чем в группе контроля ($0,33 \pm 0,07$ и $0,22 \pm 0,16$ мм², $p = 0,02$), при этом в сетчатке, соответствующей центральному кольцу R_1 при проведении мфЭРГ, выявлена более высокая плотность капилляров в ПКС и ГКС ($p = 0,03$ и $p = 0,006$; табл. 2), что обусловлено смещением точки фиксации экстрафовеолярно и проекцией кольца R_1 по краю разрыва с захватом не только фовеолярной аваскулярной зоны, но и частично сосудистых сплетений вокруг неё (см. рисунок).

В группе ИСМР в областях сетчатки, соответствующих проекции гексагонов колец R_2 и R_3 при мфЭРГ, выявлено значимое снижение плотности капилляров ГКС при сравнении с группой контроля ($p = 0,00001$ и $p = 0,0005$; табл. 2), при этом в области интратретиальных КИ плотность капилляров в ГКС была ниже, чем в интактной сетчатке ($p = 0,0001$), а в ПКС значимо не отличалась (табл. 2).

Таблица 2. Результаты мультифокальной электроретинографии и оптической когерентной томографии-ангиографии в различных зонах сетчатки в группе идиопатического сквозного макулярного разрыва (ИСМР) и группе контроля, $M \pm m$

Table 2. Results of multifocal electroretinography and OCTA in different areas of the retina in the full-thickness macular hole group and in the control group, $M \pm m$

Группа	Показатели в тестируемых зонах						
	R_1	R_2	R_3	зона разрыва	зоны кистозных изменений	интактная сетчатка	общая тестируемая площадь
Латентность N_1 , мс							
ИСМР	28,94 ± 5,06***	28,25 ± 7,4	26,09 ± 7,3	30,1 ± 7,2	27,1 ± 7,33	26,23 ± 7,07	26,97 ± 7,25*
Контроль	22,86 ± 4,37	26,4 ± 5,7	24,52 ± 5,98	–	–	24,97 ± 5,84	24,97 ± 5,84
Латентность P_1 , мс							
ИСМР	50,59 ± 4,61*	49,11 ± 7,07*	45,65 ± 7,1	48,65 ± 6,29	47,71 ± 7,63†	46,13 ± 6,71	47,09 ± 7,15**
Контроль	44,35 ± 7,25	45,68 ± 6,78	44,39 ± 7,72	–	–	44,78 ± 7,37	44,78 ± 7,37
Амплитуда P_1 , мкВ							
ИСМР	0,18 ± 0,07***	0,25 ± 0,17	0,35 ± 0,2*	0,14 ± 0,07	0,24 ± 0,15†	0,4 ± 0,2	0,30 ± 0,19
Контроль	0,47 ± 0,15	0,31 ± 0,11	0,28 ± 0,13	–	–	0,29 ± 0,13	0,29 ± 0,13
Поверхностное капиллярное сплетение, %							
ИСМР	6,86 ± 9,09*	28,16 ± 16,20	39,03 ± 14,67	14,46 ± 19,44	33,09 ± 16,54	36,98 ± 15,42	33,21 ± 17,34
Контроль	0,04 ± 0,04	31,46 ± 8,44	41,88 ± 10,39	–	–	35,46 ± 14,68	35,46 ± 14,68
Глубокое капиллярное сплетение, %							
ИСМР	2,05 ± 2,36**	11,25 ± 7,52***	29,51 ± 10,97***	2,46 ± 1,89	15,45 ± 9,92†	32,35 ± 10,2	21,78 ± 13,88**
Контроль	0,42 ± 0,77	21,81 ± 4,81	34,94 ± 8,38	–	–	28,25 ± 12,28	28,25 ± 12,28

Примечание. * $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$ в сравнении со значениями контроля; † $p < 0,05$ в сравнении с интактной сетчаткой.

Таблица 3. Корреляция показателей оптической когерентной томографии-ангиографии и мультифокальной электроретинографии в макулярной области**Table 3.** Correlation of OCTA and multifocal electroretinography parameters in the macular area

Сопоставляемые показатели		Коэффициент корреляции показателей в тестируемой зоне						
		R ₁	R ₂	R ₃	зона разрыва	зоны кистозных изменений	интактная сетчатка	общая площадь
Группа ИСМР								
ПКС	Латентность N ₁	-0,25	-0,01	-0,12	-0,12	-0,09	-0,11	-0,14*
	Латентность P ₁	0,02	-0,23*	-0,03	-0,21*	-0,22*	-0,08	-0,21*
	Амплитуда P ₁	0,15	0,03	0,1	0,24*	0,16	0,11	0,22*
ГКС	Латентность N ₁	-0,57*	-0,13	-0,02	-0,19*	-0,12	-0,07	-0,15*
	Латентность P ₁	-0,06	-0,08	0,11	-0,2*	-0,1	-0,06	-0,15*
	Амплитуда P ₁	0,41	0,46*	0,44*	0,54*	0,29*	0,26*	0,5*
Группа контроля								
ПКС	Латентность N ₁	0,07	-0,06	0,05	—	—	0,04	0,04
	Латентность P ₁	0,43	-0,06	-0,14	—	—	-0,09	-0,09
	Амплитуда P ₁	0,26	-0,23	-0,12	—	—	-0,38*	-0,38*
ГКС	Латентность N ₁	-0,4	0,12	0,05	—	—	0,03	0,03
	Латентность P ₁	-0,22	0,07	-0,1	—	—	-0,07	-0,07
	Амплитуда P ₁	0,48	0,18	0,09	—	—	-0,25*	-0,25*

* $p < 0,05$. *Примечание.* ИСМР — идиопатический сквозной макулярный разрыв; ПКС — поверхностное капиллярное сплетение; ГКС — глубокое капиллярное сплетение.

При анализе взаимосвязи перфузии в ПКС и ГКС с показателями биоэлектрической активности в пределах тестируемой при мФЭРГ сетчатки, в группе ИСМР выявлена обратная связь с латентностью N₁ и P₁ и прямая связь с амплитудой P₁ (табл. 3), сильная корреляция отмечена между плотностью капилляров в ГКС и амплитудой компонента P₁ ($R = 0,5$, $p < 0,05$). В отличие от группы ИСМР, в группе контроля между плотностью капилляров в ПКС и ГКС и амплитудой P₁ корреляция имела обратный характер ($R = -0,38$ и $R = -0,25$, $p < 0,05$; табл. 3), что обусловлено сохранностью зоны фовеа, в которой регистрировалось наибольшее значение амплитуды P₁ (табл. 2).

При сопоставлении данных перфузии сетчатки и показателей мФЭРГ в кольцах гексагонов R₁–R₃, в кольце R₁ (точка фиксации) выявлена сильная обратная связь между плотностью капилляров в ГКС и латентностью N₁ ($R = -0,57$, $p < 0,05$; табл. 3), в кольце R₂ — слабая обратная корреляция плотности капилляров в ПКС и латентности P₁ ($R = -0,23$, $p < 0,05$; табл. 3). Одновременно, во всех кольцах отмечена умеренная корреляция плотности капилляров в ГКС и амплитуды компонента P₁, при этом в кольцах R₂ и R₃ корреляция имела значимый характер ($R = 0,46$ и $R = 0,44$, $p < 0,05$; табл. 2). В группе контроля анализ по кольцам R₁–R₃ не выявил значимой взаимосвязи показателей мФЭРГ и ОКТА в интактной сетчатке (табл. 3).

В зоне сквозного разрыва и интратретиальных КИ характер и сила корреляционной связи между показателями

мФЭРГ и ОКТА были сходными с таковыми для всей тестируемой сетчатки, при этом более выраженная корреляция прослеживалась с плотностью капилляров в ГКС ($p < 0,05$; табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о наличии взаимосвязи между перфузией и функциональными показателями не только в зоне самого разрыва, но и в окружающей разрыв сетчатке, при этом подобная связь может иметь значение в патогенезе как на этапах формирования, так и при последующем персистировании разрыва, а также может влиять на результаты хирургического лечения ИСМР. В исследовании отмечена наибольшая связь показателей мФЭРГ с перфузией в ГКС в местах наличия интратретиальных КИ.

Считается, что субстратом для формирования КИ служат клетки Мюллера [10]. Однако точные механизмы развития КИ при ИСМР остаются дискуссионными: является ли кистообразование следствием накопления жидкости внутри клеток Мюллера из-за их дистрофических изменений или связано с проникновением жидкости в межклеточное пространство через края разрыва [11].

Мюллеровские клетки, регулируя градиент ионов K⁺ на мембранах клеток, а также участвуя в метаболизме нейротрансмиттеров, оказывают значительное влияние на процессы биоэлектrogenеза и трансдукции сигнала

в сетчатке [12]. Поэтому их повреждение может способствовать нарушению функции биполярных клеток, являющихся основным источником генерации сигнала регистрируемой мФЭРГ. Проведённое исследование подтверждает это: более выраженное снижение амплитуды при увеличении латентности компонента P_1 выявлено, помимо зоны разрыва, в гексагонах, в проекции которых находили КИ сетчатки.

Выявленное в исследовании изменение перфузии в капиллярных сплетениях, особенно в ГКС, может быть ещё одним возможным механизмом если не развития кистообразования, то его усиления, так как развивающаяся ишемия сетчатки сопровождается усилением отёка с функциональными нарушениями клеток в зоне повреждения. Подобный механизм ранее был предложен для объяснения патогенеза макулярного отёка при диабете и синдроме Ирвина – Гасса [13]. Исходя из полученных данных, можно предположить, что дисфункция клеток Мюллера и соответствующие нарушения в работе биполярных клеток на фоне изменения перфузии сетчатки с длительно существующим отёком может значительно угнетать функциональную активность сетчатки в вовлечённых участках, что может быть причиной низких функциональных результатов лечения ИСМР.

Проведённое исследование имеет ряд ограничений. В частности, при сопоставлении данных мФЭРГ и ОКТА возможно их пространственное смещение. Для минимизации возможных несоответствий анализ проведён по одинаковому протоколу во всех случаях. Кроме того, чтобы снизить вероятность возможного расхождения результатов ОКТА из-за их вариабельности, мы использовали снимки наилучшего качества из серии выполненных при тестировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Duker J.S., Kaiser P.K., Binder S., et al. The international vitreomacular traction study group classification of vitreomacular adhesion, traction, and macular hole // *Ophthalmology*. 2013. Vol. 120, No. 12. P. 2611–2619. DOI: 0.1016/j.ophtha.2013.07.042
2. Forsaa V.A., Lindtjørn B., Kvaløy J.T., et al. Epidemiology and morphology of full-thickness macular holes // *Acta Ophthalmol*. 2018. Vol. 96, No. 4. P. 397–404. DOI: 10.1111/aos.13618
3. Ezra E. Idiopathic full thickness macular hole: Natural history and pathogenesis // *Br J Ophthalmol*. 2001. Vol. 85, No. 1. P. 102–108. DOI: 10.1136/bjo.85.1.102
4. Caprani S.M., Donati S., Bartalena L., et al. Macular hole surgery: The healing process of outer retinal layers to visual acuity recovery // *Eur J Ophthalmol*. 2017. Vol. 27, No. 2. P. 235–239. DOI: 10.5301/ejo.5000905
5. Nair U., Sheth J.U., Indurkar A., Soman M. Intraretinal cysts in macular hole: A structure-function correlation based on en face imaging // *Clin Ophthalmol*. 2021. Vol. 15. P. 2953–2962. DOI: 10.2147/OPHT.S321594
6. de Carlo T.E., Romano A., Waheed N.K., Duker J.S. A review of optical coherence tomography angiography (OCTA) // *Int J Retin Vitre*. 2015. Vol. 1, No. 1. ID5. DOI: 10.1186/s40942-015-0005-8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при ИСМР существует взаимосвязь между капиллярной перфузией в различных слоях сетчатки и её биоэлектрической активностью. Снижение перфузии макулярной области на уровне глубокого капиллярного сплетения при длительно существующем разрыве может выступать предиктором низкого функционального прогноза в исходе хирургического лечения ИСМР.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

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

Источник финансирования. Исследование не имело финансового обеспечения или спонсорской поддержки.

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

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. Thereby, all authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study.

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

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

7. Coscas F., Sellam A., Glacet-Bernard A., et al. Normative data for vascular density in superficial and deep capillary plexuses of healthy adults assessed by optical coherence tomography angiography // *Investig Ophthalmol Vis Sci*. 2016. Vol. 57, No. 9. P. 211–223. DOI: 10.1167/iovs.15-18793
8. Shahlaee A., Rahimy E., Hsu J., et al. Preoperative and postoperative features of macular holes on en face imaging and optical coherence tomography angiography // *Am J Ophthalmol Case Rep*. 2017. Vol. 5. P. 20–25. DOI: 10.1016/j.ajoc.2016.10.008
9. Hoffmann M.B., Bach M., Kondo M., et al. ISCEV standard for clinical multifocal electroretinography (mfERG) (2021 update) // *Doc Ophthalmol*. 2021. Vol. 142, No. 1. P. 5–16. DOI: 10.1007/s10633-020-09812-w
10. Premi E., Donati S., Azzi L., et al. Macular holes: main clinical presentations, diagnosis, and therapies // *J Ophthalmol*. 2022. Vol. 2022. ID2270861. DOI: 10.1155/2022/2270861
11. Daruich A., Matet A., Moulin A., et al. Mechanisms of macular edema: Beyond the surface // *Prog Retin Eye Res*. 2018. Vol. 63. P. 20–68. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.10.006

12. Bringmann A, Pannicke T, Grosche J, et al. Müller cells in the healthy and diseased retina // *Prog Retin Eye Res.* 2006. Vol. 25, No. 4. P. 397–424. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2006.05.003

13. Spaide R.F. Retinal vascular cystoid macular Edema: Review and new theory // *Retina.* 2016. Vol. 36, No. 10. P. 1823–1842. DOI: 10.1097/IAE.0000000000001158

REFERENCES

1. Duker JS, Kaiser PK, Binder S, et al. The international vitreomacular traction study group classification of vitreomacular adhesion, traction, and macular hole. *Ophthalmology.* 2013;120(12):2611–2619. DOI: 10.1016/j.ophtha.2013.07.042
2. Forsaas VA, Lindtjørn B, Kvaløy JT, et al. Epidemiology and morphology of full-thickness macular holes. *Acta Ophthalmol.* 2018;96(4):397–404. DOI: 10.1111/aos.13618
3. Ezra E. Idiopathic full thickness macular hole: Natural history and pathogenesis. *Br J Ophthalmol.* 2001;85(1):102–108. DOI: 10.1136/bjo.85.1.102
4. Caprani SM, Donati S, Bartalena L, et al. Macular hole surgery: The healing process of outer retinal layers to visual acuity recovery. *Eur J Ophthalmol.* 2017;27(2):235–239. DOI: 10.5301/ejo.5000905
5. Nair U, Sheth JU, Indurkar A, Soman M. Intraretinal cysts in macular hole: A structure-function correlation based on en face imaging. *Clin Ophthalmol.* 2021;15:2953–2962. DOI: 10.2147/OPTH.S321594
6. de Carlo TE, Romano A, Waheed NK, Duker JS. A review of optical coherence tomography angiography (OCTA). *Int J Retin Vitre.* 2015;1(1):5. DOI: 10.1186/s40942-015-0005-8
7. Coscas F, Sellam A, Glacet-Bernard A, et al. Normative data for vascular density in superficial and deep capillary plexuses of healthy

adults assessed by optical coherence tomography angiography. *Investig Ophthalmol Vis Sci.* 2016;57(9):211–223. DOI: 10.1167/iovs.15-18793

8. Shahlaee A, Rahimy E, Hsu J, et al. Preoperative and postoperative features of macular holes on en face imaging and optical coherence tomography angiography. *Am J Ophthalmol Case Rep.* 2017;5:20–25. DOI: 10.1016/j.ajoc.2016.10.008
9. Hoffmann MB, Bach M, Kondo M, et al. ISCEV standard for clinical multifocal electroretinography (mfERG) (2021 update). *Doc Ophthalmol.* 2021;142(1):5–16. DOI: 10.1007/s10633-020-09812-w
10. Premi E, Donati S, Azzi L, et al. Macular holes: main clinical presentations, diagnosis, and therapies. *J Ophthalmol.* 2022;2022:2270861. DOI: 10.1155/2022/2270861
11. Daruich A, Matet A, Moulin A, et al. Mechanisms of macular edema: Beyond the surface. *Prog Retin Eye Res.* 2018;63:20–68. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.10.006
12. Bringmann A, Pannicke T, Grosche J, et al. Müller cells in the healthy and diseased retina. *Prog Retin Eye Res.* 2006;25(4):397–424. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2006.05.003
13. Spaide R.F. Retinal vascular cystoid macular Edema: Review and new theory. *Retina.* 2016;36(10):1823–1842. DOI: 10.1097/IAE.0000000000001158

ОБ АВТОРАХ

***Тaisia Александровна Докторова**, аспирант кафедры офтальмологии, врач-офтальмолог; адрес: Россия, 192283, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ярослава Гашека, д. 21; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2162-4018>; eLibrary SPIN: 4286-6100; e-mail: taisiiodok@mail.ru

Алексей Александрович Суетов, канд. мед. наук, врач-офтальмолог, ст. научн. сотр.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8670-2964>; eLibrary SPIN: 4286-6100; e-mail: ophtalm@mail.ru

Эрнест Витальевич Бойко, д-р мед. наук, профессор, заслуженный врач РФ; чл.-корр. Военно-медицинской академии; заведующий кафедрой офтальмологии; директор; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-7478>; e-mail: boiko111@list.ru

Сергей Викторович Сосновский, канд. мед. наук, офтальмолог, заместитель директора по лечебной работе; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-6240>; e-mail: svsosnovsky@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Taisia A. Doktorova**, Postgraduate Student, Ophthalmologist; address: 21, Yaroslava Gasheka st., Saint Petersburg, 192283, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2162-4018>; eLibrary SPIN: 4286-6100; e-mail: taisiiodok@mail.ru

Aleksei A. Suetov, MD, Cand. Sci. (Med.), Ophthalmologist, Senior Research Associate; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8670-2964>; eLibrary SPIN: 4286-6100; e-mail: ophtalm@mail.ru

Ernest V. Boiko, MD, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Ophthalmology Department; Corresponding member of the Military Medical Academy; Director; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7413-7478>; e-mail: boiko111@list.ru

Sergei V. Sosnovskii, MD, Cand. Sci. (Med.), Ophthalmologist, Deputy Director of Clinical Services; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8969-6240>; e-mail: svsosnovsky@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author