

КЛИНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2018

УДК 617

Иомдина Е.Н.¹, Лужнов П.В.², Шамаев Д.М.², Тарутта Е.П.¹, Маркосян Г.А.¹,
Сианосян А.А.¹, Рамазанова К.А.¹

ТРАНСПАЛЬПЕБРАЛЬНАЯ РЕООФТАЛЬМОГРАФИЯ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ У ДЕТЕЙ С МИОПИЕЙ

¹ФГБУ «Московский НИИ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России,
105062, Москва, РФ;

²Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (национальный
исследовательский университет), 105005, Москва, РФ

Цель. Представить фундаментальные основы разработки транспальпекральной реоофтальмографии и клинические результаты ее применения у детей с миопией.

Материал и методы. Для разработки транспальпекральной реоофтальмографии использована электрофизическая многослойная модель глаза, включающая сосудистую оболочку и верхнее веко, биотехническая тетраполярная электродная система и устройство для ее фиксации. Для оценки клинических возможностей транспальпекральной реоофтальмографии обследованы 128 пациентов в возрасте от 5 до 22 лет (в среднем $13 \pm 1,1$ лет) с миопией различной степени, в том числе 35 детей до и после функционального и хирургического лечения миопии, а также 70 детей с миопией средней и высокой степени (средний возраст $13,03 \pm 0,28$ лет) до и после малоинвазивного склероукрепляющего вмешательства с использованием биологически активных трансплантатов. В ходе сравнительных исследований транспальпекральной реоофтальмографии и цветового доплеровского картирования с ультразвуковой доплерографией обследовано 17 детей и подростков (34 глаза) с различной клинической рефракцией (средний возраст $12,5 \pm 1,8$ лет).

Результаты. Моделирование позволило учесть вклад кровоснабжения века в величину реографического индекса (не более 16%), показало необходимость замены биполярной системы электродов, которая использовалась в традиционной реоофтальмографии, на тетраполярную для получения более полной информации о пульсовом наполнении сосудистой оболочки, позволило установить оптимальное позиционирование электродов на веке. Разработан специальный шлем для крепления электродов и регулирования силы их прижатия, а также специальная программа для автоматизированного анализа сигналов транспальпекральной реоофтальмографии. Выявлено достоверное снижение реографического индекса по мере усиления рефракции, его повышение после функционального и хирургического лечения миопии, показана большая информативность транспальпекральной реоофтальмографии, чем ультразвуковой доплерографии при обследовании детей с миопией слабой и средней степени.

Заключение. Использование фундаментального подхода к разработке биотехнической системы транспальпекральной реоофтальмографии позволило получить высокоинформативный и точный метод объективной оценки кровоснабжения сосудистой оболочки глаза. Транспальпекральная реоофтальмография при низкой себестоимости оборудования характеризуется удобством в применении, мобильностью, отсутствием контакта с глазной поверхностью при небольшой продолжительности исследования, что особенно важно в детской практике. Транспальпекральная реоофтальмография может быть использована для получения новых данных о патогенезе заболеваний глаз, их ранней диагностики и мониторинга, а также для оценки эффективности лечения.

Ключевые слова: гемодинамика; миопия; дети; модель глаза; реографический индекс.

Для цитирования: Иомдина Е.Н., Лужнов П.В., Шамаев Д.М., Тарутта Е.П., Маркосян Г.А., Сианосян А.А., Рамазанова К.А. Транспальпекральная реоофтальмография: фундаментальные основы и результаты применения у детей с миопией. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2018; 13(3): 118-124. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/1993-1859-2018-13-3-118-124>

Для корреспонденции: Иомдина Елена Наумовна, главный научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргоники ФГБУ «Московский НИИ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, 105062, Москва. E-mail: iomdina@mail.ru

Iomdina E.N.¹, Luzhnov P.V.², Shamaev D.M.², Tarutta E.P.¹, Markossian G.A.¹,
Sianosyan A.A.¹, Ramazanova K.A.¹

TRANSPALPEBRAL RHEOPHTALMOGRAPHY: FUNDAMENTALS AND RESULTS OF CLINICAL STUDIES OF MYOPIC CHILDREN

¹The Helmholtz Moscow Research Institute of Eye Diseases, Russian Ministry of Health, Moscow, 105062, Russian Federation;

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russian Federation

Purpose. To present the fundamentals of transpalpebral rheoophthalmography development and its clinical testing on myopic children.

Material and Methods. In transpalpebral rheoophthalmography development, we used our own electrophysical multilayer eye model involving the choroid and the upper eyelid, a biotechnical tetrapolar electrode system and a device for its fixation. To assess the clinical potentials of transpalpebral rheoophthalmography, we examined 128 patients aged 5-22 (ave. 13±1.1 years) with myopia of various degrees. Of these, 35 children were examined before and after functional treatment and scleroplasty surgery. Another group consisted of 70 myopic children aged 13.03±0.28 years, who were examined before and after a low-invasive sclera reinforcement procedure in which biologically active grafts were used. A comparative parallel study of transpalpebral rheoophthalmography and color Doppler ultrasonography involved 17 children (34 eyes) aged 12.5±1.8 with various clinical refractions.

Results. The modeling helped assess the contribution of the eyelid blood supply into the rheographic index (which was found not to exceed 16%), demonstrated the need to replace the bipolar electrode system used in traditional rheoophthalmography with a tetrapolar system which provides more complete data on pulse blood filling of the choroid and ensures optimal positioning of the electrodes on the eyelid. A special helmet was designed to fix the electrodes and adjust their pressing force. We also developed a program for an automatic analysis of transpalpebral rheoophthalmography signals. A statistically significant rheographic index drop accompanying refraction increase was revealed. Rheographic index increased after functional and surgical treatment of myopia. Transpalpebral rheoophthalmography was found to be more informative than Doppler ultrasonography when examining children with low and moderate myopia.

Conclusion. The fundamental approach to the development made transpalpebral rheoophthalmography a highly informative and precise method of objective assessment of blood supply to the choroid. Transpalpebral rheoophthalmography uses low-cost equipment, is convenient, mobile, requires no contact with the eye and takes little time to be applied, which is especially important in pediatric practice. Transpalpebral rheoophthalmography may be used to produce new data on the pathogenesis of eye diseases, to ensure their early diagnosis and monitoring, and to assess the effectiveness of treatment.

Keywords: hemodynamics; myopia; children; eye model; rheographic index.

For citation: Iomdina E.N., Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Tarutta E.P., Markossian G.A., Sianosyan A.A., Ramazanova K.A. Transpalpebral rheoophthalmography: fundamentals and results of clinical studies of myopic children. *Rossiyskaya pediatricheskaya oftal'mologiya (Russian pediatric ophthalmology)* 2018; 13(3): 118-124. DOI: <http://dx.doi.org/10.18821/1993-1859-2018-13-3-118-124>

For correspondence: Elena N. Iomdina, Principal researcher of the department of refraction pathology, binocular vision and ophthalmomechanics, The Helmholtz Moscow Research Institute of Eye Diseases, Moscow, 105062, Russian Federation. E-mail: iomdina@mail.ru

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. The study was supported by Grant No 18-08-01192 of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR).

Received 29 October 2018

Accepted 31 October 2018

Как известно, анализ глазного кровотока необходим для формирования эффективных диагностических заключений при различных заболеваниях глаз, в том числе и при миопии, поскольку нарушение гемодинамики миопического глаза связано с ослаблением его аккомодационной способности и с развитием дистрофического процесса во внутренних оболочках глаза и в склере [1].

Существующие методы оценки глазного кровотока можно разделить на контактные и бесконтактные. К контактным методикам относятся офтальмоплетизмография [2] и электроимпедансный метод - реоофтальмография [3, 4]. Эти мето-

ды дают возможность оценить общий пульсовой объем крови преимущественно в переднем отделе сосудистой системы глаза, но требуют установки датчика на перилимбальную область конъюнктивы, что существенно ограничивает их точность и область применения, особенно в детской практике. К бесконтактным методикам относится широко используемый в клинике транспальпебральный ультразвуковой метод – ультразвуковая доплерография с цветовым картированием орбитальных сосудов (УЗДГ) [5–7], а также современные оптические методы – оптическая когерентная томография – ангиография [8–10] и лазерная доплеровская флоуметрия [11, 12].

Перечисленные транспальпебральные и оптические методы дают возможность исследовать кровотоки в отдельных сосудистых системах, но при всех их достоинствах не позволяют дать комплексную оценку состояния кровотока в сосудистой системе глаза.

В связи с этим для комплексной оценки увеального глазного кровотока и получения количественных показателей нами был разработан способ транспальпебральной реоофтальмографии (ТП РОГ) [13–16], который обладает преимуществами офтальмоплетизмографии и реоофтальмографии, но позволяет преодолеть их недостатки, поскольку измерительные электроды размещаются на верхнем веке (на закрытом глазу), что исключает непосредственный контакт с глазной поверхностью.

Цель настоящей работы – представить фундаментальные основы разработки методики ТП РОГ и клинические результаты ее применения у детей с миопией.

Материал и методы. При разработке методики ТП РОГ и устройства для ее осуществления были поставлены следующие задачи: 1) создать многослойную электрофизическую математическую модель глазного яблока, учитывающую сосудистую оболочку и веко, и использовать ее для определения оптимальных параметров биотехнической системы ТП РОГ; 2) повысить информативность методики за счет создания электродной системы, позволяющей оценивать кровоснабжение не только в передней области глаза, но в увеальном тракте в целом; 3) разработать систему фиксации электродной системы, обеспечивающую ее адекватное расположение и усилие прижатия к верхнему веку во время обследования для исключения методических погрешностей измерения гемодинамических параметров.

Для оценки клинических возможностей и информативности ТП РОГ обследованы 128 пациентов в возрасте от 5 до 22 лет ($13 \pm 1,1$ лет), разделенных на группы в зависимости от клинической рефракции: 32 пациента с миопией слабой степени (0,5–3,0 дптр, 124 записи ТП РОГ), 23 пациента с миопией средней степени (3,25–6,0 дптр, 84 записи ТП РОГ) и 5 пациентов с высокой миопией (более 6,0 дптр, 18 записей ТП РОГ). В группу контроля вошли 16 пациентов со слабой гиперметропией (среднее значение сферического эквивалента + 0,75 дптр), у которых была проанализирована 51 запись ТП РОГ. Для оценки эффективности функционального лечения обследованы 10 детей (19 глаз) в возрасте от 9 до 14 лет (средний возраст – $11,5 \pm 1,7$ лет) с миопией слабой и средней степени (среднее значение сферического эквивалента рефракции -2,5 дптр). Для контроля эффективности склеропластики по методике Снайдер-Томпсона до и через 10 дней после операции обследованы 25 детей и подростков с прогрессирующей миопией высокой степени (53 записи ТП РОГ).

В ходе сравнительных параллельных исследований ТП РОГ и ультразвуковой доплерографии (УЗДГ) обследовано 17 детей (34 глаза) в возрасте от 8 до 15 лет (средний возраст $12,5 \pm 1,8$ лет). Из них 10 детей были с миопией средней степени, 5 – с миопией слабой степени и 2 – со слабой гиперметропией. Регистрацию показателей гемодинамики проводили с помощью цветового доплеровского картирования (ЦДК) и импульсной доплерографии на многофункциональном диагностическом приборе Voluson 730 Pro (GE Healthcare) с использованием линейного датчика частотой от 10 до 16 МГц. Определяли среднюю систолическую (V_{syst}), диастолическую (V_{diast}) скорость и индекс резистентности (RI) в глазной артерии (ГА), центральной артерии сетчатки (ЦАС), центральной вене сетчатки, задних коротких цилиарных артериях (ЗКЦА).

Отдельную группу составили 70 детей и подростков в возрасте $13,03 \pm 0,28$ лет, обследованных до и после малоинвазивной склеропластики (МСП), которые были разделены на 2 группы в зависимости от вида использованного биологически активного пластического материала – трансплантата (БАТ), с помощью которого она была проведена. В 1-ю группу вошли 30 детей (средний возраст $13,6 \pm 0,39$ лет) с прогрессирующей миопией средней и высокой степени. При выполнении МСП в этой группе использовался БАТ, в полимерном покрытии которого был депонирован лекарственный препарат панаксел [17]. 2-я группа включала 40 детей (средний возраст $12,6 \pm 0,38$ лет) также с миопией средней и высокой степени. В данной группе использовался новый вид БАТ с покрытием, содержащим хитозан [18]. Годичный градиент прогрессирования (ГГП) до МСП в 1-й группе составил в среднем 0,98 дптр, во 2-й – 1,1 дптр.

Всем пациентам было проведено стандартное офтальмологическое обследование (визометрия, авторефрактометрия до и после циклоплегии, биомикроскопия, офтальмоскопия), а также регистрация с последующим контурным анализом сигналов ТП РОГ. При анализе сигналов ТП РОГ рассчитывалось три основных параметра реоофтальмограммы (по В.И.Лазаренко) [4]:

– реографический индекс (РИ), отображающий величину систолического притока крови и зависящий как от величины ударного выброса, так и от тонуса сосудов (в мОм);

– период максимального наполнения (ПМН), увеличивающийся при повышении тонуса и снижении эластичности сосудов (в секундах);

– показатель модуля упругости (ПМУ), характеризующий структурные свойства сосудистых стенок, их эластичность и тонус (отн. ед.).

Результаты. В соответствии с поставленными задачами на первом этапе данной работы была

Средние значения показателей ТП РОГ ($M \pm \sigma$), полученные у детей с различной клинической рефракцией

Группа	РИ, мОм	ПМН, с	ПМУ, отн. ед.	УОК, мл
Контроль	57,70±15,60	0,18±0,08	0,21±0,07	2,17±0,75
Миопия:				
слабой степени	48,29±23,39*	0,14±0,04	0,17±0,03	1,68±0,75
средней степени	43,31±19,62	0,11±0,03	0,13±0,03	1,61±0,73
высокой степени	37,68±17,13*	0,13±0,04	0,16±0,04	1,47±0,79*

Примечание. * – различие с группой контроля достоверно, $p < 0,05$.

разработана многослойная электрофизическая математическая модель глазного яблока, учитывающая, в том числе, сосудистый слой (хориоидею, сосуды цилиарного тела, радужку) и веко (рис. 1, см. вклейку) [19–21]. Расчеты, проведенные с помощью данной модели, показали, что для получения более полной информации о пульсовом наполнении сосудистой оболочки при установке датчика на верхнем веке необходимо заменить биполярную систему электродов (конструкции Чибириной), которая использовалась в традиционной реоофтальмографии [3, 4], на тетраполярную (рис. 2, а, см. вклейку) [13–15].

Анализ влияния века и его толщины на получаемые показатели кровоснабжения сосудистой оболочки, проведенный с использованием разработанной модели, показал, что суммарно через веко протекает около 35% зондирующего тока, что позволяет количественно оценивать кровоток в сосудистом слое глаза. При этом вклад кровоснабжения века в величину РИ составляет не более 16%. При изменении толщины века на 0,2 мм плотность тока через исследуемые ткани изменяется лишь на 0,8–0,9%. Таким образом, влияние века на результат диагностики нарушений гемодинамики по сигналу ТП РОГ в случае отсутствия его отека можно не учитывать [22].

В результате моделирования было также определено оптимальное расположение электродов в тетраполярной электродной системе для получения максимальной плотности тока в сосудистой оболочке глаза: электроды должны располагаться на верхнем веке вдоль глазной щели над хрящом симметрично по отношению к переднезадней оси глаза с соблюдением расстояния между потенциальными электродами в 13 мм, а между токовыми – 29 мм (рис. 2, см. вклейку). При этом требуемая точность позиционирования электродной системы на верхнем веке составляет 2 мм при погрешности установки электродов, равной $1,5 \pm 0,5$ мм.

При разработке электродной системы отведения сигнала и удобной для пациента и врача системы её фиксации принимались во внимание следующие требования: обеспечение заданного

межэлектродного расстояния, надежная фиксация на голове, учет антропометрических особенностей лица (крепление на голове любого обхвата), обеспечение равномерного и адекватного прижатия всех электродов (регулирование степени прижатия), возможность установки на правом/левом глазу, возможность проведения дезинфекции, малый вес конструкции; возможность использования электродного геля. Всем этим требованиям удовлетворяет разработанный нами специальный шлем для крепления электродов [23].

Еще одним этапом разработки методики ТП РОГ стало создание специального программного обеспечения для обработки зарегистрированных сигналов, позволяющего проводить их анализ в автоматизированном режиме с расчетом реографического индекса (РИ, мОм), показателя модуля упругости (ПМУ, отн. ед.), периода максимального наполнения (ПМУ, с), ударного объема крови (УОК, мм³) (рис. 3, см. вклейку).

В результате проведенной работы была предложена эффективная методика проведения ТП РОГ у детей и взрослых [16]. Для получения корректных данных перед началом обследования пациент должен находиться в горизонтальном положении не менее 2 мин. После закрепления на голове пациента шлема с электродной системой, размещенной на закрытом веке, начинается запись реографического сигнала, которая продолжается не более 2 мин. Во время записи второй глаз должен быть открытым с направлением взгляда под углом 40–50°.

Клинические исследования ТП РОГ проводились нами по разрешению локального Этического комитета ФГБУ «Московский НИИ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России и состояли из нескольких этапов.

На первом этапе были определены реографические показатели глаз детей с различной клинической рефракцией (табл. 1).

Полученные нами данные показывают, что основные отличия показателей ТП РОГ у пациентов в исследуемых группах касаются РИ, который закономерно и достоверно снижается по мере усиления рефракции, что свидетельствует о дефиците кровоснабжения миопических глаз, который ус-

Динамика реографического индекса ($M \pm m$) после МСП с использованием БАТ, содержащего панаксел, и БАТ, содержащего хитозан

Срок наблюдения	Реографический индекс (мОм)			
	1-я группа (панаксел)		2-я группа (хитозан)	
	Оперированный глаз	Парный глаз	Оперированный глаз	Парный глаз
До операции	17,94±1,59	24,75±1,64	26,50±2,17	26,19±2,53
После операции через:				
1 мес	46,14±4,04*	50,99±3,18*	63,24±5,93*	58,50±3,70*
6 мес	34,78±3,27*	37,81±2,41*	45,0±2,88*	43,27±2,36*
1 год	26,70±2,15*	28,61±1,68	35,67±2,18*	33,71±2,14*

Примечание. * – различие с исходным уровнем (до операции) достоверно, $p < 0,01$.

губляется с увеличением степени миопии. Аналогичные данные были получены ранее при использовании традиционного метода реографии для обследования детей с миопией [1, 24]. Качественное совпадение результатов ТП РОГ с результатами ранее применявшейся традиционной РОГ подтвердили ее информативность и возможность использования в клинической практике.

Анализ динамики показателей РОГ после функционального лечения показал, что РИ, исходно составлявший $43,2 \pm 24,8$ мОм, увеличился в среднем до $65,2 \pm 25,0$, то есть на 70% (от 23 до 202%). Данные, свидетельствующие об улучшении кровоснабжения (в первую очередь, повышение РИ) по сравнению с исходным уровнем (до лечения) качественно совпадают с результатами, полученными при использовании традиционной методики, применявшейся ранее для оценки эффективности медикаментозного лечения миопии [24], что говорит об адекватности методики ТП РОГ.

Об этом же свидетельствуют результаты, полученные нами при обследовании пациентов с быстро прогрессирующей миопией высокой степени, направленных на склеропластическую хирургию. Показатель РИ у этих пациентов до операции был существенно ниже нормы и колебался от 14,0 мОм до 24,2 мОм, в среднем составляя $19,7 \pm 5,7$ мОм. После оперативного лечения увеличение этого показателя в среднем по группе составило 224%. В ходе исследований было отмечено, что повышение остроты зрения в среднем на 0,25 сопровождалось усилением кровоснабжения в диапазоне от 57 до 421%.

На втором этапе клинического исследования было проведено сравнительное изучение возможностей ТП РОГ и ЦДК с импульсной доплерографией [16]. Для корректности сравнительного исследования обе методики проводились в одном и том же помещении. Во время обследования пациент располагался на кушетке в положении лежа и

для исключения влияния ортостатических эффектов в интервале между двумя исследованиями он не менял своего положения. Для минимизации эффекта стимуляции переднего отдела глаза ультразвуковым потоком и эффекта приложения усилия к глазу УЗ датчика, ТП РОГ проводилась первой.

По данным доплеровских методов у всех обследованных детей с миопией слабой степени, а также больше, чем у половины обследованных детей с миопией средней степени средние показатели V_{syst} и RI находились в диапазоне нормальных значений. Лишь у 3 (27%) из 11 пациентов с миопией средней степени отмечалось статистически недостоверное снижение V_{diast} и повышение RI в ЦАС и ЗКЦА ($p > 0,5$).

В то же время показатели ТП РОГ, которые находились в пределах диапазона, установленного в наших исследованиях для групп с аналогичной рефракцией и возрастными характеристиками (см. табл. 1), различались в группах детей с миопией слабой и средней степени. Так, значения РИ в этих группах составили, соответственно, $47,80 \pm 21,26$ 0,5 мОм и $43,31 \pm 19,62$ мОм, и были достоверно ниже ($p < 0,05$) значения РИ в группе контроля ($57,70 \pm 15,60$ мОм). Таким образом, методика ТП РОГ показала большую информативность при обследовании детей и подростков с миопией слабой и средней степени, чем ЦДК, поскольку при данной патологии, прежде всего, нарушается кровоснабжение переднего отдела глаза (цилиарной мышцы), а не орбитальных сосудов.

На третьем этапе клинического исследования мы оценивали возможность использования показателей ТП РОГ качестве объективного критерия, характеризующего метаболическое (антидистрофическое) действие малоинвазивных склероукрепляющих вмешательств (МСП) с применением БАТ, содержащих лекарственные препараты – панаксел (1-я группа) и хитозан (2-я группа).

Выявлено, что на 3-4-е сутки после проведения МСП с использованием хитозана у детей наблю-

дался более значительный отек века и конъюнктивы глазного яблока, чем у детей 1-й группы. Этот факт расценивался нами как реакция тканей глаза на активное действие хитозана. При этом отмечалась несколько более высокая эффективность БАТ на основе хитозана: темпы прогрессирования миопии после МСП с использованием этого материала снизились в 4,4 раза, а в группе, где использовали материал с панаксолом – в 3,9 раза. Очевидно, стабилизация рефракции была связана не только с повышением биомеханической устойчивости склеры, но и с улучшением кровоснабжения оболочек глаза. Об этом свидетельствуют данные ТП РОГ, полученные в различные сроки после МСП с использованием БАТ с панаксолом и с хитозаном (табл. 2).

Как видно из табл. 2, после МСП у пациентов 1-й и 2-й группы на оперированных глазах отмечается достоверное повышение РИ относительно исходных показателей во все сроки наблюдения. Так, в 1-й группе РИ через месяц после МСП увеличился на 28,2 мОм, во 2-й группе – на 36,74 мОм ($p < 0,05$). Через 6 месяцев повышенные значения РИ в обеих группах сохранялись. К концу срока наблюдения (1 год) отмечается некоторое снижение (по сравнению с первым сроком наблюдения) значений РИ: в 1-й группе в среднем на 19,44 мОм и во 2-й группе – на 27,57 мОм, однако эти значения превышают дооперационные показатели. Значение РИ на парных глазах также имело тенденцию к повышению.

Улучшение гемодинамики и склероукрепляющий эффект обусловили, очевидно, отсутствие отрицательной динамики в состоянии глазного дна после МСП: отмечено торможение развития новых дистрофических процессов и стабилизация имеющихся. При этом лишь у одного пациента 1-й группы на парном глазу через 1 год после МСП обнаружена новая зона ПВХРД, потребовавшая лазерной коагуляции сетчатки.

Более существенное снижение ГПП (в 4,4 раза в сравнении с 3,9 раза) и более высокие значения РИ при использовании БАТ с полимерным покрытием, депонирующим хитозан, позволяют рекомендовать его для широкого использования в склероукрепляющем лечении прогрессирующей миопии.

Заключение

Таким образом, использование фундаментального подхода к разработке биотехнической системы ТП РОГ позволило получить высоко информативный и достаточно точный метод объективной оценки кровоснабжения сосудистой оболочки глаза. ТП РОГ при низкой себестоимости оборудования характеризуется удобством в применении, мобильностью, отсутствием контакта с глазной поверхностью при небольшой продолжительности исследования (2–5 мин), что особенно важно

в детской практике. Этот метод может быть использован не только для получения новых данных о патогенезе заболеваний глаз, но и для ранней диагностики и мониторинга патологического процесса, а также для оценки эффективности проводимого лечения.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №18-08-01192.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисов Э. С. *Близорукость*. Москва: Медицина, 1999.
2. Бунин А. Я. *Гемодинамика глаза и методы ее исследования*. Москва: Медицина, 1971.
3. Кацнельсон Л. А. *Реография глаза*. Москва: Медицина; 1977.
4. Лазаренко В. И. *Функциональная реография глаз*. Красноярск: «Растр», 2000.
5. Мачехин В. А., Влазнева И. Н. Исследование кровоснабжения глаза с помощью цветной ультразвуковой доплерографии. *Сибирский национальный медицинский журнал*. 2009. 4:100-3.
6. Киселева Т. Н. Ультразвуковые методы исследования кровотока в диагностике ишемических поражений глаза. *Вестн. офтальмол.* 2004; 4: 3-5.
7. Киселева Т. Н., Зайцев М. С., Рамазанова К. А., Луговкина К. В. Возможности цветового дуплексного сканирования в диагностике сосудистой патологии глаза. *Рос. офтальмол. журнал*. 2018; 11(3):84-94. doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-84-94
8. Spaide R. F., Klancnik J. M. Jr., Cooney M. J. Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol.* 2015; 133(1): 45-50. doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2014.3616.
9. Курьшева Н. И. ОКТ-ангиография и ее роль в исследовании ретинальной микроциркуляции при глаукоме (часть первая). *Рос. офтальмол. журнал*. 2018; 11(2): 82-6. doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-2-82-86.
10. Курьшева Н. И. ОКТ-ангиография и ее роль в исследовании ретинальной микроциркуляции при глаукоме (часть вторая). *Рос. офтальмол. журнал*. 2018; 11(3):95-100. doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-95-100.
11. Gugleta K., Orgül S., Flammer J., Gherghel D., Flammer J. Reliability of Confocal Choroidal Laser Doppler Flowmetry. *Invest. Ophthalmol. Vis Sci* March 2002; 43: 723-8.
12. Киселева Т. Н., Аджемян Н. А. Методы оценки глазного кровотока при сосудистой патологии глаза. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция*. 2015; 14(4): 4-10.
13. Лужнов П. В., Парашин В. Б., Шамаев Д. М. Анализ особенностей применения методов реоофтальмографии. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2011; 10: 39-41.
14. Лужнов П. В., Шамаев Д. М., Иомдина Е. Н., Тарутта Е. П., Маркосян Г. А., Шамкина Л. А., Сианосян А. А. Транспальпебральная тетраполярная реоофтальмография в задачах оценки параметров системы кровообращения глаза. *Вестн. Рос. акад. мед. наук*. 2015; 70(3):372-7. <https://doi.org/10.15690/vgramn.v70i3.1336>.
15. Лужнов П. В., Парашин В. Б., Шамаев Д. М., Иомдина Е. Н., Маркосян Г. А., Напылова О. А. Использование тетраполярной методики при реоофтальмографии для оценки кровоснабжения глаза. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2012; 10: 18-21.
16. Иомдина Е. Н., Лужнов П. В., Шамаев Д. М., Тарутта Е. П., Киселева Т. Н., Маркосян Г. А. и др. Оценка транспальпебральной реоофтальмографии как нового метода исследования кровоснабжения глаза при миопии. *Рос. офтальмол. журнал*. 2014; 4(4): 20-4.
17. Тарутта Е. П., Иомдина Е. Н., Киселева О. А., Филатова И. А., Маркосян Г. А., Иващенко Ж. Н. и др. Универсальный синтетический материал для офтальмохирургии. *Рос. офтальмол. журнал*. 2010; 3(4): 71-5.

18. Иомдина Е.Н., Тарутта Е.П., Маркосян Г.А., Сианосян А.А., Лужнов П.В., Шамаев Д.М., Рамазанова К.А. Транспальпебральная реоофтальмография как метод оценки эффективности склероукрепляющего и трофического лечения прогрессирующей миопии. *Офтальмология*. 2018; 15(4):439-46.
19. Лужнов П.В., Шамаев Д.М., Бочарова Д.А., Волков А.К., Иомдина Е.Н. Моделирование системы кровообращения века и глаза при транспальпебральной реоофтальмографии. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2017; 8: 26-30.
20. Shamaev D. M., Luzhnov P. V., Iomdina E.N. *Modeling of ocular and eyelid pulse blood filling in diagnosing using transpalpebral rheoophthalmography*. H. Eskola et al. (eds.), *EMBEC & NBC* 2017; 65: 1000-3. DOI: 10.1007/978-981-10-5122-7_250
21. Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Iomdina E.N. Mathematical modeling of ocular pulse blood filling in rheoophthalmography. In: Lhotska L., Sukupova L., Lacković I., Ibbott G. (eds). *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018*. IFMBE Proceedings. 2018; 68(1): 495-8. DOI: 10.1007/978-981-10-9035-6_91
22. Лужнов П.В., Шамаев Д.М., Иомдина Е.Н., Маркосян Г.А., Сианосян А.А., Тарутта Е.П. Влияние отека века на результаты транспальпебральной реоофтальмографии. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2016; 7:90-3.
23. Иомдина Е.Н., Лужнов П.В., Шамаев Д.М. и др. *Устройство крепления электродов для проведения транспальпебральной реоофтальмографии*: Патент РФ № 153338 от 10. 07. 2015, Бюл. № 19.
24. Аветисов Э.С., Стишковская Н.Н. Комбинированный метод улучшения гемодинамики глаза. Метод. рекомендации. Москва; 1980.
25. J. 2018; 11(3):95-100. (in Russian) doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-95-100.
11. Gugleta K., Orgül S., Flammer I., Gherghel D., Flammer J. Reliability of Confocal Choroidal Laser Doppler Flowmetry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* March 2002; 43: 723-8.
12. Kiseleva T. N., Adzhemian N. A. Ocular blood flow assessment in vascular pathology of the eye. *Regional hemodynamics and microcirculation*. 2015; 14(4): 4-10. (in Russian)
13. Luzhnov P.V., Parashin V.B., Shamaev D.M. Analysis of Using Features of Rheoophthalmographic Method. *J. Biomedical Radioelectronics*. 2011; 10: 39-41. (in Russian)
14. Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Iomdina E.N., Tarutta E.P., Markosyan G.A., Shamkina L.A., Sianosyan A.A. Transpalpebral tetrapolar reoophthalmography in the assessment of parameters of the eye blood circulatory system. *Annals of the Russian academy of medical sciences*. 2015; 70(3): 372-7. (in Russian). <https://doi.org/10.15690/vramn.v70i3.1336>
15. Luzhnov P.V., Parashin V.B., Shamaev D.M., Iomdina E.N., Markosyan G.A., Napylova O.A. Use of tetrapolar methods during rheoophthalmography for an estimation of blood supply inside an eye. *J. Biomedical Radioelectronics*. 2012; 10: 18-21. (in Russian)
16. Iomdina E.N., Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Tarutta E.P., Kiseleva T.N., Markossian G.A., et al. An evaluation of transpalpebral rheoophthalmography as a new method of studying the blood supply to the eye in myopia. *Rus. Ophthalmol. J.* 2014; 4(4): 20-4. (in Russian)
17. Tarutta E.P., Iomdina E.N., Kiseleva O.A., Filatova I.A., Markossian G.A., Ivashchenko Zh.N., et al. A Universal Synthetic Material for Ocular Surgery. *Rus. Ophthalmol. J.* 2010; 3(4): 71-5. (in Russian)
18. Iomdina E.N., Tarutta E.P., Markosyan G.A., Sianosyan A.A., Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Ramazanova K.A. Transpalpebral rheoophthalmography as a method for evaluating the effectiveness of sclera-strengthening and trophic treatment of progressive myopia. *Oftal'mologia*. 2018; 15(4):439-46. (in Russian.)
19. Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Bocharova D.A., Volkov A.K., Iomdina E.N. Modelling of blood circulation system in eyelid and eye at transpalpebral rheoophthalmography. *Journal Biomedical Radioelectronics*. 2017; 8:26-30. (in Russian)
20. Shamaev D. M., Luzhnov P. V., Iomdina E.N. Modeling of ocular and eyelid pulse blood filling in diagnosing using transpalpebral rheoophthalmograph. H. Eskola et al. (eds.), *EMBEC & NBC* 2017; 65: 1000-3. DOI: 10.1007/978-981-10-5122-7_250
21. Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Iomdina E.N. Mathematical modeling of ocular pulse blood filling in rheoophthalmography. In: Lhotska L., Sukupova L., Lacković I., Ibbott G. (eds). *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018*. IFMBE Proceedings. 2018; 68(1): 495-8. DOI: 10.1007/978-981-10-9035-6_91
22. Luzhnov P.V., Shamaev D.M., Iomdina E.N., Markosyan G.A., Sianosyan A.A., Tarutta E.P. The impact of eyelid edema on the results of transpalpebral reoophthalmography. *J. Biomedical Radioelectronics*. 2016; 7: 90-3. (in Russian)
23. Iomdina E.N., Luzhnov P.V., Shamaev D.M., et al. *The system for electrodes fixation in transpalpebral rheoophthalmology*. RF Patent № 153338, 10. 07. 2015. Bull. 19. (in Russian.)
24. Avetisov E.S., Stishkovskaya N.N. Combined method for eye hemodynamic improvement. Guidelines. Moscow; 1980. (in Russian)

REFERENCES

1. Avetisov E.S. *Myopia*. Moscow: Meditsina; 1999. (In Russian)
2. Bunin A.Ya. *Ocular hemodynamics and methods of its assessment*. Moscow: Meditsina; 1971. (in Russian)
3. Katsnelson L.A. *Rheography of the Eye*. Moscow: Meditsina; 1977. (in Russian)
4. Lazarenko V.I. *Functional Rheography of the Eye*. Krasnoyarsk: Rastr, 2000. (in Russian)
5. Machekhin V.A., Vlazneva I.N. Analysis of ocular blood supply with color ultrasound dopplerography. *Sibirskij natsionalny meditsinskij zhurnal*. 2009. 4:100-3. (in Russian)
6. Kiseleva T.N. Ultrasound examination methods in diagnostics of ischemic lesions of the eye. *Vest. oftal'mol.* 2004; 4: 3-5. (in Russian)
7. Kiseleva T.N., Zaitsev M.S., Ramazanova K.A., Lugovkina K.V. Possibilities of color Duplex Imaging in the diagnosis of ocular vascular pathology. *Rus. ophthalmol. J.* 2018; 11(3):84-94. (In Russian) doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-3-84-94.
8. Spaide R.F., Klancnik J.M. Jr., Cooney M.J. Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. *JAMA Ophthalmol.* 2015; 133(1): 45-50. doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2014.3616.
9. Kuryшева N.I. OCT Angiography and its role in the study of retinal microcirculation in glaucoma (part one). *Rus. Ophthalmol. J.* 2018; 11(2): 82-6. (in Russian) doi: 10.21516/2072-0076-2018-11-2-82-86.
10. Kuryшева N.I. OCT Angiography and its role in the study of retinal microcirculation in glaucoma (part two). *Rus. ophthalmol.*

Поступила 29.10.2018
Принята в печать 31.10.2018

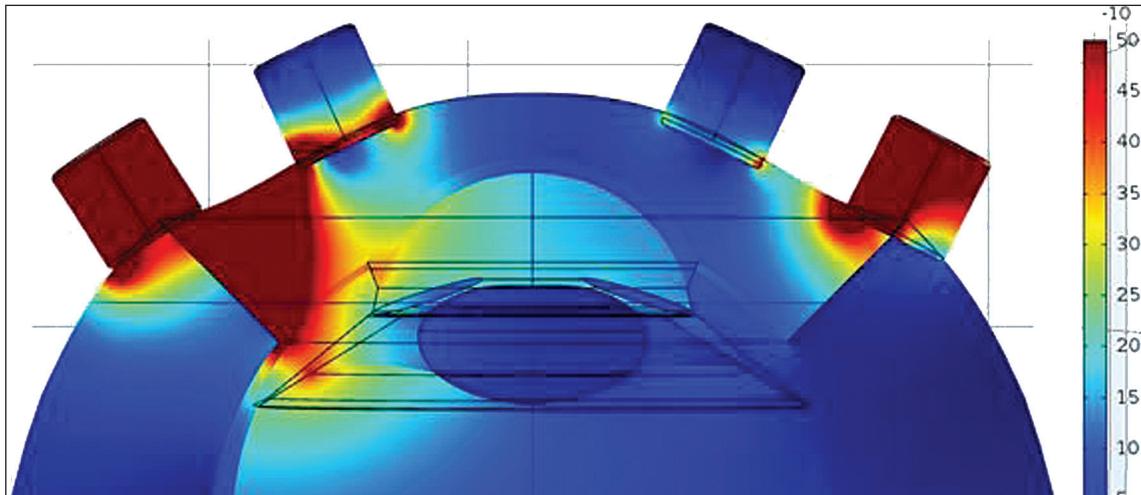


Рис. 1. Результаты моделирования: распределение плотности тока в электрофизической модели глаза, учитывающей сосудистый слой (хориоидею, сосуды цилиарного тела, радужку) и верхнее веко с размещенной тетраполярной электродной системой для ТП РОГ.



Рис. 2. Результаты моделирования эффективной электродной системы для ТП РОГ. а – вид тетраполярной электродной системы; б – расположение электродов на верхнем веке.

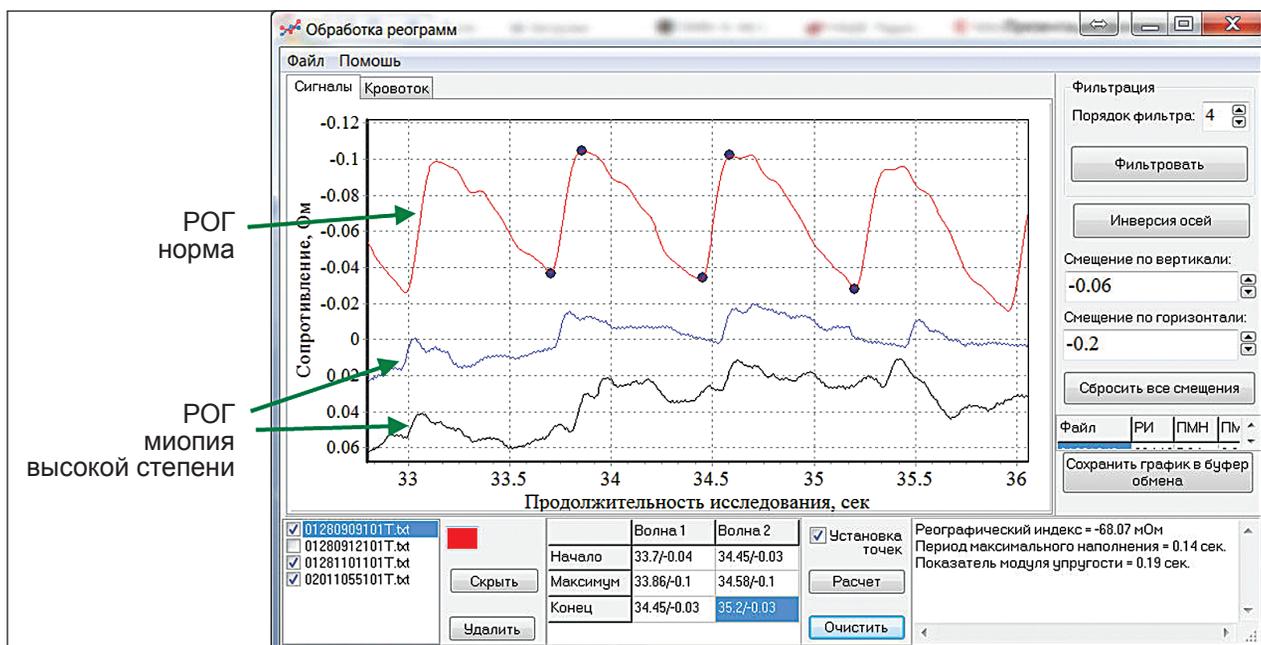


Рис. 3. Вид главного окна программы анализа сигнала ТП РОГ.