

Бойко Э.В., Суев А.А., Измайлов А.С. и др.
ДИСТАНЦИОННЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КАК СПОСОБ ДОЗИРОВАНИЯ
ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ТРАНССКЛЕРАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ КОАГУЛЯЦИИ СЕТЧАТКИ

ДИСТАНЦИОННЫЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КАК СПОСОБ ДОЗИРОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ТРАНССКЛЕРАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ КОАГУЛЯЦИИ СЕТЧАТКИ

Бойко Э.В.¹⁻³, Суев А.А.*¹, Измайлов А.С.¹, Докторова Т.А.¹,
Иванов А.А.⁴

DOI: 10.25881/20728255_2025_20_4_S1_14

¹ ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза»

им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Санкт-Петербург

² ФГБОУ ВО «Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Минздрава России, Санкт-Петербург

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

⁴ ООО «Алком Медика», Санкт-Петербург

Резюме. Обоснование. Трансклеральные лазерные воздействия при ретиальной патологии имеют важные преимущества в случаях снижения прозрачности оптических сред и необходимости проведения воздействий на периферии глазного дна. Тем не менее, при таких воздействиях затруднена оценка степени формируемых ожогов, поэтому разработка методов дозирования, в том числе автоматизированных, поможет сделать трансклеральную лазерную коагуляцию эффективным и безопасным методом лазерного лечения и использовать ее в рутинной клинической практике.

Цель. Изучить взаимосвязь температуры и ее изменения на поверхности склеры с интенсивностью лазерных ожогов при проведении трансклеральной лазерной коагуляции сетчатки.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование проводилось на 5 кроликах (10 глаз). Трансклеральное лазерное воздействие проводили с помощью диодного лазера (Алод-01, Алком Медика, 810 нм) при мощности 0,2 Вт и диаметре пятна на поверхности склеры 300 мкм. Температуру измеряли дистанционно с помощью тепловизора (Guide MobIR Air, Китай) на поверхности склеры в точке воздействия. Интенсивность коагуляционного повреждения характеризовали как едва видимые, слабые, умеренные и интенсивные ожоги, и для каждой степени учитывали время воздействия, температуру и градиент температуры на поверхности склеры в месте воздействия, при которых формируются ожоги.

Результаты. Формирование едва видимых ожогов происходит при подъеме температуры на поверхности склеры на $2,10 \pm 0,320^\circ\text{C}$, слабых ожогов – на $2,44 \pm 0,270^\circ\text{C}$, умеренных – на $2,87 \pm 0,310^\circ\text{C}$ и интенсивных – на $3,39 \pm 0,240^\circ\text{C}$, при этом между градиентом температуры на поверхности склеры в зоне лазерного воздействия и временем формирования ожогов при всех учитываемых интенсивностях выявлена корреляция ($r > 0,45$; $p < 0,05$).

Заключение. При проведении трансклеральной лазерной коагуляции сетчатки повышение температуры на поверхности склеры в точке воздействия коррелирует с временем воздействия и интенсивностью формируемого ожога на глазном дне.

Ключевые слова: сетчатка, лазерная коагуляция, трансклеральное воздействие, температурный контроль.

REMOTE TEMPERATURE CONTROL AS A METHOD FOR DOSING EFFECTS DURING TRANSSCLERAL LASER COAGULATION OF THE RETINA

Boiko E.V.¹⁻³, Suetov A.A.*^{1,3}, Izmaylov A.S.¹, Doktorova T.A.¹, Ivanov A.A.⁴

¹ St. Petersburg Branch S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution St. Petersburg

² Department of Ophthalmology North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov St. Petersburg

³ Department of Otorhinolaryngology and Ophthalmology, St. Petersburg

⁴ Alkom Medica LLC, St. Petersburg

Abstract. Background. Transscleral laser coagulation in retinal pathology have important advantages in cases of reduced transparency of optical media and the need for treatment on the periphery of the fundus. However, optical media opacities make it challenging to accurately assess the severity of the burns that occur, so the development of more precise dosing methods, including automated ones, could help to make transscleral laser coagulation a more effective and safe treatment option and allow its use in routine clinical practice.

Aim. To investigate the relationship between temperature and its variations on the scleral surface and the intensity of laser burns during transscleral laser coagulation of the retina.

Materials and methods. An experimental study was conducted on five rabbits (10 eyes). Transscleral laser exposure was performed using a diode laser (Alod-01, Alkom Medica, 810 nm) with a power of 0.2 W and a spot diameter of 300 microns on the surface of the sclera. The temperature was measured remotely using a thermal camera (Guide MobIR Air, China) on the surface of the sclera at the point of exposure. The severity of coagulation injury was characterized as barely visible, mild, moderate and intense burns, and for each level, the duration of exposure, temperature, and temperature difference on the surface of the sclera at the point of exposure were taken into consideration.

Results. The formation of barely visible burns occurs when the temperature on the surface of the sclera rises by $2.10 \pm 0.320^\circ\text{C}$, mild burns – by $2.44 \pm 0.270^\circ\text{C}$, moderate burns – by $2.87 \pm 0.310^\circ\text{C}$ and intense burns – by $3.39 \pm 0.240^\circ\text{C}$. A correlation was found between the temperature gradient on the surface of the sclera in the laser exposure zone and the time of burn formation at all intensities considered ($r > 0.45$, $p < 0.05$).

Conclusion. During transscleral laser coagulation of the retina, the temperature on the surface of the sclera at the point of exposure increases and correlates with the time and intensity of burns formed on the fundus.

Keywords: retina, laser photocoagulation, transscleral laser coagulation, temperature control.

Актуальность

Лазерная фотокоагуляция сетчатки продолжает оставаться важным методом в лечении различной ретиальной патологии, при этом процедура проводится, как правило, транспупиллярно с использованием лазерного излучения видимого или ближнего инфракрасного диапазона, а дозирование эффектов осуществляется под

офтальмоскопическом контролем [1]. В ряде клинических ситуаций, при которых вследствие заболевания развивается обширная периферическая неперфузия, например при диабетической ретинопатии или ишемических венозных окклюзиях, или при периферических разрывах сетчатки, требуется проведение лазерного воздействия на периферии глазного дна, но не всегда процедура ле-

* e-mail: ophtalm@mail.ru

чения технически выполнима: сниженная прозрачность оптических сред вследствие, например, катаракты, кровоизлияний в стекловидное тело, не позволяют эффективно воздействовать на периферическую сетчатку.

Трансклеральные воздействия являются альтернативой в таких случаях, при этом в клинической практике при лечении периферических разрывов и локальных отслоек сетчатки уже длительное время используются методы трансклеральной криопексии и диатермокоагуляции [2,3]. Еще одним потенциально более эффективным направлением является трансклеральное воздействие лазерным излучением ближнего ИК-диапазона вследствие его способности проникать через склеру к структурам глазного дна и вызывать фотокоагуляционное повреждение, при этом такой вариант обеспечивает более щадящее воздействие на структуры глазного дна [3–5]. В ряде исследований было показано, что диод-лазерная трансклеральная коагуляция обеспечивает хороший терапевтический эффект при лечении отслоек сетчатки, ретинопатии недоношенных, серповидноклеточной ретинопатии [6–8]. Тем не менее, для повышения эффективности и безопасности любого варианта трансклерального воздействия необходим контроль получаемых коагуляционных повреждений на глазном дне и возможность дозирования процедуры, что при невозможности офтальмоскопического контроля требует разработки новых подходов, не предполагающих прямую визуализацию зоны воздействия на глазном дне.

Цель

Изучить в эксперименте взаимосвязь температуры и ее изменения на поверхности склеры с интенсивностью лазерных ожогов при проведении трансклеральной лазерной коагуляции сетчатки.

Материалы и методы

Экспериментальное исследование проведено на 5 кроликах (20 глаз) породы шиншилла (самцы массой 2,5–3 кг) с умеренной пигментацией глазного дна. Работа была выполнена в соответствии с международными правилами работы с животными (European Communities Council Directive, 86/609/EEC).

Трансклеральное лазерное воздействие проводили в условиях наркоза (ксилазин 5 мг/кг и кетамина гидрохлорид 35 мг/кг внутримышечно за 15 мин. до манипуляций), мидриаза (циклопентолат 1%) и местной анестезии (оксibuпрокаина гидрохлорид 0,4%).

Источником лазерного излучения служил лазерный модуль АЛОД-01 с длиной волны 810 нм (Алком Медика, Россия), при этом для доставки лазерного излучения использовали трансклеральный зонд, наконечник которого располагали на склере на расстоянии 10–20 мм от лимба (экваториальная и постэкваториальная зона) перпендикулярно ее поверхности контактно, но без продавливания оболочек глаза. При проведении воздействия в режиме непрерывной генерации диаметр пятна

пилотного лазера при трансиллюминации на глазном дне составлял 300 мкм, мощность лазерного излучения 0,2 Вт. Во всех глазах наносили по 30 лазерных ожогов различной интенсивности (едва видимые, слабые, умеренные и интенсивные ожоги), ориентируясь на градацию F.A. L'Esperance [9].

При воздействии формирование ожогов на глазном дне отслеживали при биомикроскопии (щелевая лампа SM-2, Takagi Seiko Co LTD, Япония) с панфундус-линзой Volk SuperQuad 160 PRP (Volk Optical, США).

Температуру на поверхности склеры в точке воздействия измеряли с помощью тепловизора Guide MobIR Air (Wuhan Guide Sensmart Tech Co., Ltd., КНР), располагая его на расстоянии 0,3 м, при этом в мобильном приложении применяли опцию температурного анализа в выбранной точке. Учитывали исходную температуру, температуру, при которой формируются ожоги различной интенсивности, а также время формирования ожогов.

Статистический анализ результатов производили в пакете программ Statistica 10.0 Statistica 12.0 (StatSoft Inc., США). Результаты представлены в виде $M \pm m$, коэффициента вариации V (%). Анализ различия значений показателей с помощью t -критерия Стьюдента. Для оценки взаимосвязи показателей использовали корреляционный анализ. Статистически значимыми считали результаты с уровнем значимости $p < 0,05$.

Результаты

При лазерном воздействии во всех случаях на глазном дне наблюдали формирование ожогов различной интенсивности (Рис. 1), при этом ни в одном из случаев не было зафиксировано термического повреждения конъюнктивы и глубже лежащих тканей в зоне контакта трансклерального зонда. Важно, что фиксируемая в момент воздействия интенсивность ожогов в дальнейшем еще менялась из-за «созревания» ожогов вследствие распространения нагрева тканей с вовлечением в повреждение соседних структур.

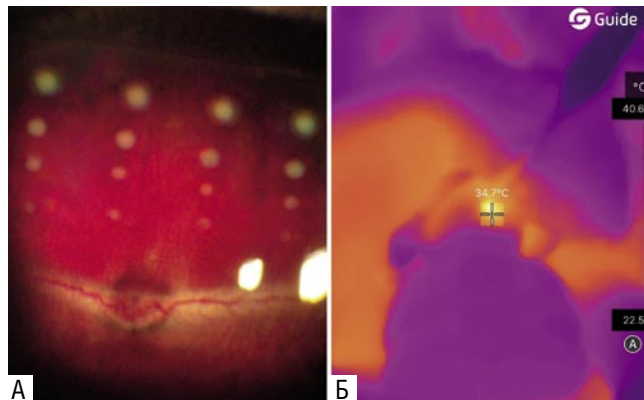


Рис. 1. Фундус-изображение с лазерными ожогами различной интенсивности (а) и пример измерения температуры на склере в зоне лазерного воздействия (б).

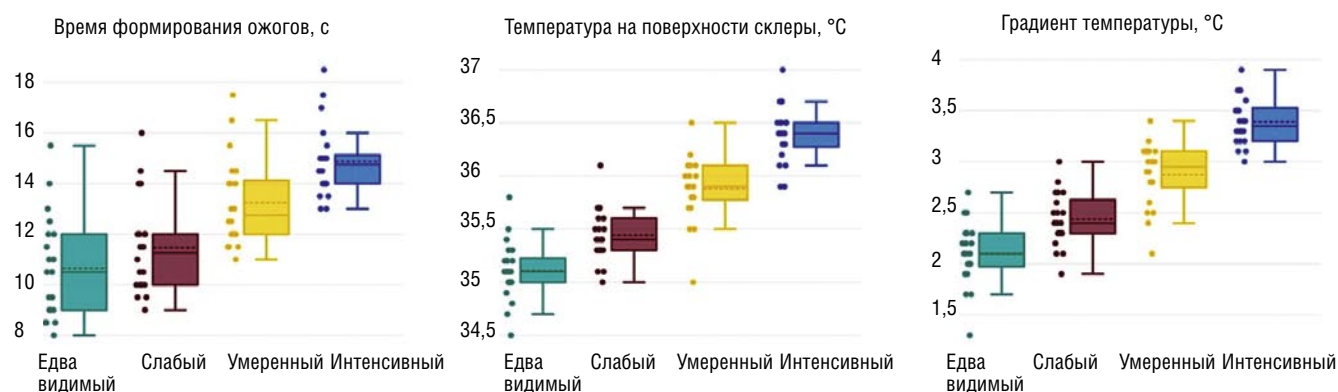


Рис. 2. Время формирования ожогов различной интенсивности и регистрируемые при этом температура и ее градиент на поверхности склеры в зоне воздействия.

При анализе времени формирования ожогов выявлено, что для едва видимых ожогов при используемых параметрах лазерного воздействия необходимая экспозиция составляет $8,88 \pm 0,58$ с, для слабых ожогов $10,15 \pm 0,78$ с, для умеренных $12,05 \pm 0,54$ с, а для интенсивных $14,03 \pm 0,73$ с, при этом значения экспозиции для каждой интенсивности ожога значимо отличаются ($p < 0,001$; Рис. 2), а коэффициент вариации значений экспозиции находится в диапазоне от 4,5 до 7,6%.

Температура тканей на поверхности склеры до воздействия составляла $33,10 \pm 0,15$ °C, при формировании едва видимых ожогов было выявлено значимое увеличение температуры до $35,11 \pm 0,28$ °C, слабовыраженных ожогов до $35,45 \pm 0,25$ °C, умеренных ожогов до $35,88 \pm 0,31$ °C и интенсивных до $36,4 \pm 0,27$ °C ($p < 0,001$; Рис. 2). Динамика температурного градиента при увеличении интенсивности ожогов соответствовала регистрируемой температуре: для получения едва видимых ожогов необходим был подъем температуры на $2,10 \pm 0,320$ C, слабых ожогов – на $2,44 \pm 0,27$ °C, умеренных – на $2,87 \pm 0,31$ °C и интенсивных – на $3,39 \pm 0,24$ °C, при этом значения градиента значимо отличались друг от друга для разных интенсивностей ожогов ($p < 0,001$; Рис. 2), коэффициент вариации находился в диапазоне от 7,1 до 15,3%.

При проведении корреляционного анализа выявлено наличие значимой умеренной прямой связи между градиентом температуры на поверхности склеры в зоне лазерного воздействия и временем формирования ожогов при всех учитываемых интенсивностях ($r > 0,45$ при $p < 0,05$; Рис. 3).

Полученные результаты свидетельствуют о возможности дозирования воздействия при трансклеральной лазерной коагуляции сетчатки: в условиях эксперимента при используемых параметрах лазерного воздействия для получаемых ожогов различной интенсивности были определены диапазоны изменения температуры на поверхности склеры, которые значимо отличались между собой.

Выявленная корреляция между градиентом температуры на поверхности склеры и временем формирования ожогов объясняется процессом распространения тепла

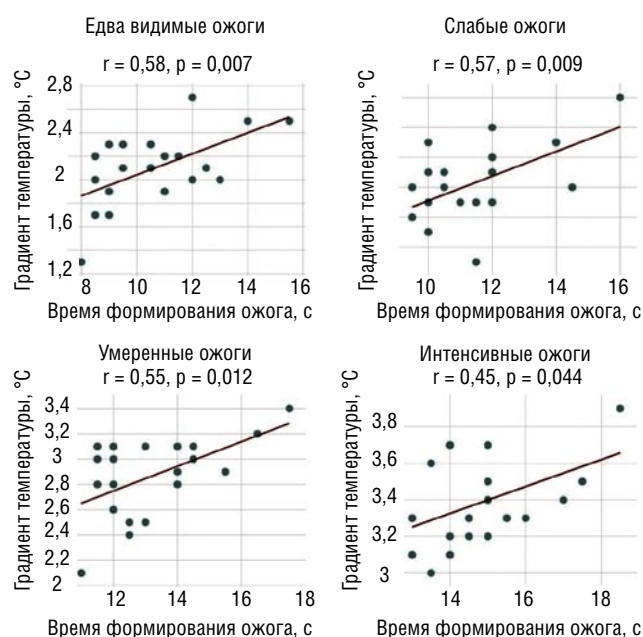


Рис. 3. Зависимость между градиентом температуры на поверхности склеры и временем формирования ожогов различной интенсивности.

из зоны воздействия, но в дальнейших исследованиях необходимо учитывать возможные особенности динамики нагрева тканей при увеличении мощности лазерного излучения с целью сокращения времени проведения процедуры.

Также важным является то, что в проведенном эксперименте длительность воздействия, необходимая для получения фотокоагуляционных эффектов, значительно превышала используемые в клинической практике значения (более 8 с для едва видимых ожогов), поэтому накопление и распространение тепла в тканях способствовало увеличению тяжести ожогового повреждения уже после завершения воздействия, меняя тем самым морфологию ожогов сетчатки. Тем не менее, эта проблема может быть решена в будущем за счет введения соответствующих поправок при расчетах температуры и времени воздействия.

Заключение

При проведении трансклеральной лазерной коагуляции сетчатки повышение температуры на поверхности склеры в точке воздействия коррелирует с временем воздействия и интенсивностью формируемого ожога на глазном дне.

Источник финансирования: исследовательская работа проведена на личные средства авторского коллектива.

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

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Grzybowski A, Luttrull JK, Kozak I. Retina Lasers in Ophthalmology: Clinical Insights and Advancements. *Retin Lasers Ophthalmol Clin Insights Adv* 2023;1–356. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-25779-7/COVER>.
2. Lincoff HA, Mclean JM. Cryosurgery in treating retinal detachment and other eye disorders. *Br J Ophthalmol* 1965;49:337–46. <https://doi.org/10.1136/bjo.49.7.337>.
3. Han DP. Comparison of Scleral Tensile Strength After Transscleral Retinal Cryopexy, Diathermy, and Diode Laser Photocoagulation. *Arch Ophthalmol* 1995;113:1195. <https://doi.org/10.1001/archophth.1995.01100090121033>.
4. Бойко Э.В., Шишкин М.М., Сухотерина Е.Г., Куликов А.Н. Возможности диодлазерной трансклеральной ретинопексии (в сравнении с криопексией) в витреоретинальной хирургии. *Офтальмохирургия и терапия*. 2001; 1(1): 47–52. [Boyko E.V., Shishkin M.M., Sukhoterin E.G., Kulikov A.N. Possibilities of diode laser transscleral retinopexy (in comparison with cryopexy) in vitreoretinal surgery. *Ophthalmosurgery & Therapeutics*. 2001; 1(1): 47–52 (In Rus)].
5. Jennings T, Krol GH, Blair NP. Transscleral contact retinal photocoagulation with argon and 810-nanometer semiconductor diode lasers. *Ophthalmic Surg* 1992;23:639–40.
6. Haller JA, Blair N, de Juan E, de Bustros S, Goldberg MF, Muldoon T, et al. Multicenter trial of transscleral diode laser retinopexy in retinal detachment surgery. *Trans Am Ophthalmol Soc* 1997;95:221–30.
7. Parvaresh MM, Ghasemi Falavarjani K, Modarres M, Nazari H, Saiepour N. Transscleral diode laser photocoagulation for type 1 prethreshold retinopathy of prematurity. *J Ophthalmic Vis Res* 2013;8:298–302.
8. Seiberth V. Trans-scleral diode laser photocoagulation in proliferative sickle cell retinopathy. *Ophthalmology* 1999;106:1828–9. [https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(99\)90367-6](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(99)90367-6).
9. L'Esperance FA. *Ophthalmic Lasers. Photocoagulation, Photoradiation and Surgery*. St. Louis: Mosby; 1989.