# ОДНОРОДНОСТЬ ОЖОГОВ НА ГЛАЗНОМ ДНЕ ПРИ ПАТТЕРН-ЛАЗЕРНОЙ КОАГУЛЯЦИИ

**Суетов А.А.*** [1], **Бойко Э.В.**[1, 2, 3], **Докторова Т.А.**[1], **Измайлов А.С.**[1]

[1] *ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова», Санкт-Петербургский филиал, Санкт-Петербург*

[2] *ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова», Санкт-Петербург*

[3] *ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург*

DOI: 10.25881/20728255_2026_21_4_S1_102

**Резюме.** Обоснование. Современные лазерные системы реализуют технологию паттернов, что позволяет ускорить процесс лечения. Тем не менее, нанесение ожогов в паттерне не учитывает возможное различие в интенсивности формируемых ожогов в отдельных точках вследствие изменяющихся условий проведения воздействия (различий в пигментации глазного дна, прозрачности сред, изменения фокусных расстояний), при этом степень таких различий ожогов в паттерне остается малоизученной.

Цель. Изучить однородность ожогов по интенсивности при проведении паттерн-лазерной коагуляции глазного дна в конвенциональных режимах.

Материалы и методы. Фундус-изображения 4 глаз проанализированы с помощью программы Image J после проведения паттерн-лазерной коагуляции через панфундус-линзу с нанесением ожогов в 90 паттернах из 7 точек, расположенных в трех зонах: зона 1, соответствующая полю 450 с центром в фовеа, зона 2, соответствующая полю от 450 до 900, и зона 3, охватывающая участки глазного дна периферийнее зоны 2. Параметры лазерного воздействия: длина волны 532 нм, диаметр пятна на сетчатке 400 мкм, длительность импульсов 20 и 30 мс, целевая интенсивность - ожоги 2 степени по F.A. L'Esperance. Анализировали интенсивность и коэффициент вариации ожогов в паттернах в разных зонах.

Результаты. Интенсивность ожогов в зоне 1 при импульсах 30 мс была значимо выше, чем при импульсах 20 мс (1,13±0,03 и 1,09±0,04, p<0,001). В зоне 2 интенсивность ожогов с длительностью импульсов 20 мс и 30 мс составила 1,17±0,04 и 1,18±0,08 (p = 0,08), а в зоне 3 соответственно 1,18±0,04 и 1,19±0,08 (p = 0,25). Интенсивность ожогов в разных зонах значимо отличалась как при использовании импульсов 20 мс (F = 143,82, p<0,001), так и при использовании импульсов 30 мс (F = 20,92, p<0,001). Коэффициент вариации интенсивности ожогов в паттернах составил при длительности импульсов 20 мс 1,93±0,78%, при длительности 30 мс 2,27±1,17% (p = 0,127), при этом в зоне 1 выявлено значимое отличие показателя (1,42±0,42% и 2,09±0,88%, p = 0,013).

Заключение. Использование фиксированных параметров воздействия при паттерн-лазерной коагуляции может сопровождаться формированием неоднородных по интенсивности ожогов как внутри отдельных паттернов, так и в разных по удаленности от заднего полюса зонах глазного дна. Более выраженное различие ожогов по интенсивности наблюдается при использовании импульсов с длительностью 30 мс в сравнении с импульсами 20 мс.

**Ключевые слова:** сетчатка, лазер, лазерная коагуляция, паттерн, интенсивность ожога.

## HOMOGENEITY OF BURNS ON THE FUNDUS DURING PATTERN LASER COAGULATION

**Suetov A.A.*** [1], **Boiko E.V.**[1, 2, 3], **Doktorova T.A.**[1], **Izmaylov A.S.**[1]

[1] *St. Petersburg Branch S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, St. Petersburg*

[2] *Mechnikov North-West State Medical University, St. Petersburg*

[3] *St. Petersburg State University, St. Petersburg*

**Abstract.** Background. Modern laser systems utilize patterned delivery technology to speed up the treatment process. However, the pattern-based application of burns does not take into account potential variations in the intensity of burns formed at individual points due to differing treatment conditions (such as differences in fundus pigmentation, optic media transparency, and changes in focus distances). The extent to which such variations occur in patterned burns is not yet fully understood.

Aim. To investigate the homogeneity of burn intensity on the fundus during pattern laser coagulation performed under conventional settings.

Materials and methods. Fundus images of 4 eyes were analyzed using ImageJ software following pattern laser photocoagulation performed through a pan-fundus lens, with burns applied in 90 patterns consisting of 7 points located in three zones: Zone 1, corresponding to a 450-field centered on the fovea, Zone 2, corresponding to a field ranging from 450 to 900, and Zone 3, covering areas of the fundus more peripheral than Zone 2. The following parameters were used for the laser treatment: a wavelength of 532 nm, a retinal spot diameter of 400 μm, pulse durations of 20 and 30 ms, and a target intensity of degree 2 according to F.A. L'Esperance. The intensity and coefficient of variation of the burns in the patterns across different zones were analyzed.

Results. The burn intensity in Zone 1 was significantly higher for 30-ms pulses than for 20-ms pulses (1.13±0.03 and 1.09±0.04, p < 0.001). In zone 2, the burn intensity for pulse durations of 20 ms and 30 ms was 1.17±0.04 and 1.18±0.08 (p = 0.08), and in Zone 3, 1.18±0.04 and 1.19±0.08, respectively (p = 0.25). Burn intensity differed significantly across zones both when using 20-ms pulses (F = 143.82, p < 0.001) and when using 30-ms pulses (F = 20.92, p < 0.001). The coefficient of variation for burn intensity in the patterns was 1.93±0.78% for 20-ms pulse durations and 2.27±1.17% for 30-ms pulse durations (p = 0.127), with a significant difference in this indicator observed in Zone 1 (1.42±0.42% and 2.09±0.88%, p = 0.013).

Conclusion. The use of fixed treatment parameters in pattern laser coagulation may result in burns of varying intensity, both within separate patterns and in areas of the fundus located at different distances from the posterior pole. A more pronounced difference in burn intensity is observed when using 30-ms pulses compared to 20-ms pulses.

**Keywords:** retina, laser, laser photocoagulation, pattern, burn intensity.

### Актуальность

Различные варианты лазерной коагуляции остаются важным звеном в лечении заболеваний глазного дна [1; 2]. При этом, как правило, требуется нанесение серии лазерных ожогов определенной интенсивности и в определенном пространственном расположении. Например, при лечении пролиферативной диабетической ретинопатии на глазном дне необходимо разместить несколько тысяч лазерных ожогов вне макулярной области, при этом их интенсивность и расстояние между ними выбираются оператором исходя из тяжести течения заболевания [3]. В то же время, избыточная коагуляция на глазном дне может нести риски побочных эффектов лазерного лечения, а также развития осложнений [4]. При использовании традиционных одноточечных лазерных систем процедура лечения может занимать продолжительное

* e-mail: ophtalm@mail.ru

время, а также сопровождаться значительными болевыми ощущениями у пациента. Хотя использование режима автоповтора и уменьшение длительности импульсов при воздействии позволили оптимизировать процесс лечения, но по-настоящему лазерная коагуляция изменилась вместе с разработкой технологии паттерн-лазерной коагуляции: нанесение ожогов по заранее выбранным шаблонам с точным позиционированием лазерного луча при минимальных значениях длительности импульса и временном интервале между импульсами значительно ускорили процесс лечения [5; 6]. В то же время известно, что интенсивность ожогов в разных точках глазного дна при использовании одинаковых значений плотности мощности лазерного излучения может отличаться вследствие изменяющихся условий проведения воздействия (различий в пигментации глазного дна, прозрачности сред, изменений фокусных расстояний). Если в одноточечных системах оператор может последовательно корректировать энергетические параметры для каждого импульса, то при работе с паттернами изменение параметров уже в момент нанесения серии ожогов затруднено. При этом вопрос количественной оценки однородности ожогов при проведении паттерн-лазерной коагуляции в условиях клинической практики остается недостаточно освещенным.

## Цель

Изучить однородность по интенсивности формируемых на глазном дне ожогов при проведении паттерн-лазерной коагуляции в конвенциональных режимах.

## Материалы и методы

В проспективное наблюдательное нерандомизированное исследование включили 2 пациентов (4 глаза) с пролиферативной диабетической ретинопатией и прозрачными оптическими средами и сходным уровнем пигментации глазного дна, которым проводили 1–2 этап панретинальной лазерной коагуляции (ПРЛК). Лазерное воздействие проводили с помощью лазерной системы Integre Pro Scan (Ellex Medical, Австралия) с длиной волны лазерного излучения 532 нм, при этом использовали гексагональные паттерны из 7 точек с расстоянием между ожогами в 1 диаметр ожога, диаметром пятна на сетчатке 400 мкм, длительностью импульсов 20 мс и 30 мс. Интенсивность ожогов титровали в области глазного дна сразу за височными аркадами, при этом настраивали значения мощности до получения ожогов 2 степени по градации F.A. L'Esperance так, чтобы исходные ожоги при длительности импульсов 20 и 30 мс офтальмоскопически выглядели одинаково [7]. В качестве фундус-линзы использовали панфундус линзу Volk Super Quad® 160 PRP Laser Lens (Volk Optical, США). В работе были выделены три зоны глазного дна, в которых отдельно анализировали паттерны, наносимые через различные области линзы: зона 1, соответствующая полю 450 с центром в фовеа, зона 2, соответствующая полю от 450 до 900, и зона 3, охватывающая участки глазного дна периферийнее зоны 2 (Рис. 1).

В 90 паттернах (по 15 паттернов в зонах 1–3 и при длительности импульсов 20 и 30 мс) анализировали яркость ожогов внутри паттернов с помощью фундус-изображений, полученных на фундус-камере Clarus 500 (Carl Zeiss Meditec., Германия) непосредственно после проведения лазерного лечения (Рис. 1). Количественную оценку яркости осуществляли с помощью программы Image J (NIH, США, ver.1.8.0_172), при этом участок изображения глазного дна с нанесенными ожогами переводили в цветовое пространство Lab, и в изображении, соответствующем каналу L, выделяли интересующие области ожогов и измеряли значение средней яркости в каждом из них. Учитывали показатели средней яркости ожога и фона в области нанесения паттерна.

Статистический анализ результатов производили в пакете программ Numiqo: Online Statistics Calculator (DATAtab e.U. Graz, Австрия). Результаты представлены в виде M±m. В общей выборке и для ожогов, нанесенных через центральную и периферическую часть линзы, анализировали среднюю яркость ожогов в паттернах, интенсивность ожогов, измеренную как соотношение яркости ожога к яркости фона, а также частоту ожогов 2 и 3 степени по F.A. L'Esperance в каждом из паттернов и коэффициент вариации яркости ожогов в паттерне V (%). Анализ различия значений показателей в отдельных группах проводили с помощью t-критерия Стьюдента и дисперсионного анализа ANOVA. Статистически значимыми считали результаты с уровнем значимости $p<0,05$.

## Результаты

При титровании мощности для получения ожогов 2 степени по F.A. L'Esperance при длительности импульсов 20 мс потребовалась мощность 320 мВт, офтальмоскопически одинаковая яркость ожогов при длительности импульсов 30 мс была получена при мощности 280 мВт.

На изображениях глазного дна, полученных после проведения ПРЛК, средняя яркость ожогов в паттернах при длительности импульсов 20 мс составила 40,6±3,8, варьируя от 40,2±3,0 в зоне 1 до 40,4±4,7 в зоне 2 и 41,6±3,3 в зоне 3. При длительности импульсов 30 мс средняя яркость ожогов составила 39,9±5,8, варьируя от 38,4±5,7 в зоне 1 до 39,5±4,5 в зоне 2 и 42,4±6,4 в зоне 3 (Рис. 1). Средняя яркость фона в местах нанесения ожогов составила 35,71±3,7 в областях с паттернами 20 мс и 34,4±5,7 в областях с паттернами 30 мс ($p = 0,231$).

Интенсивность ожогов, измеренная как отношение яркости ожога к яркости фона, в общей выборке была значимо выше при длительности импульсов 30 мс, составляя соответственно 1,14±0,06 при импульсах 20 мс и 1,17±0,07 при импульсах 30 мс ($p<0,001$; Рис. 2).

При анализе интенсивности ожогов в отдельных зонах глазного дна было выявлено, что в зоне 1, несмотря на исходно офтальмоскопически одинаковую яркость ожо-

гов, полученных при титровании энергии, интенсивность ожогов при импульсах 30 мс была значимо выше, чем при импульсах 20 мс, составляя соответственно 1,13±0,03 и 1,09±0,04 (p<0,001; Рис. 2). В зоне 2 интенсивность ожогов с длительностью импульсов 20 мс и 30 мс составила 1,17±0,04 и 1,18±0,08 (p = 0,08), а в зоне 3 соответственно 1,18±0,04 и 1,19±0,08 (p = 0,25).

Интенсивность ожогов в разных зонах значимо отличалась как при использовании импульсов 20 мс (ANOVA, F = 143,82, p<0,001), так и при использовании импульсов 30 мс (ANOVA, F = 20,92, p<0,001), при этом post-hoc анализ с поправкой Бонферрони показал, что отличия интенсивности значимые для ожогов из зоны 1 от остальных, а ожоги в зонах 2 и 3 между собой не различаются.

При анализе вариабельности ожогов по интенсивности внутри отдельных паттернов, что коэффициент вариации для всех паттернов с длительностью импульсов 20 мс составил 1,93±0,78%, а для паттернов с длительностью импульсов 30 мс 2,27±1,17% (p = 0,127; Рис. 3).

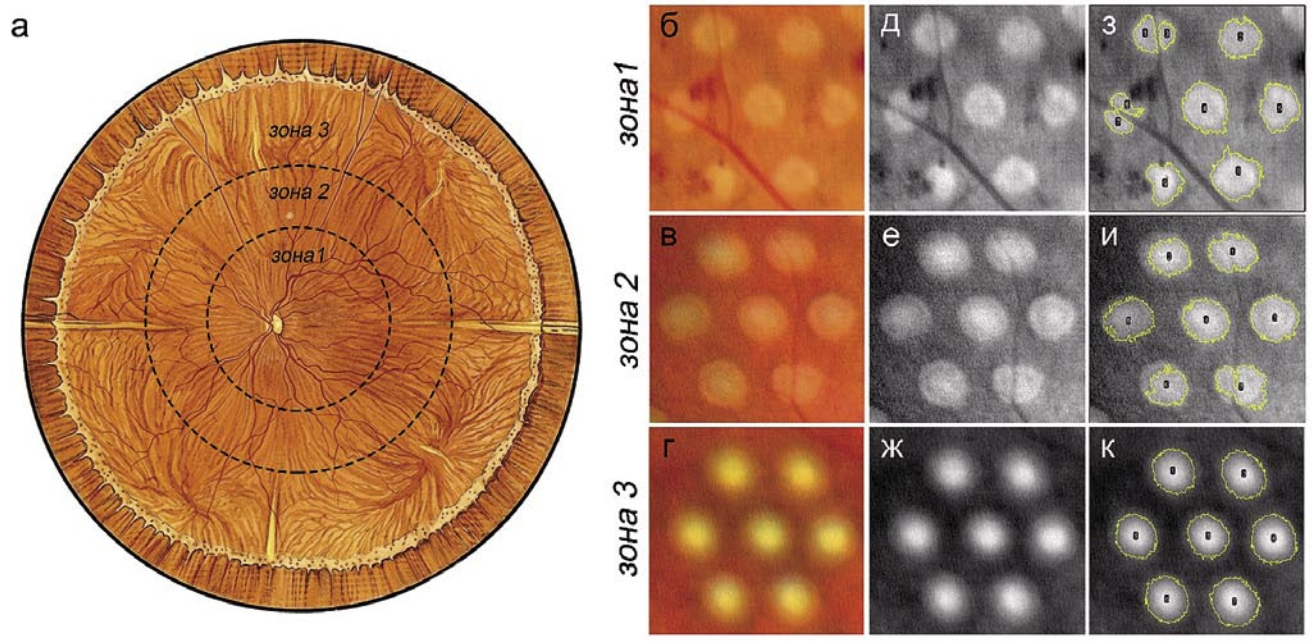



**Рис. 1.** Общая схема локализации анализируемых зон на глазном дне (а), пример паттернов при длительности импульсов 30 мс в зоне 1 (б), зоне 2 (в) и 3

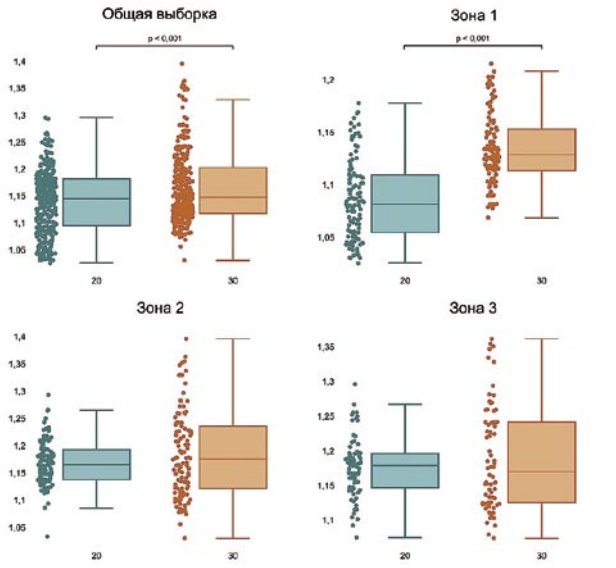



**Рис. 2.** Интенсивность ожогов как отношение измеренных яркости ожогов и фона в общих выборках ожогов, а также в подгруппах из зоны 1, 2 и 3 при использовании импульсов в паттернах 20 и 30 мс.

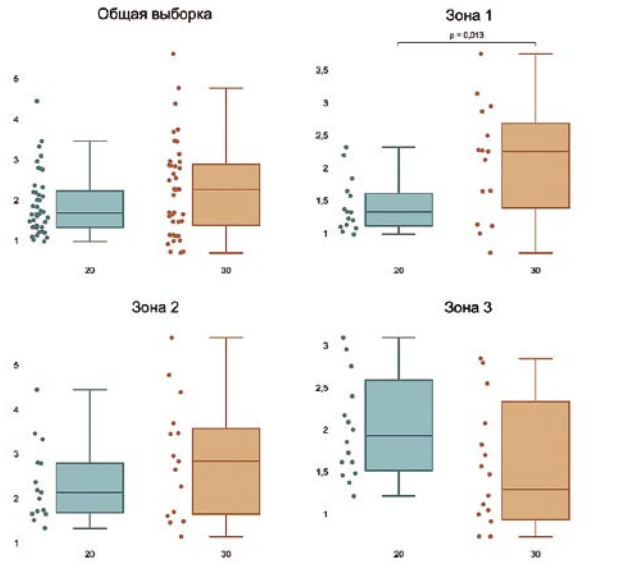



**Рис. 3.** Коэффициент вариации ожогов в паттернах при длительности импульсов 20 и 30 мс в общих выборках ожогов, а также в подгруппах из зоны 1, 2 и 3.

Сравнение коэффициентов вариации интенсивности ожогов в паттернах при длительности импульсов 20 и 30 мс выявило значимое отличие в зоне 1 (1,42±0,42% и 2,09±0,88%, p = 0,013; Рис. 3). В то же время показатели значимо не отличались в зоне 2 (2,34±0,87% и 2,90±1,34%, p = 0,187) и в зоне 3 (2,05±0,67% и 1,59±0,85%, p = 0,189).

Анализ вариабельности интенсивности ожогов в паттернах выявил наличие значимых отличий между зонами как при использовании импульсов 20 мс (ANOVA, F = 7,08, p = 0,002), так и при использовании импульсов 30 мс (ANOVA, F = 4,85, p = 0,013). В соответствии с данными post-hoc анализа с поправкой Бонферрони, при попарном сравнении показателей в разных зонах отличие выявлено между зоной 1 и 2 (p = 0,002) при нанесении паттернов ожогов с длительностью импульсов 20 мс и отличие между зонами 2 и 3 (p = 0,014) при нанесении паттернов ожогов с длительностью импульсов 30 мс.

На фундус-изображениях было выявлено, что ожоги, интенсивность которых составила 1,7 и более, соответствовали 3 степени ожогов по F.A. L'Esperance, а менее – 2 степени. При использовании паттернов с длительностью импульсов 20 мс частота получения внутри отдельных паттернов ожогов 3 степени по L'Esperance, свидетельствующих об избыточном воздействии, увеличивалась от центра к периферии глазного дна, составляя 1,87±4,93% в зоне 1, 54,33±33,42% в зоне 2 и 62,7±31,78% в зоне 3 (ANOVA, F = 21,87, p <0,001), при этом попарное сравнение в ходе post-hoc анализа не выявило значимых отличий в частоте ожогов 3 степени между зонами воздействия 2 и 3 (p = 0,98). При использовании паттернов с длительностью импульсов 30 мс частота получения ожогов 3 степени по L'Esperance внутри паттерна составляла 16,27±27,51% в зоне 1, 54,40±41,13% в зоне 2 и 51,6±43,13% в зоне 3 (ANOVA, F = 4,67, p = 0,015), при этом при попарном сравнении показателей в ходе post-hoc анализа с поправкой Бонферрони, частота была значимо ниже в зоне 1 относительно зоны 2 (p = 0,023), но не было значимых отличий между зонами 1 и 3 (p = 0,08) и зонами 2 и 3 (p = 0,99). Сравнение частоты получения ожогов 3 степени по L'Esperance внутри паттерна между группами с длительностью импульсов 20 мс и 30 мс не выявило значимых различий в отдельных зонах.

В исследовании паттерн-лазерная коагуляция была выполнена в условиях прозрачных оптических сред и при использовании конвенциональных режимов работы - диаметре лазерного пятна на сетчатке 400 мкм, длительности импульсов 20 и 30 мс с формированием ожогов целевой яркости 2 степени по L'Esperance, при этом наблюдались отмеченные ранее в практической работе неравномерные эффекты внутри отдельных паттернов ожогов.

При работе через центральную часть фундус-линзы в зоне 1, соответствующей центральным отделам глазного дна с угловыми размерами до 450, формировались достаточно равномерные по интенсивности ожоги как при длительности импульсов в паттерне 20 мс, так и 30 мс, при этом коэффициент вариации интенсивности ожогов не превышал 5% внутри отдельных паттернов. Проведение ПРЛК при тех же параметрах воздействия в зонах 2 и 3, то есть со смещением в область экватора и периферии глазного дна и, соответственно, через более периферические отделы фундус-линзы сопровождалось увеличением интенсивности ожогов с формированием ожогов 3 степени по L'Esperance. При этом частота более интенсивных ожогов внутри паттернов в пределах отдельных зон была сходной как при длительности импульсов 20 мс, так и при длительности 30 мс. Наблюдаемое изменение интенсивности ожогов от центра к периферии в условиях прозрачных сред и одинаковых параметров лазерного воздействия может быть связано как с изменением фокусных вследствие работы через разные по удалению от оптического центра фундус-линзы участки, так и с изменением пигментации в разных участках глазного дна, а также изменением толщины хориоидеи, влияющей на процессы теплоотдачи при нагреве тканей глазного дна [5,8].

Сравнение интенсивности ожогов в паттернах с различной длительностью импульсов выявило, что после более короткоимпульсного воздействия (20 мс) ожоги больше соответствуют по интенсивности ожогам 2 степени по L'Esperance при меньшей вариабельности, что может быть обусловлено меньшим распространением тепла из зоны воздействия лазерного излучения.

Важно, что использованный подход, в основе которого лежит перевод изображения в цветовое пространство Lab, позволил унифицировать анализ яркости в областях глазного дна с различной степенью пигментации и освещенностью и может быть применен для количественной оценки измерения цвета объектов на глазном дне при решении иных задач.

Исследование было выполнено в условиях прозрачных оптических сред, но при наличии помутнений (например, катаракты, кровоизлияний в стекловидном теле) вариабельность ожогов, формируемых при паттерн-лазерной коагуляции, может быть выше полученных в данной работе значений, что обосновывает необходимость разработки способов дозирования лазерных воздействий с учетом всех факторов, оказывающих влияние процесс получения ожога.

## Заключение

Использование фиксированных параметров воздействия при паттерн-лазерной коагуляции может сопровождаться формированием неоднородных по интенсивности ожогов как внутри отдельных паттернов, так и в разных по удаленности от заднего полюса зонах глазного дна. Более выраженное различие ожогов по интенсивности наблюдается при использовании импульсов с длительностью 30 мс в сравнении с импульсами 20 мс.

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов (The authors declare no conflict of interest).**

**ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES**

1. Grzybowski A, Luttrull JK, Kozak I, editors. Retina Lasers in Ophthalmology. Cham: Springer International Publishing; 2023. doi: 10.1007/978-3-031-25779-7.
2. Бойко Э.В. Лазеры в офтальмохирургии: теоретические и практические основы. – СПб: ВМедА им. С.М.Кирова; 2003. [Boiko EV. Lazery v oftal'mohirurgii: teoreticheskie i prakticheskie osnovy. SPb: VMedA im. S.M. Kirova; 2003. (In Russ.)]
3. Измайлов А.С., Балашевич Л.И. Панретинальная лазеркоагуляция при диабетической ретинопатии: показания к дополнительному лечению // Офтальмологические ведомости. – 2009. – №2. – С.44–51. [Izmaylov AS, Balashevich LI. Panretinal photocoagulation in diabetic retinopathy: indications for additional treatment. Ophthalmol Reports. 2009; 2: 44–51. (In Russ.)]
4. Chauhan DS, Downie JA, Eckstein M, Aylward GW. Failure of prophylactic retinopexy in fellow eyes without a posterior vitreous detachment. Arch Ophthalmol. 2006; 124: 968–71. doi: 10.1001/archopht.124.7.968.
5. Muqit MMK, Gray JCB, Marcellino GR, et al. In vivo laser-tissue interactions and healing responses from 20- vs 100-millisecond pulse pascal photocoagulation burns. Arch Ophthalmol. 2010; 128: 448–55. doi: 10.1001/archophthalmol.2010.36.
6. Muqit MMK, Denniss J, Nourrit V, et al. Spatial and spectral imaging of retinal laser photocoagulation burns. Investig Ophthalmol Vis Sci. 2011; 52: 994–1002. doi: 10.1167/iovs.10-6309.
7. L´Esperance FA. Ophthalmic Lasers. Photocoagulation, Photoradiation and Surgery. St. Louis: Mosby; 1989.
8. Lanzetta P, Dorin G, Pirracchio A, Bandello F. Theoretical bases of non-ophthalmoscopically visible endpoint photocoagulation. Semin Ophthalmol. 2001; 16: 8–11. doi: 10.1076/soph.16.1.8.4216.