

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТКАНЕСБЕРЕГАЮЩЕГО ЭФФЕКТА ПАТТЕРНОВОЙ ЛАЗЕРКОАГУЛЯЦИИ СЕТЧАТКИ ПРИ АКТИВНОЙ РЕТИНОПАТИИ НЕДОНОШЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПАТТЕРНОВ ГЕКСАГОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ

<sup>1</sup>Фирсова В. В. ORCID ID 0000-0002-8333-2785,  
<sup>1,2</sup>Трифаненкова И. Г. ORCID ID 0000-0001-9202-5181,  
<sup>1,2</sup>Терещенко А. В. ORCID ID 0000-0002-0840-2675,  
<sup>1</sup>Сидорова Ю. А. ORCID ID 0000-0001-8396-4013,  
<sup>1</sup>Выдрина А. А. ORCID ID 0000-0001-8563-718X,  
<sup>1</sup>Иванов А. М. ORCID ID 0000-0002-2616-8114,  
<sup>1</sup>Рыжова Ю. А. ORCID ID 0009-0006-3729-6628

<sup>1</sup>Калужский филиал Федерального государственного автономного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр «Межотраслевой научно-технический комплекс „Микрохирургия глаза“ имени академика С. Н. Федорова» Минздрава России, Калуга, Российская Федерация, e-mail: ryzhova.ja@kf-mntk.ru;

<sup>2</sup>Медицинский институт Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Калужский государственный университет им К. Э. Циолковского», г. Калуга, Российская Федерация

Ретинопатия недоношенных сохраняет высокую медико-социальную значимость как ведущая причина инвалидизации по зрению у детей, что актуализирует поиск оптимизированных методов лазерного лечения. Цель работы - математическое обоснование тканесберегающего эффекта паттерновой лазеркоагуляции сетчатки при активной ретинопатии недоношенных с применением паттернов гексагональной формы. Проведен ретроспективный анализ изображений глазного дна 118 недоношенных детей (118 глаз) с активной ретинопатией недоношенных для классификации конфигурации границы аваскулярной зоны. Разработана математическая модель площади аваскулярной зоны произвольной формы на основе фрагментарно заданной функции. Выполнен сравнительный анализ плотности покрытия данной площади паттернами квадратной и гексагональной («сота») формы для межспотовых расстояний 0,75 и 0,5 диаметра пятна с использованием непараметрического критерия Манна - Уитни. Установлено преобладание сложной S-образной конфигурации границы (72% случаев), создающей технические трудности для равномерного покрытия квадратными паттернами. Количественный анализ показал, что гексагональное расположение элементов дает прирост эффективной площади покрытия в 1,3 раза относительно квадратной компоновки при одинаковой плотности паттерна ( $p=0,021572$ ). Следствием данного вывода явилась возможность увеличения шага между коагулятами в гексагональной решетке на величину, равную 0,25 их диаметра, без снижения эффективности покрытия аваскулярной зоны по сравнению с более плотно упакованным квадратным паттерном. Данный факт обосновывает принципиальную возможность снижения суммарной энергетической нагрузки на сетчатку. Применение гексагональных паттернов для паттерновой лазеркоагуляции сетчатки при активной РН за счет более эффективной геометрической упаковки позволяет увеличить межспотовое расстояние, снижая общую площадь коагуляции и сохраняя больший объем интактной сетчатки, что составляет математическое обоснование тканесберегающего эффекта методики.

Ключевые слова: ретинопатия недоношенных, паттерновая лазеркоагуляция сетчатки, гексагональный паттерн, математическое моделирование, тканесберегающий эффект, аваскулярная зона сетчатки.

## MATHEMATICAL SUBSTANTIATION OF THE TISSUE-SPARING EFFECT OF PATTERNED RETINAL LASER COAGULATION IN ACTIVE RETINOPATHY OF PREMATURITY USING HEXAGONAL PATTERNS

<sup>1</sup>Firsova V. V. ORCID ID 0000-0002-8333-2785,  
<sup>1,2</sup>Trifanenkova I. G. ORCID ID 0000-0001-9202-5181,  
<sup>1,2</sup>Tereshchenko A. V. ORCID ID 0000-0002-0840-2675,  
<sup>1</sup>Sidorova Y. A. ORCID ID 0000-0001-8396-4013,  
<sup>1</sup>Vydrina A. A. ORCID ID 0000-0001-8563-718X,  
<sup>1</sup>Ivanov A. M. ORCID ID 0000-0002-2616-8114,  
<sup>1</sup>Ryzhova Y. A. ORCID ID 0009-0006-3729-6628

<sup>1</sup>Kaluga branch of the Federal State Autonomous Institution National Medical Research Center "Intersectoral Scientific and Technical Complex 'Microsurgery of the Eye' named after Academician S. N. Fedorov" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kaluga, Russian Federation, e-mail: ryzhova.ja@kf-mntk.ru;

<sup>2</sup>Medical Institute of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kaluga State University named after K.E. Tsiolkovsky", Kaluga, Russian Federation

**Retinopathy of prematurity remains a condition of high medical and social significance as a leading cause of vision disability in children, which actualizes the search for optimized laser treatment methods. Objective: Mathematical substantiation of the tissue-saving effect of patterned retinal laser coagulation in active retinopathy of prematurity using hexagonal patterns. A retrospective analysis of fundus images of 118 premature infants (118 eyes) with active retinopathy of prematurity was conducted to classify the configuration of the avascular zone border. A mathematical model of the area of an arbitrarily shaped avascular zone was developed based on a piecewise-defined function. A comparative analysis of the density of coverage of this area by square and hexagonal («honeycomb») patterns for inter-spot distances of 0.75 and 0.5 spot diameters was performed using the Mann-Whitney U test. The predominance of a complex S-shaped border configuration (72% of cases) was established, creating technical difficulties for uniform coverage with square patterns. Quantitative analysis revealed that a hexagonal arrangement of elements increases the effective coverage area by a factor of 1.3 compared to a square layout, given an identical pattern density ( $p = 0.021572$ ). This finding led to the conclusion that the inter-coagulate spacing in a hexagonal grid can be increased by an amount equal to 0.25 of their diameter without reducing the coverage efficiency of the avascular zone relative to a more tightly packed square pattern. This fact justifies the fundamental possibility of reducing the total energy load on the retina. The use of hexagonal patterns for patterned retinal laser coagulation in active retinopathy of prematurity, due to more efficient geometric packing, allows increasing the inter-spot distance, reducing the total coagulation area and preserving a larger volume of intact retina, which constitutes a mathematical substantiation of the tissue-saving effect of the technique.**

Keywords: retinopathy of prematurity, patterned retinal laser coagulation, hexagonal pattern, mathematical modeling, tissue-saving effect, retinal avascular zone.

## **Введение**

Ретинопатия недоношенных (РН) продолжает оставаться одной из наиболее значимых проблем перинатальной офтальмологии [1]. Данное заболевание отличается высокой медико-социальной значимостью, являясь ведущей причиной слепоты и слабовидения в педиатрической популяции стран мира [2; 3], что определяет необходимость непрерывного совершенствования подходов к его диагностике и лечению [4; 5]. Тяжелые инвалидизирующие исходы при прогрессировании РН формируют долгосрочную нагрузку на систему здравоохранения и требуют поиска высокоэффективных и безопасных лечебных стратегий.

На протяжении нескольких десятилетий стандартом лечения активных стадий РН остается лазерная коагуляция сетчатки (ЛКС) [6; 7]. Данный метод сохраняет свою ведущую позицию как наиболее изученный и прогнозируемый [8]. Фундаментальный механизм ЛКС заключается в селективной деструкции обширных ишемических зон аваскулярной сетчатки, которые служат основным источником патологических вазопролиферативных стимулов, фактора роста эндотелия сосудов (VEGF) и других цитокинов, запускающих неоваскуляризацию.

Проведение сеанса лазерного лечения у недоношенного ребенка имеет ряд особенностей, особое место среди которых занимает работа в области демаркационного вала – зоны границы между васкуляризированной и аваскулярной сетчаткой. Она имеет

индивидуально неповторимую, зачастую сложную геометрию у каждого пациента, что предъявляет повышенные требования к точности и адаптивности лазерной методики.

В клинической практике доказала свою эффективность и безопасность паттерновая ЛКС. Это автоматизированная методика лазерного воздействия, при котором коагуляты наносятся не по одному, а в соответствии с предустановленным геометрическим шаблоном (паттерном) [9]. Паттерн представляет собой упорядоченную матрицу из нескольких лазерных пятен и может иметь различную форму (квадратную, гексагональную, круговую и др.) и размеры, задаваемые хирургом.

Использование паттерновой ЛКС в активном периоде РН [7; 10; 11] является клинически обоснованным подходом для прецизионного воздействия на обширную аваскулярную область сетчатки. Кроме того, использование лазерных паттернов значительно ускоряет время сеанса лазерного лечения [10; 12], что принципиально важно для соматически тяжелых недоношенных младенцев. Однако при попытке равномерно заполнить коагулятами область вблизи границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки использование паттернов квадратной формы (матричной решетки) сопряжено с существенными ограничениями. Несоответствие между строгой геометрией шаблона и неправильной формой обрабатываемой зоны зачастую приводит к образованию некоагулированных участков или, напротив, к чрезмерно плотному наложению аппликатов с эффектом гиперкоагуляции. Для коррекции этих дефектов хирургу приходится прибегать к нанесению дополнительных одиночных коагулятов, что не только увеличивает продолжительность вмешательства, но и повышает вариабельность конечного результата.

В Калужском филиале МНТК «Микрохирургия глаза» накоплен значительный клинический опыт применения паттернов гексагональной формы («сот») для проведения паттерновой ЛКС у недоношенных детей с активной РН [13; 14]. В ходе предыдущих исследований, результаты которых опубликованы в 2020 году, было математически доказано ключевое преимущество гексагонального расположения – его идеальная равномерность и равноправие расстояний между соседними аппликатами по сравнению с квадратной матричной решеткой [15]. Тем не менее для полного обоснования клинического превосходства данной методики требуется углубленное изучение специфических параметров, таких как фактическая плотность покрытия коагулятами аваскулярной зоны произвольной формы, а также обоснованный подбор оптимального межспотового расстояния в гексагональном паттерне.

**Цель работы** – предоставить математическое обоснование тканесберегающего эффекта паттерновой лазеркоагуляции сетчатки при активной ретинопатии недоношенных с применением паттернов гексагональной формы.

## **Материалы и методы исследования**

Исследование проводилось в три последовательных этапа.

Первый этап работы включал ретроспективный анализ данных цифровой регистрации глазного дна, выполненной на широкопольной педиатрической системе RetCam-3 (Massie Research Laboratories Inc., Дублин, Ирландия). В исследование вошли 118 недоношенных детей (118 глаз) с активной ретинопатией недоношенных (РН), у которых патологические изменения локализовались во II и III зонах сетчатки. Распределение по стадиям заболевания было следующим: неблагоприятное течение 2-й стадии диагностировано у 57 пациентов, 3-й стадии – у 61 пациента. На момент осмотра хронологический возраст детей составлял 5-7 недель; постконцептуальный возраст варьировал от 34 до 37 недель при 2-й стадии и от 36 до 38 недель – при 3-й стадии РН. Основным объектом анализа служила конфигурация границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки.

На втором этапе, для формализации задачи поиска оптимальной формы паттерна для проведения паттерновой ЛКС аваскулярной сетчатки, была разработана математическая модель границы аваскулярной зоны. На основе анализа клинических данных первого этапа граница была аппроксимирована фрагментарно заданной суммарной функцией  $y = \sum(x)$ , объединяющей наиболее типичные элементы. Путем попарного приравнивания функций были определены точки их пересечения и область суммарной функции. Вычислялась площадь аваскулярной зоны сетчатки.

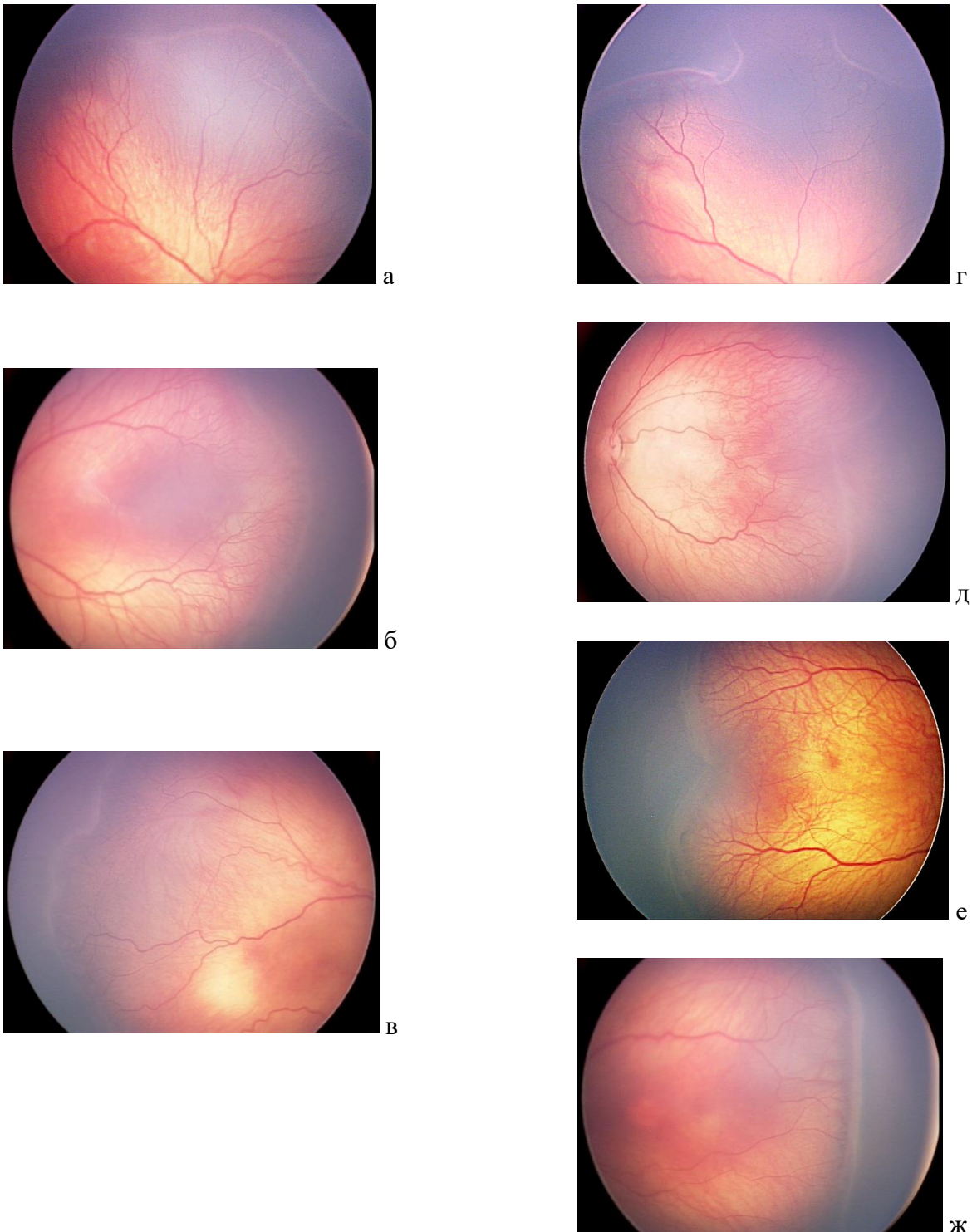
На третьем этапе, для математического обоснования тканесберегающего эффекта паттерновой ЛКС гексагональными паттернами, проведен сравнительный анализ плотности покрытия аваскулярной зоны сетчатки паттерном квадратной формы и паттерном гексагональной формы («сота», Circle-filled), представленным в паттерновой лазерной системе Integre Pro Scan (Ellex, Австралия) [16]. Анализ выполнялся для двух наиболее часто применяемых в клинической практике межспотовых расстояний: 0.75 и 0.5 диаметра лазерного пятна.

Для сравнения показателей плотности покрытия при использовании квадратных и гексагональных паттернов применялся непараметрический критерий Манна - Уитни. Статистически значимыми считались различия при  $p < 0,05$ . Обработка полученных данных проводилась с использованием статистического пакета Statistica (версия 13.3, разработчик Tibco Software Inc., США). Математические вычисления выполнены с использованием стандартных математических инструментов.

## **Результаты исследования и их обсуждение**

Анализ конфигурации демаркационной линии/вала между васкуляризированной и аваскулярной зонами сетчатки, проведенный на первом этапе у 118 недоношенных детей (118

глаз) со 2-й и 3-й стадиями активной РН, продемонстрировал ее значительную вариабельность. С целью упорядочивания полученных данных было выделено два основных вида границы между сосудистой и бессосудистой сетчаткой: S-образный и V-образный. Каждый из них, в свою очередь, подразделялся на несколько подвидов (рис. 1).



*Рис. 1. Цветные фотографии глазного дна пациентов с активной РН с различными видами и подвидами конфигурации границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки: а – S-образный; б – округлый/овальный, в – волнообразный, г – кратерообразный;*

*д – V-образный: е – зигзагообразный, ж – прямолинейный.*

*Составлено авторами по результатам данного исследования*

В рамках S-образного вида выделены округлый, овальный, волнообразный и кратерообразный подвиды. V-образный вид включал зигзагообразный и прямолинейный варианты. Распределение и частота встречаемости описанных конфигураций границы сосудистой и бессосудистой сетчатки при неблагоприятном течении 2–3 стадий активной РН представлены в таблице 1.

Таблица 1

Частота встречаемости различных видов и подвидов конфигурации границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки у пациентов с неблагоприятным типом течения 2-й и 3-й стадии активной РН

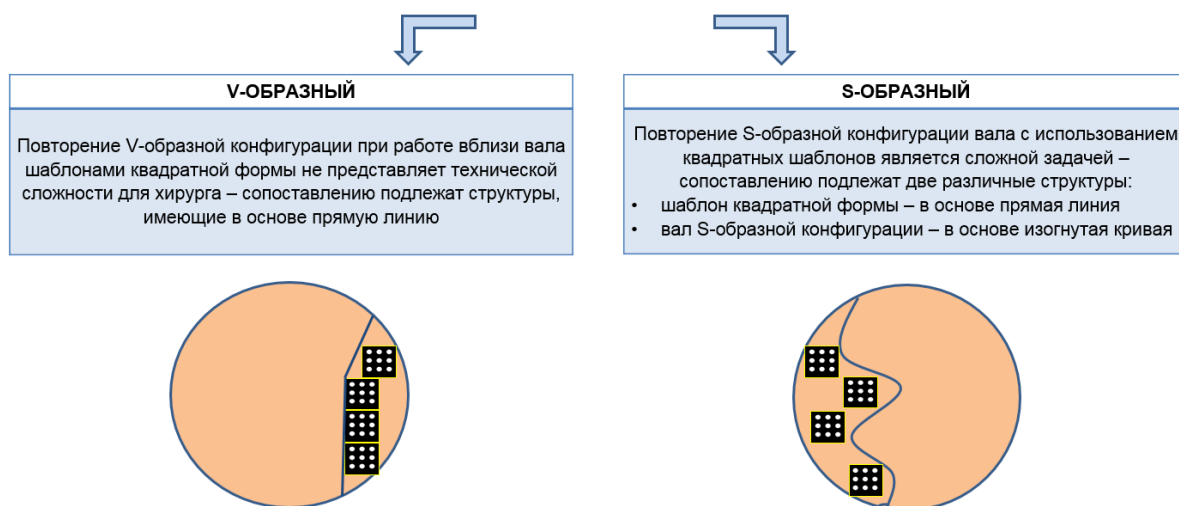
Вид	S-образный			V-образный	
	округлый/ овальный	волно- образный	кратеро- образный	зигзаго- образный	прямо- линейный
Кол-во глаз	53	19	13	21	12
% встречаемости	45	16	11	18	10

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Как видно из таблицы 1, частота встречаемости S-образной конфигурации и ее подвидов составила 72% случаев (85 глаз), что значительно чаще, чем V-образной – 28% (33 глаза).

Клинический опыт проведения паттерновой ЛКС аваскулярной зоны сетчатки у недоношенных с активной РН [11; 16] свидетельствует о неодинаковой технической сложности процедуры в зависимости от вида границы. При V-образной конфигурации работа хирурга облегчается благодаря прямолинейности сопоставляемых структур, однако точное копирование линии границы остается проблематичным. Напротив, при S-образной конфигурации использование квадратных паттернов существенно затруднено из-за несоответствия форм: прямого паттерна и извитой границы (рис. 2).

## ВИДЫ КОНФИГУРАЦИИ ГРАНИЦЫ АВАСКУЛЯРНОЙ И ВАСКУЛЯРИЗИРОВАННОЙ СЕТЧАТКИ ПРИ АКТИВНОЙ РН



*Рис. 2. Схема выполнения паттерновой ЛКС вблизи границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки V-образной и S-образной конфигурации.  
Составлено авторами по результатам данного исследования*

На втором этапе исследования, в рамках поиска геометрической альтернативы квадратным паттернам для ЛКС с учетом индивидуально неповторимой конфигурации границы васкуляризированной и аваскулярной сетчатки, был построен график сложной функции, описывающей произвольную границу сосудистой и бессосудистой сетчатки на основе простых функций отдельных её участков с учетом наиболее часто встречающихся в клинической практике, согласно результатам первого этапа исследования.

В роли аппроксимирующих функций выступали следующие:

– на 1-м участке использовалась параболическая функция, ветви которой ориентированы вниз, соответствующее уравнение записывалось как:

$$y_1 = f_1(x) = -(x - 2.05)^2 + 5 \quad (1);$$

– на 2-м участке – параболическая функция, ветви которой ориентированы вверх:

$$y_2 = f_2(x) = (x - 4.5)^2 + 2 \quad (2);$$

– на 3-м участке – линейная функция:

$$y = kx + b, \text{ при } k > 0, \text{ если } k > -b/x, y_3 = f_3(x) = 1x - 2.75 \quad (3);$$

– на 4-м участке – также линейная функция, но описываемая уравнением (4):

$$y = kx + b, \text{ при } k < 0, \text{ если } k < -b/x, y_4 = f_4(x) = -0.5x + 8 \quad (4).$$

Области значений каждой из перечисленных функций определялись посредством их попарного приравнивания.

В качестве функции, лимитирующей аваскулярную область снизу, выступает дуга

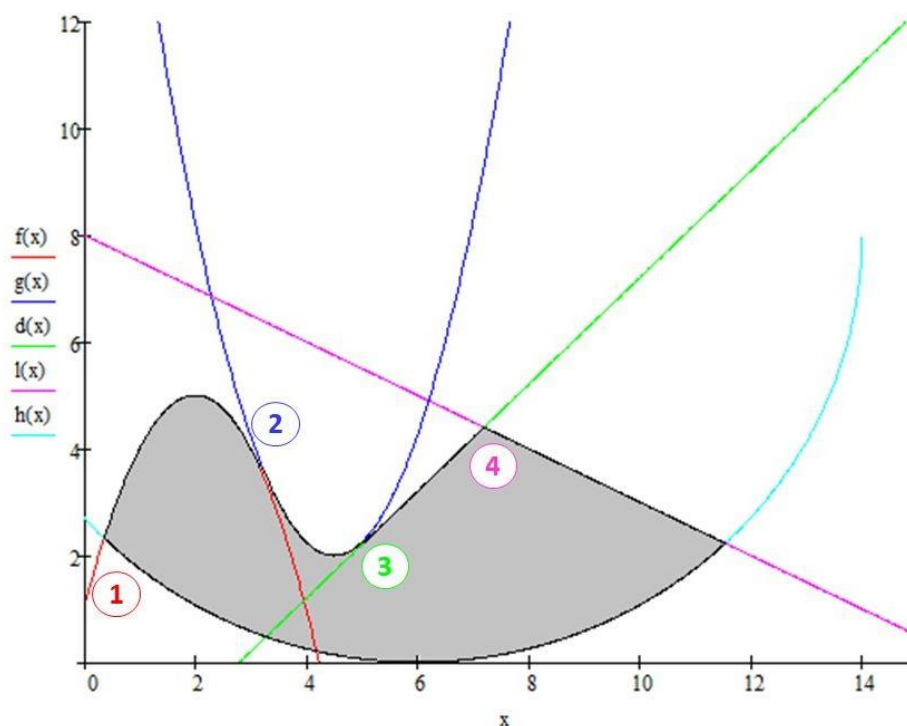
окружности, заданная уравнением:

$$y_{до} = -\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} + y_0 \quad (5)$$

Суммарная функция, аппроксимирующая аваскулярную область сетчатки, была получена после нахождения точек пересечения (по координате  $x$ ) графиков  $y_1$ – $y_4$  с графиком функции Удо:

$$\begin{cases}
 y_1 = f_1(x) = -(x - 2.05)^2 + 5 = -x^2 + 4.1x + 0.7975 & \text{при } 0.40 \leq x < 3.275 \\
 y_2 = f_2(x) = (x - 4.5)^2 + 2 = x^2 - 9x + 22.25 & \text{при } 3.275 \leq x < 5 \\
 y_3 = f_3(x) = 1x - 2.75 & \text{при } 5 \leq x < 7.17 \\
 y_4 = f_4(x) = -0.5x + 8 & \text{при } 7.17 \leq x \leq 11.54
 \end{cases}
 \quad (6)$$

На рисунке 3 представлен график суммарной функции.



*Рис. 3. График суммарной функции, описывающий границу аваскулярной и васкуляризированной зоны сетчатки (площадь аваскулярной сетчатки выделена серым). Составлено авторами по результатам данного исследования*

В качестве новой формы паттерна авторами была выбрана гексагональная структура, а именно шаблон Circle-filled («сота»), предусмотренный в системе Integre Pro Scan (Ellex, Австралия). Данный паттерн включает 7 лазерных аппликатов: шесть из них находятся в вершинах правильного шестиугольника, один - в его геометрическом центре.

Достоверное преимущество гексагонального паттерна перед квадратными матричными решетками, заключающееся в абсолютно равномерном расположении лазерных аппликатов, было обосновано авторами в более ранних работах [15]. Кроме того, ключевое преимущество гексагонального паттерна заключается в возможности равномерной укладки «сот» вблизи границы сетчатки любой формы без необходимости изменения их ориентации.

Третий этап работы заключался в сравнительном математическом анализе плотности коагуляции. Для этого на аваскулярную зону сетчатки (произвольной формы, с границей, заданной суммарной функцией, полученной на втором этапе) осуществляли укладку гексагональных и квадратных паттернов.

Вычисление площади аваскулярной зоны сетчатки производилось на основе суммарной функции, описывающей ее границу:

$$S_{\text{ав зон}} = \int_a^b (y_{\Sigma} - y_{\text{до}}) dx \quad (7)$$

$$S_{\text{ав зон}} = \int_a^b (y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - y_{\text{до}}) dx$$

$$S_{\text{ав зон}} = \int_{x_1}^{x_2} (y_1) dx + \int_{x_2}^{x_3} (y_2) dx + \int_{x_3}^{x_4} (y_3) dx + \int_{x_4}^4 (y_4) dx - \int_{x_1}^{x_4} (y_{\text{до}}) dx =$$

$$= \int_{0.4}^{3.275} (y_1) dx + \int_{3.275}^5 (y_2) dx + \int_5^{7.17} (y_3) dx + \int_{7.17}^{11.54} (y_4) dx - \int_{0.4}^{11.54} (y_{\text{до}}) dx$$

$$\int_{0.4}^{3.275} (y_1) dx = \int_{0.4}^{3.275} (-x^2 + 4.1x + 0.7975) dx = 12.265$$

$$\int_{3.275}^5 (y_2) dx = \int_{3.275}^5 (x^2 - 9x + 22.25) dx = 4.104$$

$$\int_5^{7.17} (y_3) dx = \int_5^{7.17} (1x - 2.75) dx = 7.237$$

$$\int_{7.17}^{11.54} (y_4) dx = \int_{7.17}^{11.54} (-0.5x + 8) dx = 14.519$$

$$\int_{0.4}^{11.54} (y_{\text{до}}) dx = \int_{0.4}^{11.54} (-\sqrt{28 - x^2} + 12x + 8) dx = 7.846$$

$$S_{\text{ав зон}} = 12.265 + 4.104 + 7.237 + 14.519 - 7.846 = 30.279$$

Затем вычисляли отношение площади аваскулярной зоны сетчатки к площади, занимаемой квадратными паттернами (рис. 4, 6), а также к площади, занимаемой паттернами гексагональной формы (рис. 5, 7). Расчеты выполняли для наиболее часто используемых в клинической практике межспотовых расстояний – 0,75 и 0,5 диаметра пятна (спота) в шаблоне.

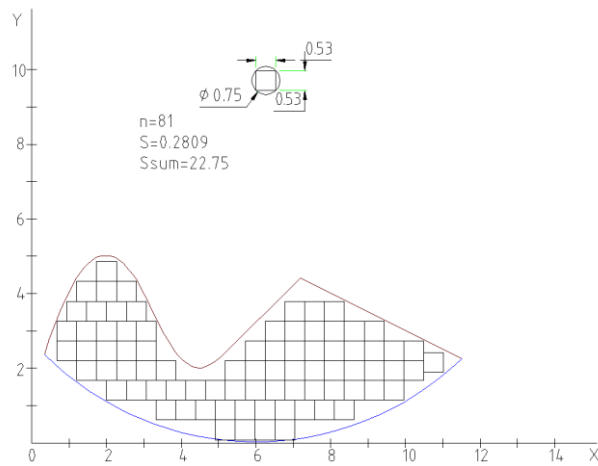


Рис. 4. Аваскулярная зона, заполненная паттернами квадратной формы с межспотовым расстоянием в паттерне 0.75. Составлено авторами по результатам данного исследования

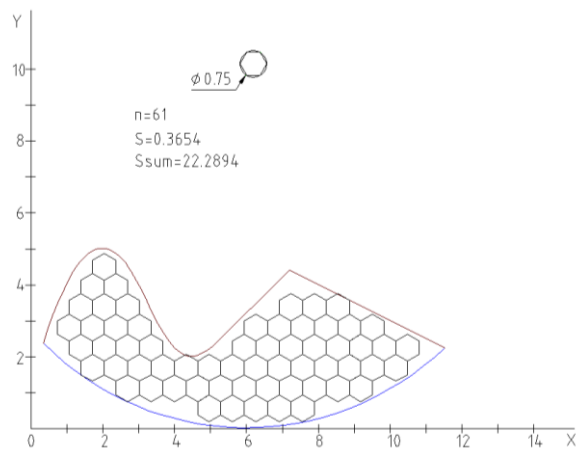


Рис. 5. Аваскулярная зона, заполненная паттернами гексагональной формы с межспотовым расстоянием в паттерне 0.75. Составлено авторами по результатам данного исследования

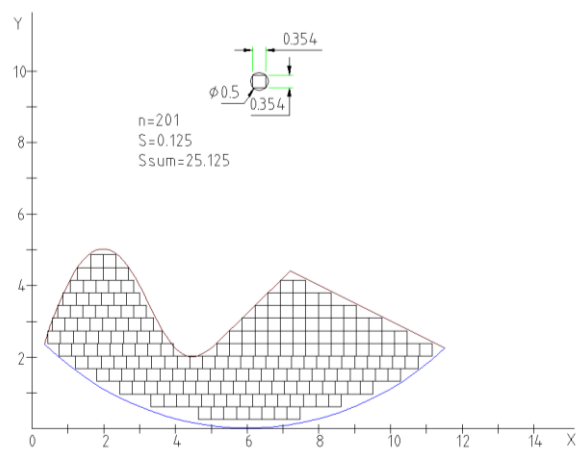


Рис. 6. Аваскулярная зона, заполненная паттернами квадратной формы с межспотовым расстоянием в паттерне 0.5. Составлено авторами по результатам данного исследования

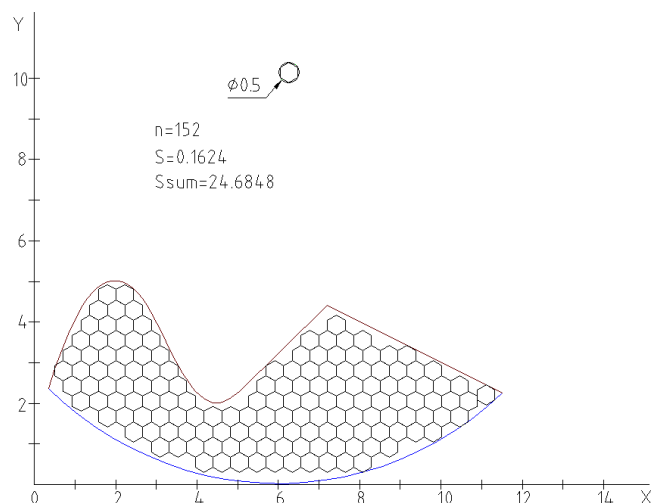


Рис. 7. Аваскулярная зона, заполненная паттернами гексагональной формы с межспотовым расстоянием в паттерне 0.5. Составлено авторами по результатам данного исследования

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчет отношения площади аваскулярной зоны сетчатки к площади, занимаемой паттернами квадратной и гексагональной формы

Показатель	Паттерны, вписанные в окружность 0.75		Паттерны, вписанные в окружность 0.5	
	паттерны квадратной формы	паттерны гексагональной формы	паттерны квадратной формы	паттерны гексагональной формы
Количество паттернов	81	61	201	152
Площадь одного паттерна	0,281	0,365	0,125	0,162
Общая площадь паттернов	22,753	22,29	25,125	24,69
Отношение площади аваскулярной зоны к площади, занимаемой паттернами	1,33	1,36	1,21	1,23

Примечание: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Результаты анализа продемонстрировали, что при одинаковом количестве элементов покрытие площади гексагональными паттернами (правильные шестиугольники, рис. 5, 7) в среднем в 1,3 раза превышает таковое для квадратных паттернов (рис. 4, 6). Различия

статистически значимы ( $p=0,021572$  по критерию Манна - Уитни).

С учетом того, что гексагональные паттерны обеспечивают в 1,3 раза большую плотность коагуляции по сравнению с квадратными, а базовый шаг в системе Integre Pro Scan равен 0,25 диаметра коагулята, представляется возможным увеличить межспотовое расстояние в гексагональном шаблоне на 0,25 диаметра коагулята. При этом, несмотря на менее плотную упаковку (с шагом, увеличенным на 0,25 диаметра коагулята), гексагональные паттерны обеспечивают ту же площадь покрытия аваскулярной зоны сетчатки, что и квадратные.

Таким образом, вышеописанные расчеты подтверждают возможность проведения паттерновой ЛКС аваскулярной зоны сетчатки при активной РН паттернами гексагональной формы с увеличенным на 0,25 межспотовым расстоянием, то есть с сохранением большей площади интактной сетчатки, что является математическим обоснованием тканесберегающего эффекта паттерновой ЛКС за счет использования паттернов гексагональной формы.

#### *Обсуждение*

Паттерновая ЛКС при активной РН представляет собой безопасный и эффективный автоматизированный метод, при котором аппликаты наносятся упорядоченными геометрическими шаблонами, что позволяет сократить время вмешательства и обеспечить дозированное воздействие на аваскулярную зону сетчатки. Однако использование стандартных паттернов квадратной формы сопряжено с техническими сложностями, обусловленными несоответствием их строгой геометрии индивидуальной конфигурации границы между васкуляризированной и аваскулярной сетчаткой. Это делает очевидным необходимость эффективного альтернативного подхода.

Проведенное исследование направлено на оптимизацию методики паттерновой ЛКС при активной РН на основе математического моделирования и сравнительного анализа плотности упаковки паттернов квадратной и гексагональной формы на произвольной площади аваскулярной зоны сетчатки. Исследование включало три последовательных этапа.

Первый этап позволил выявить многообразие конфигурации границы между васкуляризированной и аваскулярной сетчаткой, которое было классифицировано авторами в два основных вида – S-образный и V-образный – с преобладанием сложных S-образных форм (72% случаев). Такое разнообразие создает технические сложности при попытке равномерно и с оптимальной плотностью заполнить приграничную зону стандартными квадратными паттернами, что может приводить либо к участкам без коагуляции, которые необходимо дорабатывать в режиме одиночного импульса, либо к гиперкоагуляции [17]. Важно подчеркнуть, что в некоторых источниках [6] сообщается о необходимости проведения повторных этапов лечения после выполнения ЛКС в режиме одиночного импульса при РН.

Разработанная на втором этапе математическая модель, аппроксимирующая типичную сложную границу аваскулярной зоны фрагментарно заданной функцией, послужила инструментом для объективного сравнения плотности расположения на площади аваскулярной сетчатки рассматриваемых в исследовании паттернов. Вычисленная площадь моделируемой зоны (30,279 усл. ед.) стала площадкой для последующего анализа.

Ключевым результатом третьего этапа настоящего исследования стало доказательство статистически значимого ( $p=0,021572$ ) превосходства гексагональных паттернов в эффективности заполнения площади аваскулярной зоны сетчатки. При равном количестве шаблонов гексагональная упаковка покрывала площадь в среднем в 1.3 раза большую, чем квадратная. Этот феномен имеет геометрическое обоснование: гексагональная решетка (упаковка кругов) является наиболее плотной на плоскости, минимизирующей незанятое пространство между элементами [18]. Полученные данные подтверждают это теоретически обоснованное положение и конкретизируют его для задачи ЛКС сетчатки. Ранее авторами уже было показано преимущество гексагонального расположения паттернов по критерию равномерности распределения аппликатов [15; 19], а настоящее исследование математически доказало его более высокую эффективность по площади покрытия.

Важную практическую направленность имеет расчет, демонстрирующий возможность увеличения межспотового расстояния в гексагональном паттерне на 0,25 диаметра коагулята (с учетом дискретного шага настройки в системе Integre Pro Scan) без потери площади коагулированной аваскулярной зоны по сравнению с более плотно упакованным квадратным паттерном. Этот факт обосновывает тканесберегающий эффект методики ЛКС паттернами гексагональной формы: для достижения того же лечебного результата можно воздействовать на меньшую общую площадь сетчатки, сохраняя больше интактной ткани. Принцип минимизации лазерного воздействия является крайне важным в лечении РН, так как недозированная коагуляция сопряжена с риском развития осложнений в отдаленном периоде [20].

Проведенный сравнительный математический анализ убедительно демонстрирует, что применение гексагональных паттернов для ЛКС аваскулярной сетчатки при активной РН позволяет за счет более эффективной геометрической упаковки увеличить межспотовое расстояние. Это создает полноценные условия для снижения суммарной энергии лазерного воздействия на сетчатку и сохранения большей площади интактной сетчатки в зоне коагуляции. Это служит математическим и теоретическим подтверждением тканесберегающего эффекта паттерновой лазерной коагуляции сетчатки при использовании гексагональных шаблонов.

## **Заключение**

Таким образом, полученные в ходе проведенного исследования данные математически подтверждают, что переход к использованию гексагональных паттернов («сот») при паттерновой ЛКС позволяет создать реальные предпосылки для снижения суммарной энергетической нагрузки на сетчатку и сохранения интактной ткани сетчатки, что составляет суть тканесберегающего эффекта методики лазерного лечения активной РН.

### Список литературы

1. Darlow B. A., Gilbert C. Retinopathy of prematurity – a world update // *Semin. Perinatol.* 2019. Vol. 43. Is. 6. P. 315–316. DOI: 10.1053/j.semperi.2019.05.001.
2. Wong E. S., Choy R. W., Zhang Y., Chan H. Y., Chen L. J., Pang C. P., Tham C. C., Yam J. C. Global and Regional Trends in Retinopathy of Prematurity // *JAMA Ophthalmol.* 2026. Vol. 144. Is. 2. P. 139–147. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2025.5103.
3. Попова Н. В., Гойдин А. П., Фабрикантов О. Л. Ретинопатия недоношенных. Обзор // *Офтальмология.* 2021. Т. 18. № 3. С. 399–407. DOI: 10.18008/1816-5095-2021-3-399-407.
4. Смирнов А. К., Елисеева Е. В., Федяшев Г. А. Ретинопатия недоношенных – современное состояние проблемы, вопросы лечения и периоперационного медикаментозного сопровождения // *Современные проблемы науки и образования.* 2023. № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32978> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.17513/spno.32978.
5. Шарохин М. А., Мамулат Д. Р., Белоусова К. А., Плисов И. Л., Соловьева В. В. Ретинопатия недоношенных: скрининг, наблюдение и лечение // *Современные технологии в офтальмологии.* 2020. № 1 (32). С. 406–409. URL: <https://eyepress.ru/article/retinopatiya-nedonoshennykh-skrining-nablyudenie-i-lechenie> (дата обращения: 02.03.2026). DOI: 10.25276/2312-4911-2020-2-406-409.
6. Emami S., Isaac M., Mireskandari K., Tehrani N. N. Laser Treatment for Retinopathy of Prematurity: A Decade since ETROP // *Ophthalmology.* 2019. Vol. 126. Is. 4. P. 639–641. DOI: 10.1016/j.ophtha.2018.12.012.
7. Володин П. Л., Яблокова И. А., Узунян Д. Г. Лазеркоагуляция сетчатки у детей с тяжелыми стадиями активной ретинопатии недоношенных // *Современные технологии в офтальмологии.* 2016. № 1. С. 57–59. URL: <https://eyepress.ru/article/lazerkoagulyatsiya-setchatki-u-detey-s-tyazhelymi-stadiyami-aktivnoy-retinopatii> (дата обращения: 02.03.2026).
8. Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Сидорова Ю. А., Фирсова В. В., Шаулов В. В. Эволюция транспупиллярной лазерной коагуляции сетчатки в лечении активной ретинопатии

недоношенных: от режима одиночного импульса до навигационного сопровождения // Офтальмохирургия. 2024. № 2. С. 60–67. DOI: 10.25276/0235-4160-2024-2-60-67.

9. Hassanpoor N., Ahoor M., Latifi A., Niyousha M. Conventional and Pattern Scanning Pan-Retinal Photocoagulation Laser in Diabetic Patients' Visual Field // J. Lasers Med Sci. 2022. Vol. 13. P. e40. DOI: 10.34172/jlms.2022.40.

10. Володин П. Л., Яблокова И. А. Результаты лечения III постпороговой активной ретинопатии недоношенных с использованием технологии Паскаль // Практическая медицина. 2018. Т. 114. № 3. С. 43–47. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-lecheniya-iii-postporogovoy-aktivnoy-retinopatii-nedonoshennyh-s-ispolzovaniem-tehnologii-paskal/viewer> (дата обращения: 09.02.2026).

11. Володин П. Л., Семенов А. Д., Яблокова И. А., Узунян Д. Г., Аكوпова Э. Б. Отдаленные клиничко-функциональные результаты лечения III постпороговой стадии активной ретинопатии недоношенных с использованием технологии паттерновой лазерной коагуляции сетчатки // Российская детская офтальмология. 2017. № 3. С. 10–14. URL: <https://eyepress.ru/article/otdalennye-kliniko-funktsional-nye-rezul-taty-lecheniya-iii-postporogovoy-stadii> (дата обращения: 09.02.2026).

12. Nemcansky J., Stepanov A., Nemcanska S., Masek P., Langrova H., Studnicka J. Single session of pattern scanning laser versus multiple sessions of conventional laser for panretinal photocoagulation in diabetic retinopathy: Efficacy, safety and painfulness // PLoS One. 2019. 2019. № 14(7). P. e0219282. DOI: 10.1371/journal.pone.0219282.

13. Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Сидорова Ю. А., Фирсова В. В. Оценка эффективности транспупиллярной гексагональной паттерновой лазеркоагуляции сетчатки в лечении активных стадий ретинопатии недоношенных // Клиническая офтальмология. 2023. Т. 23. № 1. С. 39–46. DOI: 10.32364/2311-7729-2023-23-1-39-46.

14. Фирсова В. В., Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Сидорова Ю. А. Изучение эффективности транспупиллярной гексагональной паттерновой лазеркоагуляции сетчатки в лечении активных стадий РН // Современные технологии в офтальмологии. 2020. Т. 34. № 3. С. 143–144. URL: <https://eyepress.ru/video/izuchenie-effektivnosti-transpupillyarnoy-geksagonal-noy-patternovoy-lazerkoagul> (дата обращения: 02.03.2026).

15. Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Сидорова Ю. А., Фирсова В. В., Кириллов В. Ю. Математическое обоснование паттерновой лазерной коагуляции сетчатки с использованием гексагональной формы паттерна в лечении активных стадий ретинопатии недоношенных // Офтальмохирургия. 2020. № 1. С. 40–46. DOI: 10.25276/0235-4160-2020-1-40-46.

16. Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Сидорова Ю. А., Терещенкова М. С. Инновационная интегрированная паттерновая система «Integre Pro Scan»: первый опыт

- лечения активных стадий ретинопатии недоношенных // Современные технологии в офтальмологии. 2017. № 5 (18). С. 58–60. URL: <https://eyepress.ru/article/innovatsionnaya-integririvannaya-patternovaya-sistema-integre-pro-scan-pervyy-op> (дата обращения: 02.03.2026).
17. Dikci S., Demirel S., Bozgül P., Yılmaz T., Ceylan O. M., Bağ H. G. G. Comparison of Nd:YAG laser (532 nm green) vs diode laser (810 nm) photocoagulation in the treatment of retinopathy of prematurity: an evaluation in terms of complications // *Lasers Med Sci.* 2020. Vol. 35. Is. 6. P. 1323-1328. DOI: 10.1007/s10103-019-02918-x.
18. Андреев Н. Н., Коновалов С. П., Панюнин Н. М. Пчелиные соты // Математическая составляющая. Художник-оформитель Р. А. Кокшаров. 2-е изд., расш. и доп. М.: Фонд «Математические этюды», 2019. 367 с. ISBN: 978-5-906825-02-5. URL: [https://www.mathedu.ru/files/news/books/matematiceskaya\\_sostavlyayushhaya\\_2019.pdf](https://www.mathedu.ru/files/news/books/matematiceskaya_sostavlyayushhaya_2019.pdf) (дата обращения: 03.03.2026).
19. Сидорова Ю. А., Терещенко А. В., Трифаненкова И. Г., Фирсова В. В., Кириллов В. Ю. Математическое обоснование оптимизированного метода паттерновой лазерной коагуляции сетчатки с использованием гексагональной формы паттерна в лечении активных стадий ретинопатии недоношенных // Современные технологии в офтальмологии. 2019. № 1 (26). С. 422–425. URL: <https://eyepress.ru/article/matematiceskoe-obosnovanie-optimizirovannogo-metoda-patternovoy-lazernoy-koagul> (дата обращения: 02.03.2026).
20. Liang J. Systematic review and meta-analysis of the negative outcomes of retinopathy of prematurity treated with laser photocoagulation // *Eur. J. Ophthalmol.* 2019. Vol. 29. Is. 2. P. 223–228. DOI: 10.1177/1120672118770557.

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.