

<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-38-46>



Новый способ количественной оценки параметров аккомодации на основе объективной динамической аккомодометрии

Е.П. Тарутта¹, П.В. Лужнов², Н.А. Тарасова¹ ✉, Г.А. Маркосян¹, С.Э. Кондратова³, Л.А. Шамкина²

¹ ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

³ НИИ педиатрии и охраны здоровья детей РНЦХ им. Б.В. Петровского, ул. Фотиевой, д. 10, стр. 1, Москва, 119333, Россия

Цель работы — разработка способа объективной многофакторной оценки параметров аккомодации, включая ее устойчивость и микрофлюктуации (МФ), и оценка его диагностической ценности. **Материал и методы.** Динамический монокулярный аккомодационный ответ (МАО) измеряли на аппарате WAM-5500 (Grand Seiko, Япония) на промежутке времени от 10 до 60 с с частотой регистрации не менее 6 Гц, вычисляли аппроксимирующий кубический сплайн и оценивали вид тренда сигнала во временной области. Указанным способом оценен в динамике МАО 46 глаз 23 пациентов в возрасте 8–12 лет с приобретенной миопией от -0,87 до -5,75 дптр (в среднем -2,96 дптр). **Результаты.** В обследованных глазах частота МФ варьировала от 0,4 до 2,3 Гц (в среднем 1,4 Гц), а максимальный размах амплитуды — от 0,4 до 2,47 дптр (в среднем 1,2 дптр). Тренд (тенденция изменений) МАО в процессе исследования оставался постоянным в 10 глазах, повышался от 0,17 до 0,47 дптр (в среднем 0,29 дптр) в 8 и снижался от 0,1 до 1,53 дптр (в среднем 0,35 дптр) в 28 глазах. МАО варьировал от 0,79 до 2,63 дптр (в среднем 1,8 дптр). Выявлена корреляция минимального МАО и размаха сигнала с уровнем тренда ($r = 0,29$ и $r = 0,4$ соответственно) и слабая — частоты МФ с размахом сигнала ($r = 0,2$). Выделен комплекс критериев неустойчивости аккомодации: убывающий тренд более 0,35 дптр, частота МФ более 1,4 в секунду и/или максимальный размах сигнала более 1,2 дптр. **Заключение.** Разработан способ объективной многофакторной оценки параметров аккомодации, включая ее устойчивость и МФ, в реальном времени и пространстве.

Ключевые слова: аккомодация; микрофлюктуации; монокулярный аккомодационный ответ; критерии неустойчивости аккомодации

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Тарутта Е.П., Лужнов П.В., Тарасова Н.А., Маркосян Г.А., Кондратова С.Э., Шамкина Л.А. Новый способ количественной оценки параметров аккомодации на основе объективной динамической аккомодометрии. Российский офтальмологический журнал. 2024; 17 (2): 38-46. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-38-46>

A new method for quantifying accommodation parameters based on objective dynamic accommodometry

Elena P. Tarutta¹, Petr V. Luzhnov², Natalia A. Tarasova¹ ✉, Gayane A. Markossian¹, Svetlana E. Kondratova³, Ludmila A. Shamkina²

Purpose: to develop a technique for an objective multifactorial assessment of accommodation parameters, including accommodation stability and microfluctuations (MF), and an assessment of the diagnostic value of the technique. **Material and methods.** The dynamic monocular accommodative response (MAR) was measured using a WAM-5500 device (Grand Seiko, Japan) over a period of 10 to 60 seconds with a recording frequency of at least 6 Hz. The approximating cubic spline was calculated, and the temporal change of signal trend was assessed. The developed technique was used to evaluate the dynamics of MAR for 46 eyes of 23 patients aged 8–12 years with acquired myopia from -0.87 to -5.75 D (ave. -2.96 D). **Results.** In the examined eyes, the MF frequency varied from 0.4 Hz to 2.3 Hz (ave. 1.4 Hz), and the maximum amplitude ranged from 0.4 D to 2.47 D (ave. 1.2 D). Over the research period, the MAR trend remained constant in 10 eyes, increased from 0.17 to 0.47 (ave. 0.29 D) in 8, and decreased from 0.1 to 1.53 D (ave. 0.35 D) in 28 eyes. MAR varied from 0.79 to 2.63 (ave. 1.8 D). A correlation was found between the minimum MAR and the signal range with the trend level ($r = 0.29$ and $r = 0.4$, respectively) and a weak correlation was revealed between the MF frequency and the signal range ($r = 0.2$). A set of criteria for accommodation instability was identified: a decreasing trend of more than 0.35 D, a MF frequency of more than 1.4 per second and/or a maximum signal span of more than 1.2 D. **Conclusion.** The developed technique or objective multifactorial assessment of accommodation parameters, including stability and MF, in real time and space proves to be useful for the diagnosing of accommodation disorders.

Keywords: accommodation; microfluctuations; monocular accommodative response; criteria for accommodation instability

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: no authors have financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Tarutta E.P., Luzhnov P.V., Tarasova N.A., Markossian G.A., Kondratova S.E., Shamkina L.A. A new method for quantifying accommodation parameters based on objective dynamic accommodometry. Russian ophthalmological journal. 2024; 17 (2): 38–46 (In Russ.). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2024-17-2-38-46>

Аккомодация играет важную роль в постнатальном рефрактогенезе, регулировании роста глаза и развитии близорукости. Разработка новых объективных количественных методов исследования аккомодации является в настоящее время актуальной задачей [1–3].

Объективные методы исследования аккомодации основаны на регистрации изменений динамической рефракции в ответ на изменение аккомодационной задачи. Последнее может осуществляться с помощью перемещения объекта фиксации в пространстве (реальном или виртуальном) или с помощью приставления к глазу линз различной силы и знака [4]. При этом регистрируется изменение динамической рефракции глаза (аккомодационный ответ) и результат сравнивается с аккомодационной задачей (в диоптриях).

Существующие на сегодняшний момент исследования показывают, что величина аккомодационного ответа непостоянна, так как тонус цилиарной мышцы характеризуется постоянными колебаниями небольшой амплитуды. Еще М. Collins в 1937 г. с помощью его пионерского инфракрасного рефрактометра открытого поля обнаружил, что «фокус нестабилен, аккомодация постоянно варьирует в небольшом объеме и с удивительной скоростью: изменения, равные примерно плюс-минус 0,5 дптр от позиции фокуса, происходят приблизительно один раз в секунду или даже чаще» [5]. Позже F. Campbell и соавт. [6], используя инфракрасный оптометр, прояснили основные характеристики того, что мы сейчас называем микрофлюктуациями аккомодации (MFs, МФ). МФ имеют тенденцию усиливаться при повышении аккомодационного стимула (до 5,0 дптр), снижении контраста изображения (наименьший уровень МФ отмечен на высоких пространственных частотах), изменении диаметра зрачка, снижении освещенности. Большинство авторов отмечают симметричность МФ парных глаз и одинаковость в монокулярных и бинокулярных условиях исследования. Последнее говорит об отсутствии связи этого показателя с конвергенцией. МФ зависят от

натяжения zonularных связок: при взгляде вдаль они минимальны, при расслабленных связках аккомодирующего хрусталика повышаются. МФ выше у миопов, даже корригированных, хотя влияние оказывает еще и возраст, и характер течения (в частности, прогрессирование) миопии [7–11]. Как ни удивительно, но более высокий уровень МФ не сопровождался большим отставанием аккомодационного ответа. Отмечено, что увеличение МФ может быть полезно в диагностике астигматизма [12–15].

Что касается самой сути этого феномена, то считается, что МФ являются неотъемлемой частью общей системы контроля аккомодации, призванной оптимизировать совершенство последней. Так, например, M. Alpern [16] пишет, что флюктуации в одном направлении могут улучшать находящееся не в фокусе изображение, в то время как флюктуации в другом направлении ведут к еще большей его деградации. Таким образом, МФ могут оптимизировать первоначальный аккомодационный ответ или способствовать его удержанию. Однако есть и другая точка зрения: МФ попросту отражают нестабильность аккомодации и не играют существенной роли в общей деятельности аккомодационной системы [17, 18].

МФ разделяют на низкочастотные (НЧК) — с частотой менее 0,6 Гц — и высокочастотные (ВЧК) — с частотой до 2,1 Гц — компоненты. В оценке диагностической ценности этих компонентов существуют прямо противоположные мнения. В одних работах указано, что только НЧК имеет связь с состоянием аккомодации, в то время как ВЧК является отражением пульсовых и дыхательных колебаний; в других работах высказывается противоположная точка зрения [17, 18]. W. Charman и G. Heger [17, 18] отмечают, что упомянутое выше увеличение МФ в ответ на усиление аккомодационной задачи, снижение контраста и освещенности, изменение диаметра зрачка происходит в основном за счет НЧК. L. Gray и соавт. [19] обнаружили, что ВЧК не изменялся с изменением размера зрачка, в то время как НЧК значительно возрастал при диаметре 2,0 мм и ниже. Авторы

обратили внимание на схожесть зависимости НЧК МФ от диаметра зрачка и глубины фокусной области и предположили, что НЧК находится под неврологическим контролем, в то время как ВЧК — нет. Похожие результаты получили L. Stark и D. Atchison [20]. При этом оба компонента увеличивались при увеличении аккомодационного ответа. Интересно, что максимального пика оба компонента достигали в ответ на стимул в 5,0 дптр; дальнейшее усиление стимула (до 8,0 дптр) приводило не к увеличению, а к снижению МФ. Отдаление стимула за пределы дальнейшей точки ясного видения, т. е. его затуманивание, приводило к увеличению обоих компонентов МФ. А по данным M. Day и соавт. [10], только НЧК увеличивался с усилением стимула.

В то же время F. Campbell и соавт. [6] подчеркивают, что относительно короткое время, в течение которого совершается аккомодационный ответ (около 1 с), означает, что только флюктуации высокой частоты способны играть роль в инициации этого процесса в прослеженное время реакции (около 1/3 с). Тем не менее другие авторы [10] в эксперименте доказали, что МФ, в частности ВЧК, не способны регулировать изначальный динамический ответ. Какая-либо «активная» роль МФ ограничивается удержанием устойчивого состояния аккомодации, и НЧК, похоже, играет здесь главную роль. В противоположность этому E. Gamba и соавт. [21, 22], используя ОКТ, обнаружили, что МФ нарастают при увеличении аккомодационного стимула от 0 до 6,0 дптр при одинаковом участии НЧК и ВЧК, а в другой работе те же авторы, к своему удивлению, обнаружили, что увеличивался в основном ВЧК, а НЧК мало изменялся. При этом M. Collins и соавт. [5] продемонстрировали связь ВЧК с пульсом, а НЧК — с дыханием и пульсом. Все же большинство исследователей едины во мнении, что НЧК находится под неврологическим контролем, в то время как ВЧК есть просто «шум» (помехи, погрешности), возникающий вследствие пульсовых и других ритмических физиологических колебаний. Почти все авторы показывают связь НЧК с изменением формы и осевой позиции хрусталика и предполагают, что НЧК имеет хрусталиковую природу [23]. МФ максимальны у младенцев и снижаются с возрастом — это связывают с повышением эластичности хрусталика [24]. Однако независимо от их частоты любые МФ фокуса могут быть полезны в улучшении оптического качества дефокусированного изображения [25, 26]. Очевидно, имеет смысл исследовать общий уровень МФ без деления на НЧК и ВЧК.

Для объективной оценки сигналов аккомодации в настоящее время наиболее часто используется компьютерная аккомодография на аппаратах типа Auto Refract-Keratometer ACOMOREF Righton Speedy-K ver. MF-1 или 2-K. Предлагаются различные критерии, причем как анализ, так и графическое представление результатов проводят в частотной области [1, 27]. В этом приборе аккомодационная задача создается виртуальным приближением объекта к глазу из бесконечности на расстояние, соответствующее 3,0 дптр или реже — 5,0 дптр. По мере приближения объекта прибор пошагово регистрирует динамическую рефракцию глаза. Величину аккомодационного ответа можно получить, вычитая из этого показателя собственную рефракцию исследуемого глаза. При этом не предусмотрена возможность очковой коррекции, т. е. эметропизации имеющейся рефракции. Понятно, что адекватное напряжение аккомодации в таких условиях возможно лишь при гиперметропии, эметропии или миопии не выше 1,0 дптр. Поэтому собственно величину аккомодационного ответа рассматривают крайне редко. Как правило, исследование ограничивается оценкой МФ, а именно их ВЧК. Аккомодограф осуществляет частотный анализ

аккомодационных МФ методом трансформации Фурье и определяет интенсивность ВЧК в децибелах. Выраженность частотного диапазона, рассчитанная в дБ, представляется в виде цветовой гистограммы для каждого шага исследования. Цветовое картирование позволяет оценить уровень МФ. Степень напряжения цилиарной мышцы классифицируется цветом. Слабое напряжение соответствует зеленому цвету, сильное — красному, промежуточное — желтому.

В отличие от описанного выше, исследование аккомодации с помощью прибора WAM-5500 (Grand Seiko, Япония) осуществляется в реальном времени и пространстве благодаря конструктивной опции «открытого поля». Предусмотрена возможность исследования с очковой коррекцией или в пробной оправе, т. е. на эметропизированном глазу. После определения рефракции вдаль в пробную оправу помещают сферические и цилиндрические стекла, полностью корригирующие выявленную аметропию, и после этого в открытом пространстве предъявляют для фиксации объект на выбранном расстоянии от 50 до 20 см, что соответствует аккомодационной задаче в 2,0–5,0 дптр. При удержании фиксируемого объекта в течение отрезка времени до 60 с прибор в автоматическом режиме производит порядка 360 измерений (т. е. с частотой 6 замеров в секунду, или 6 Гц) динамической рефракции эметропизированного глаза. Это и есть аккомодационный ответ, а точнее, учитывая частые повторные измерения в течение некоего промежутка времени, динамический аккомодационный ответ. Далее полученные цифровые величины доступны пользователю в виде дискретизированных отсчетов и могут быть преобразованы в график. В итоге исследователь получает величину минимального, максимального и среднего аккомодационного ответа. Измерение частоты МФ конструкцией прибора не предусмотрено.

Важнейшим показателем аккомодационной способности является константность оптических установок глаза, т. е. устойчивость аккомодации. Устойчивость аккомодации — это способность сохранять на постоянном уровне затраты аккомодации [28]. Если фокусная установка во время работы постоянно изменяется, то зрительная работоспособность будет пониженной. Устойчивость аккомодации оценивается, как правило, субъективным путем — по величине затрат аккомодации. Увеличение затрат свидетельствует о гиперреактивной форме аккомодационного ответа, снижение затрат характерно для гипореактивной формы. Известен также объективный способ оценки устойчивости и запасов аккомодации, который заключается в повторном измерении аккомодационного ответа до и после непрерывного, в течение 3 мин, чтения текста для близи в условиях максимальной нагрузки аккомодации [29]. Описанный способ, однако, трудоемок, утомителен для пациента, особенно детского возраста, и не позволяет проводить динамическую оценку колебаний (МФ) аккомодационного ответа в процессе решения зрительной задачи.

ЦЕЛЬЮ настоящего исследования явилась разработка способа объективной многофакторной оценки параметров аккомодации, включая ее устойчивость и МФ, с помощью бинокулярного авторефрактометра открытого поля WAM-5500 (Grand Seiko) и оценка его диагностической ценности.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Предлагаемый способ количественной оценки сигналов аккомодации и диагностики ее устойчивости или неустойчивости подразумевает расчет основных диагностических показателей: максимального размаха, частоты

Таблица 1. Критерии устойчивости аккомодации и средняя величина MAO
Table 1. Criteria for the stability of accommodation and the average value of monocular accommodation response (MAR)

n	Частота МФ MF frequency			Тренд вниз Downward trend			Тренд вверх Upward trend			Разброс MAO MAR's spread			Средний MAO Average MAR		
	min	max	ср mean	min	max	ср mean	min	max	ср mean	min	max	ср mean	min	max	ср mean
46	0,4	2,3	1,4 ± 0,3	0,06	1,53	0,35 ± 0,1	0,17	0,47	0,29 ± 0,1	0,4	2,47	1,2 ± 0,4	0,79	2,63	1,8 ± 0,4

Примечание. n — количество глаз.
Note. n — number of eyes, MF — microfluctuations.

колебаний (МФ) и тренда изменений аккомодационного ответа — и последующий анализ их величин и сочетаний по выделенным нами критериям [30]. Для этого после получения массива всех точек дискретизированного динамического сигнала аккомодации по ним проводится аппроксимация кубическим сплайном, вычисляются его коэффициенты и проводится построение аппроксимирующего сплайна для визуального анализа и контроля [31].

Согласно предлагаемому способу, проводят динамическую компьютерную аккомодометрию на аппарате WAM-5500 (Grand Seiko, Япония) и регистрируют диагностический сигнал (рис. 1) на промежутке времени от 10 до 60 с с частотой регистрации не менее 6 Гц. Известная из литературы верхняя величина ВЧК, равная 2,1 Гц [29], дает, согласно теореме Котельникова, возможную частоту дискретизации при регистрации сигнала более 5 Гц. При меньшей частоте аккомодационные МФ не могут быть количественно оценены в полном объеме.

Зарегистрированный таким образом сигнал подвергают анализу предлагаемым способом, который заключается в вычислении аппроксимирующего кубического сплайна и оценке вида тренда сигнала во временной области. При этом с каждой точкой на сигнале аккомодации сопоставляется рассчитанная точка на той же временной оси, принадлежащая кубическому сплайну. В последующем все расчеты проводятся относительно точек данного кубического сплайна. Для дополнительного визуального анализа также производится графическое построение этого сигнала аккомодации.

Далее вычисляются частоты колебаний в каждый зарегистрированный момент времени относительно аппроксимирующего сигнала аккомодации кубического сплайна. При этом для анализа диагностической картины становятся доступны количественные показатели частоты колебаний (МФ) в секунду, максимального размаха сигнала (разница максимальной и минимальной величин аккомодационного ответа), тренда изолинии сигнала и характера его изменения на промежутке времени регистрации. Последний может быть постоянным (наклон менее 0,1 дптр), линейно возрастающим или снижающимся, что составляет три разных вида ответных реакций в процессе проведения динамической аккомодометрии. Отличительной особенностью является регистрация сигналов аккомодации в реальном времени и пространстве и без разделения МФ на ВЧК и НЧК. Указанным способом оценены в динамике монокулярные аккомодационные ответы (MAO) 46 глаз 23 пациентов (8 мальчиков и 15 девочек) в возрасте 8–12 лет с приобретенной миопией от -0,87 до -5,75 дптр (в среднем -2,96 дптр).

Таблица 2. Показатели аккомодации в зависимости от тренда
Table 2. Accommodation indicators depending on the trend

Характер тренда The trend character	Число глаз Number of eyes	Показатели аккомодации Accommodation indicators								
		MAO MAR			МФ MF			разброс сигнала signal spread		
		ср mean	min	max	ср mean	min	max	ср mean	min	max
Вверх Up	8	2,0*	1,7	2,5	1,8**	1,4	2,3	1,4	1,0	1,6
Постоянный Constant	10	1,8	1,4	2,6	1,2**	0,8	1,6	1,0	0,6	1,8
Вниз Down	28	1,6*	0,8	2,6	1,4	0,4	2,0	1,3	0,4	2,5

Примечание. * — $p < 0,05$ между группами 1 и 3, ** — $p < 0,01$ между группами 1 и 2.
Note. * — $p < 0.05$ between groups 1 and 3, ** — $p < 0.01$ between groups 1 and 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлены следующие колебания исследованных параметров: частоты МФ — от 0,4 до 2,3 Гц в секунду (в среднем 1,4 Гц), наклона убывающего тренда — от 0,06 до 1,53 (в среднем 0,35 дптр), максимального размаха сигнала — от 0,4 до 2,47 дптр (в среднем 1,22 дптр) (табл. 1). MAO по всей группе из 46 глаз колебался от резко сниженного — 0,79 птр до нормального — 2,63 дптр, в среднем составив 1,8 дптр (табл. 1). Постоянный тренд с наклоном менее 0,1 дптр выявлен в 10 глазах, нисходящий — в 28, восходящий — в 8 (табл. 2). В первом случае MAO составил в среднем 1,8 дптр (1,36–2,63), во втором — 1,6 дптр (0,79–2,58), в третьем — 2,0 дптр (1,72–2,49). Частота МФ в группе с постоянным трендом составила 1,2 Гц (0,8–1,6), с нисходящим — 1,4 Гц (0,4–2,0), с восходящим — 1,8 Гц (1,4–2,3). Средний разброс MAO, соответственно, 1,0 (0,59–1,82), 1,3 (0,40–2,47), 1,4 (1,0–1,6) дптр. Частота МФ выше 1,4 Гц выявлена в 19 из обследованных глаз, убывающего тренда более 0,35 дптр — в 17, разброса сигнала более 1,2 дптр — в 22 глазах. При этом перечисленные показатели не всегда присутствовали в одном и том же глазу, а по-разному сочетались от нуля (ни одного из перечисленных) до всех трех.

Исходя из полученных средних значений, мы предложили три пограничных критерия для определения неустойчивости аккомодации: частоту МФ более 1,4 Гц, нисходящий тренд уровня более 0,35 дптр и разброса сигнала — более 1,2 дптр. Анализ аккомодограмм по предложенным критериям показал следующее (табл. 3). Наличие всех трех перечисленных признаков неустойчивости аккомодации обнаружено в 7 глазах (1-я группа, резкое нарушение устойчивости аккомодации), наличие двух из перечисленных критериев, включая нисходящий тренд более 0,35 дптр, — в 7 глазах (2-я группа, умеренное снижение устойчивости), двух из трех признаков, но без присутствия нисходящего тренда — в 9 глазах (3-я группа), одного только нисходящего тренда уровня свыше 0,35 — в трех глазах (4-я группа), одного

признака без присутствия нисходящего тренда — в 5 глазах (5-я группа). В 15 глазах (6-я группа) не выявлено ни одного из перечисленных признаков неустойчивости аккомодации. Согласно предложенным критериям, группы 3, 4, 5 и 6 отнесены к устойчивой аккомодации. С учетом того факта, что главным показателем, определяющим аккомодационную способность, является объективный аккомодационный ответ (в данном случае — MAO), представлялось интересным сравнить величины MAO в перечисленных группах.

Наименьшие значения MAO, как видно из таблицы 3, оказались в первых двух группах, т. е. при наличии трех или двух критериев, включая убывающий тренд уровня 0,35 дптр и более. В группах 3–6, т. е. при наличии двух признаков без убывающего тренда или только одного признака, в том числе убывающего тренда, или при отсутствии всех признаков, показатели MAO были от 1,8 до 1,95 дптр. Разделение полученного материала на две большие группы: с неустойчивой аккомодацией (группы 1, 2) и с устойчивой аккомодацией (группы 3–6) — показало следующее (табл. 2). Величина аккомодационного ответа была достоверно выше в глазах с

устойчивой аккомодацией: 1,6 дптр против 1,8 дптр ($p < 0,05$). Помимо этого, минимальный MAO также был значительно ниже в глазах с неустойчивой аккомодацией (0,79 дптр против 1,34 дптр); величина максимального ответа практически не различалась в указанных группах.

Как следует из таблицы 2, наибольшую связь с MAO обнаружил характер тренда: при нисходящем тренде аккомодационный ответ был самым низким, особенно это касалось величины минимального MAO. При нисходящем тренде он составил 0,8 дптр, при постоянном — 1,4 дптр, при восходящем — 1,7 дптр. Средняя величина MAO также была наиболее высокой при восходящем тренде — 2,0 дптр, разница со средним MAO при нисходящем тренде (1,6 дптр) была достоверна ($p < 0,01$, табл. 2). При этом частота МФ также была самой высокой в группе восходящего тренда — 1,8 Гц ($p < 0,01$), причем это касалось и максимальной, и минимальной величин МФ. Создается впечатление, что частота МФ не всегда является неблагоприятным показателем. В нашем случае она, как видно, отражает усиленную работу аппарата аккомодации, позволившую в итоге повысить величину аккомодационного ответа в ходе продолжительной фиксации объекта.

Мы провели корреляционный анализ перечисленных ранее признаков: наклона тренда, частоты МФ, величины MAO и его максимального размаха. Как показано в таблице 4, помимо вполне понятных корреляций минимальной, максимальной и средней величин MAO между собой, заслуживающими внимания оказались следующие связи. Тренд умеренно отрицательно коррелировал с размахом сигнала ($r = -0,39$) и слабоположительно — с минимальным MAO ($r = 0,29$); размах MAO — отрицательно с минимальным и положительно с максимальным MAO ($r = 0,48$ и $r = 0,38$ соответственно). Слабая отрицательная связь обнаружена между размахом сигнала и частотой МФ ($r = -0,2$). Корреляции частоты МФ с аккомодационным ответом не обнаружено. Проведенные исследования позволили нам выделить следующие критерии для диагностики неустойчивости аккомодации: сочетание в одном глазу двух или трех перечисленных признаков — убывающего тренда более 0,35 дптр, частоты МФ более 1,4 Гц, максимального размаха сигнала более 1,2 дптр при обязательном наличии первого признака.

В качестве примеров на рисунках 2–4 приведены четыре сигнала аккомодации, зарегистрированных на приборе WAM-5500 (Grand Seiko, Япония) с частотой дискретизации 6 Гц и проанализированных на временной оси предложенным способом количественной оценки сигналов аккомодации. По результатам анализа данных предложенным способом было рассчитано число МФ в секунду, максимальный размах сигнала, а также определен тренд изменения сигнала аккомодации на оси времени в процессе его регистрации (обозначен красной линией на рисунках 2–4, числовые значения приведены в нижней строке изображений).

Так, пациент С. характеризуется незначительно линейно убывающим трендом сигнала аккомодации уровня 0,11, числом МФ за время регистрации — 13 (что соответствует

Таблица 3. Величина MAO в глазах с разной степенью устойчивости аккомодации
Table 3. The value of MAR in eyes with different degrees of accommodation stability

Группа Group	Число глаз Number of eyes	MAO MAR		
		ср mean	min	max
1	7	1,58*	0,79	2,42
2	7	1,66	1,31	2,02
3	9	1,95	1,84	2,2
4	3	1,8	1,34	2,63
5	5	1,93*	1,4	2,5
6	15	1,85	1,34	2,63
1 + 2	14	1,6*	0,79*	2,42
3 + 4 + 5 + 6	32	1,8*	1,34*	2,63

Примечание. * — $p < 0,05$ (группа 1 с группой 5; группа 1 + 2 с группой 3 + 4 + 5 + 6).

Note. * — $p < 0,05$ (group 1 with group 5; group 1 + 2 with group 3 + 4 + 5 + 6).

Таблица 4. Корреляции изучаемых параметров
Table 4. Correlations of the parameters studied

Показатели Parameters	Частота МФ MF frequency	Тренд Trend	MAO средний Mean MAR	MAO мин Min MAR	MAO макс Max MAR	Размах MAO MAR range
Частота МФ MF frequency	1,000	0,12	-0,01	0,02	-0,14	-0,2*
Тренд Trend	0,12	1,0000	0,15	0,29*	-0,04	-0,39*
MAO ср Mean MAR	-0,01	0,15	1,0000	0,83**	0,86**	-0,007
MAO мин Min MAR	0,02	0,29	0,83	1,0000	0,63**	-0,48*
MAO макс Max MAR	-0,14	-0,04	0,86**	0,63**	1,0000	0,38*
Размах MAO MAR range	-0,2*	-0,39*	-0,007	-0,48*	0,38*	1,0000

Примечание. * — $p < 0,05$, ** — $p < 0,01$.

Note. * — $p < 0,05$, ** — $p < 0,01$.

1,3 колебания в секунду, т. е. 1,3 Гц), максимальным размахом сигнала (min-мах аккомодационного ответа) — 0,82 дптр. То есть все три показателя соответствуют критериям устойчивого аккомодационного ответа (рис. 2).

Пациент М. характеризуется числом МФ за время регистрации 12 (1,2 Гц), максимальным размахом — 1,3 дптр, убывающим трендом уровня — 0,66 дптр. Данный тренд показывает резкое снижение величины аккомодационного ответа за время исследования, максимальный размах превышает 1,2 дптр. Таким образом, два показателя из трех (включая убывающий тренд уровня более 0,35 дптр) свидетельствуют о неустойчивости аккомодации (рис. 3).

Пациент К. (рис. 4) характеризуется частотой МФ 1,6 Гц, убывающим трендом уровня — 0,57 дптр и размахом сигнала — 1,37 дптр. Все три показателя (включая тренд более 0,35) свидетельствуют о неустойчивости аккомодации.

ОБСУЖДЕНИЕ

Нами разработан новый способ количественной оценки сигналов аккомодации и диагностики ее неустойчивости на основе динамической аккомодометрии в реальном пространстве и времени с помощью бинокулярного авторефрактометра открытого поля WAM-5500 (Grand Seiko, Япония), который подразумевает расчет основных диагностических показателей: максимального размаха сигнала MAO, МФ, тренда изолинии сигнала и характера его изменения на промежутке времени регистрации.

Последующий анализ их величин и сочетаний по выделенным нами критериям, а также анализ корреляций этих критериев с величиной аккомодационного ответа показали следующее. Величина аккомодационного ответа не является постоянной и при динамической регистрации с частотой 6 Гц показывает колебания, частота и амплитуда которых непостоянны и различаются как у разных пациентов, так и в течение одного исследования (даже при минимальной продолжительности последнего в 10 с). Выявленная нами в обследованных 46 глазах детей со слабой и средней миопией частота МФ варьировала от 0,4 до 2,3 Гц (в среднем 1,4 Гц), а максимальный размах амплитуды — от 0,4 до 2,47 дптр (в среднем 1,2 дптр). Тренд (тенденция изменений) MAO в процессе исследования оставался постоянным (снижался менее чем на 0,1 дптр) в 10 глазах, повышался от 0,17 до 0,47 дптр (в среднем 0,29 дптр) в 8 и снижался от 0,1 до 1,53 дптр

(в среднем 0,35 дптр) в 28 глазах. Средняя величина MAO варьировала от 0,79 до 2,63 дптр (в среднем 1,8 дптр).

Величина MAO (средняя, максимальная и минимальная) была наиболее высокой в глазах с восходящим

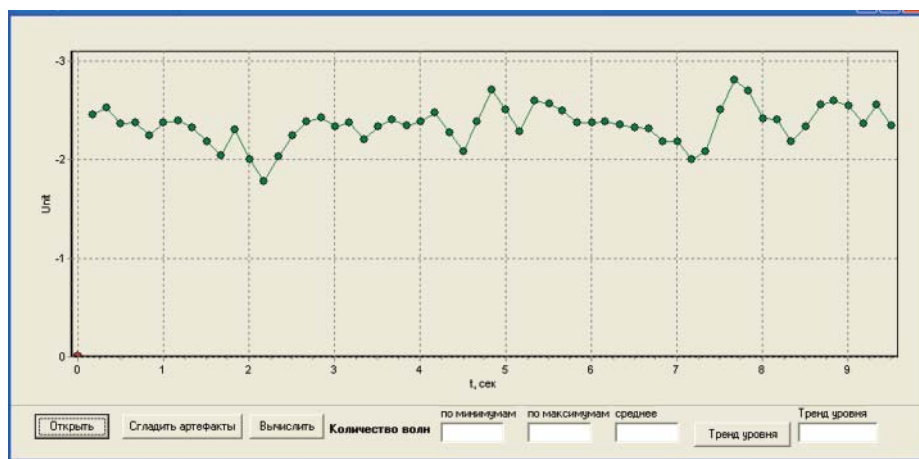


Рис. 1. График исходного динамического аккомодационного ответа (MAO)
Fig. 1. Graph of the initial dynamic monocular accommodation response (MAR)

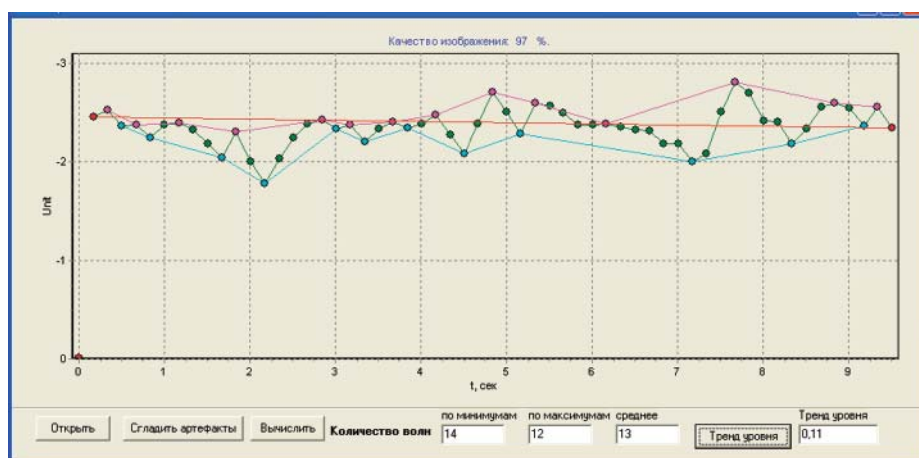


Рис. 2. Математически обработанный график. Пациент С. с устойчивым MAO. Пояснения в тексте
Fig. 2. Mathematically processed graph. A patient S. with stable MAR. Explanations in the text

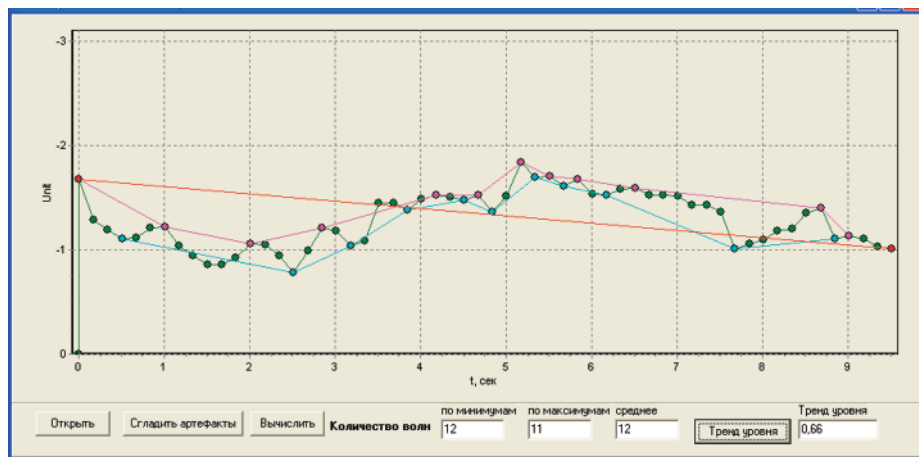


Рис. 3. Пациент М., неустойчивая аккомодация. Пояснения в тексте
Fig. 3. Patient M., unstable accommodation. Explanations in the text

трендом, т. е. в глазах, в которых в процессе динамического исследования наблюдалось повышение аккомодационного ответа. При этом в тех же глазах отмечена наибольшая частота МФ. Мы склонны трактовать этот факт как свидетельство усиленной работы аппарата аккомодации при решении предъявленной в реальных условиях зрительной задачи. В ряде работ подчеркивается, что МФ зависят от натяжения зонулярных связок, при расслабленных связках аккомодирующего хрусталика они повышаются. Большинство авторов указывают на повышенный уровень МФ, а именно их высокочастотного компонента, как на признак болезненного состояния цилиарной мышцы, ее спазма, гипертонуса, астенотического состояния [2, 3, 12–15, 32]. Примененная нами методика, как уже указывалось, принципиально отличается от исследования амплитуды МФ (АМФ) на аппарате Righton Speedy-K — аккомодационный ответ полностью эметропизированного глаза оценивается в реальных, приближенных к жизни, условиях решения зрительной задачи; помимо этого, оценивается не ВЧК, а общий уровень АМФ — частота колебаний аккомодационного ответа во временном диапазоне. Возможно, с этим связано полученное расхождение результатов. Однако и в виртуальных условиях, на аппарате Righton Speedy-K, некоторые авторы отмечали, что более высокий уровень МФ не сопровождался большим отставанием аккомодационного ответа [7–10]. L. Stark и D. Atchison [20] указывали, что оба компонента АМФ усиливаются по мере повышения аккомодационного ответа, а M. Day и соавт. [10] — что это происходит только с НЧК. Приведенные сообщения согласуются с нашими и указывают на возможную положительную роль МФ в решении аккомодационной задачи.

Наше многофакторное комплексное исследование касалось не только МФ, но и других параметров, отражающих стабильность, адекватность, устойчивость аккомодации. Проведенный сравнительный, а также корреляционный анализ показал, что наибольшую связь с параметрами аккомодационного ответа (минимальным МАО и размахом сигнала) имеет уровень тренда ($r = 0,29$ и $r = -0,39$ соответственно). Частота МФ обнаружила лишь слабую связь с размахом сигнала ($r = 0,2$). Взятый отдельно критерий частоты МФ не показал связи с МАО, однако присоединение его к двум другим критериям: уровню тренда более 0,35 дптр и размаху сигнала более 1,2 дптр — выявляет, как показано в таблице 2, наибольшее снижение аккомодационного ответа. Наибольшей диагностической ценностью, как показали результаты наших исследований, обладает выделенный комплекс критериев: сочетание убывающего тренда более 0,35 дптр, частоты МФ более 1,4 в секунду и/или максимального размаха сигнала более 1,2 дптр. Предложенный способ объективной количественной оценки состояния аккомодации послужит основой для дальнейших исследований, которые позволят пролить свет на диагностическую ценность и суть описанных параметров.

ВЫВОДЫ

1. Разработан способ объективной многофакторной оценки параметров аккомодации, включая ее устойчивость и МФ, в реальном времени и пространстве.

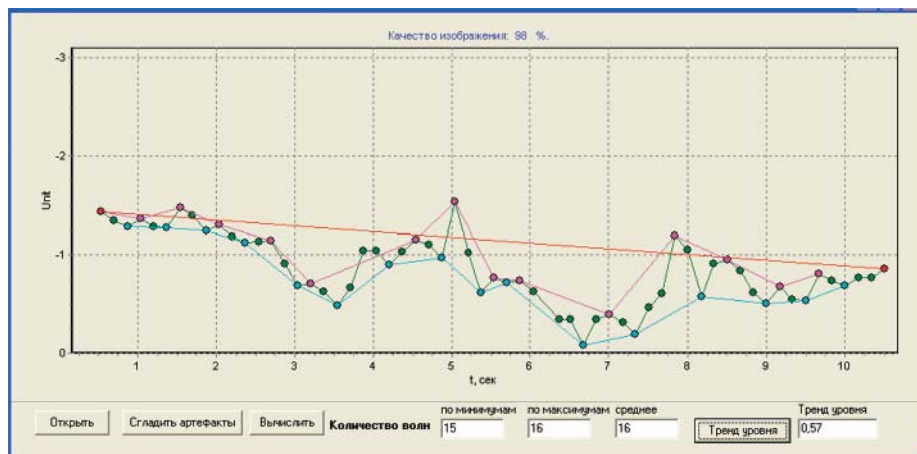


Рис. 4. Пациент К., неустойчивая аккомодация. Пояснения в тексте
Fig. 4. Patient K., unstable accommodation. Explanations in the text

2. Предложены параметры количественной оценки сигналов аккомодации по характеру и уровню тренда аккомодационного ответа, его максимальному размаху, частоте МФ.

3. Тренд сигнала показал среднюю отрицательную корреляционную связь с размахом сигнала ($r = -0,39$) и слабую положительную — с минимальным МАО ($r = 0,29$); частота МФ слабо коррелировала с размахом сигнала ($r = -0,2$).

4. Наиболее информативной в диагностике состояния аккомодации является комплексная оценка предложенных параметров и их сочетаний.

5. Выделены объективные диагностические критерии неустойчивости аккомодации: различные сочетания убывающего тренда более 0,35 дптр, частоты МФ более 1,4 в секунду, максимального размаха сигнала более 1,2 при обязательном присутствии первого.

Литература/References

1. Жаров В.В., Никишин Р.А., Егорова А.В. и др. Клиническая оценка состояния аккомодации с помощью метода компьютерной аккомодографии. В кн.: Ерошевские чтения. Самара, 2007: 437–40. [Zharov V.V., Nikishin R.A., Egorova A.V., et al. Clinical assessment of the state of accommodation using the method of computer accommodation. In: Eroshevskie chteniya. Samara, 2007: 437–40 (In Russ.).]
2. Ершова Р.В., Бржеский В.В., Соколов В.О., Кравченко Е.А. Характеристика основных показателей компьютерной аккомодографии у школьников с миопией и эметропией. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2017; 12 (3): 133–8. [Ershova R.V., Brzheskiy V.V., Sokolov V.O., Kravchenko E.A. The characteristic of the main parameters of computed accommodography for the school children presenting with myopia and emmetropia. *Rossiyskaya pediatricheskaya oftalmologiya*. 2017; 12 (3): 133–8 (In Russ.).] <http://dx.doi.org/10.18821/1993-1859-2017-12-3-133-138>
3. Махова М.В., Страхов В.В. Взаимосвязь аккомодографических и субъективных диагностических критериев различных нарушений аккомодации. *Российский офтальмологический журнал*. 2019; 12 (3): 13–9. [Makhova M.V., Strakhov V.V. Interaction of accommodative and subjective diagnostic criteria of accommodation disorders. *Russian ophthalmological journal*. 2019; 12 (3): 13–9 (In Russ.).] <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2019-12-3-13-19>
4. Тарутта Е.П., Тарасова Н.А., Арутюнян С.Г., Максимова М.В. Сравнительный анализ величины дистантного и ленсииндуцированного объективного аккомодационного ответа у пациентов с различной рефракцией. *Вестник офтальмологии*. 2017; 133 (4): 37–41. [Tarutta E.P., Tarasova N.A., Arutyunyan S.G., Maksimova M.V. A Comparative analysis of the magnitude of the distance and lens-induced objective accommodative response in patients with different refraction. *Vestnik oftalmologii*. 2017; 133 (4): 37–41 (In Russ.).] <https://doi.org/10.17116/oftalma2017133437-41>
5. Collins M, David B, Wood J. Microfluctuations of steady-state accommodation and the cardiopulmonary system. *Vision Res*. 1995; 35: 2491–502. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(95\)00024-0](https://doi.org/10.1016/0042-6989(95)00024-0)

6. Campbell FW, Robson JG, Westheimer G. Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. *J Physiol (London)*. 1959; 145: 579–94. doi: 10.1113/jphysiol.1959.sp006164
7. Harb E, Thorn F, Troilo D. Characteristics of accommodative behavior during sustained reading in emmetropes and myopes. *Vision Res*. 2006; 46: 2581–92. <https://doi.org/10.1167/iov.02-0264>
8. Seidel D, Gray LS, Heron G. Retinotopic accommodation responses in myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2003; 44: 1035–41. <https://doi.org/10.1167/iov.02-0264>
9. Langaas T, Riddell PM, Svarverud E, et al. Variability of the accommodation response in early onset myopia. *Optom Vis Sci*. 2008 Jan; 85 (1): 37–48. doi: 10.1097/OPX.0b013e31815ed6e9
10. Day M, Strang FC, Seidel D, Gray LS, Mallen EAH. Refractive group differences in accommodation microfluctuations with changing accommodation stimulus. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2006 Jan; 26 (1): 88–96. doi: 10.1111/j.1475-1313.2005.00347.x
11. Sreenivasan V, Irving EL, Bobier WR. Effect of near adds on the variability of accommodative response in children. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2011 Mar; 31 (2): 145–54. doi: 10.1111/j.1475-1313.2010.00818.x
12. Iwasaki T, Kurimoto S. Objective evaluation of eye strain using measurements of accommodative oscillation. *Ergonomics*. 1987; 30: 581–7. <https://doi.org/10.1080/00140138708969747>
13. Gray LS, Gilmartin B, Winn B. Accommodation microfluctuations and pupil size during sustained viewing of visual display terminals. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2000; 20: 5–10. PMID: 10884926
14. Kajita M, Ono M, Suzuki S, Kato K. Accommodative microfluctuation in asthenopia caused by accommodative spasm. *Fukushima J Med Sci*. 2001 Jun; 47 (1): 13–20. doi: 10.5387/fms.47.13
15. Jeng WD, Ouyang Y, Huang TW, et al. Research of accommodative microfluctuations caused by visual fatigue based on liquid crystal and laser displays. *Applied Opt*. 2014 Oct 10; 53 (29): H76–84. doi: 10.1364/AO.53.000H76
16. Alpern M. Variability of accommodation during steady fixation at various levels of illuminance. *J Opt Soc Am*. 1958 Mar; 48 (3): 193–7. doi: 10.1364/josa.48.000193
17. Charman WN, Heron G. Fluctuations in accommodation: a review. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1988; 8 (2): 153–64. doi: 10.1111/j.1475-1313.1988.tb01031.x
18. Charman WN, Heron G. Microfluctuations in accommodation: an update on their characteristics and possible role. *Ophthalmic and Physiological Optics*. 2015; 35 (5): 476–99. <https://doi.org/10.1111/opo.12234>
19. Gray LS, Winn B, Gilmartin B. Accommodative microfluctuations and pupil diameter. *Vision Res*. 1993 Oct; 33 (15): 2083–90. doi: 10.1016/0042-6989(93)90007-j
20. Stark LR, Atchison DA. Pupil size, mean accommodation response and the fluctuations of accommodation. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1997 Jul; 17 (4): 316–23. PMID: 9390376
21. Gamba E., Sawides L., Dorronsoro C., Marcos S. Accommodative lag and fluctuations when optical aberrations are manipulated. *J Vision*. 2009 Jun 9; 9 (6): 4.1–15. doi: 10.1167/9.6.4
22. Gamba E, Ortiz S, Perez-Merino P, et al. Static and dynamic crystalline lens accommodation evaluated using quantitative 3-D OCT. *Biomed Opt Express*. 2013 Aug 8; 4 (9): 1595–609. doi: 10.1364/BOE.4.001595
23. Van der Heijde GL, Beers HPA, Dubbelman M. Microfluctuations of steady-state accommodation measured with ultrasonography. *Ophthalmic Physiol Opt*. 1996 May; 16 (3): 216–21. doi: 10.1046/j.1475-1313.1996.95000518.x
24. Candy TR, Bharadwaj SR. The stability of steady state accommodation in human infants. *J Vision*. 2007 Aug 17; 7 (11): 4.1–16. doi: 10.1167/7.11.4
25. Lohmann AW, Paris DP. Influence of longitudinal vibrations on image quality. *Applied Opt*. 1965; 4: 393–7. <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?URI=ao-4-4-393>
26. Iskander DR. Signal processing in visual optics. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2014; 31: 155–8. doi: 10.1109/MSP.2014.2312072
27. Auto Refract-Keratometer ACOMOREF 2 K-Model. User manual, RIGHT MFG.CO., LTD. 1-47-3, Maeno-cho, Itabashi-ku, Tokyo, 174-8633 Japan; 2018.
28. Игнатъев С.А., Корнюшина Т.А., Шаповалов С.Л., Милявская Т.И. Зрительное утомление при работе с видеодисплейными терминалами и современные методы его профилактики. Москва: Мик; 2013: 44–5. [Ignatiev S.A., Kornushina T.A., Shapovalov S.L., Milyavskaya T.I. Visual fatigue when working with video display terminals and modern methods of its prevention. Moscow: Mic; 2013: 44–5 (In Russ.)].
29. Тарутта Е.П., Филинова О.Б. Способ исследования запасов и устойчивости относительной аккомодации. Патент на изобретение RU 2367385, 2009. [Tarutta E.P., Filinova O.B. A method for studying stocks and stability of relative accommodation. Patent RU 2367385, 2009 (In Russ.)].
30. Тарутта Е.П., Лужнов П.В., Тарасова Н.А. и др. Способ диагностики неустойчивости аккомодации. Патент РФ № 2809454 от 11.12.2023. [Tarutta E.P., Luzhnov P.V., Tarasova N.A., et al. Method for diagnosing instability of accommodation. Patent RU 2809454, 11.12.2023 (In Russ.)].
31. Беляев К.Р., Кузьминых Н.Ю. Методы выделения дыхательного паттерна в системах неинвазивного мониторинга параметров центральной гемодинамики. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 1999; 3: 33–45. [Belyaev K.R., Kuzminykh N.Yu. Methods of respiratory pattern isolation in systems of noninvasive monitoring of central hemodynamic parameters. *Biomedical radioelectronics*. 1999; 3: 33–45 (In Russ.)].
32. Жукова А.В., Егорова А.В. Компьютерная аккомодография. В кн.: Аккомодация. Руководство для врачей. Москва: Апрель; 2012: 63–6. [Zhukova A.V., Egorova A.V. Computer accommodography. In: Accommodation. A Guide for Doctors. Moscow: April; 2012: 63–6 (In Russ.)].

Вклад авторов в работу: Е.П. Тарутта — дизайн исследования, анализ литературы, анализ и интерпретация данных, подготовка и редактирование рукописи; П.В. Лужнов — анализ и интерпретация данных, разработка метода обработки сигнала; Н.А. Тарасова — сбор и обработка данных, анализ и интерпретация данных, подготовка рукописи и финального варианта статьи; Г.А. Маркосян — сбор и анализ данных; С.Э. Кондратова — сбор литературы, статистическая обработка данных; Л.А. Шамкина — анализ и интерпретация данных, математический анализ.

Authors' contribution: E.P. Tarutta — study design, literature review, data analysis and interpretation, manuscript preparation and editing; P.V. Luzhnov — analysis and interpretation of data, development of a signal processing method; N.A. Tarasova — data collection and processing, data analysis and interpretation, preparation of the manuscript and the final version of the article; G.A. Markosyan — data collection and analysis; S.E. Kondratova — literature collection, statistical data processing; L.A. Shamkina — analysis and interpretation of data, mathematical analysis.

Поступила: 12.04.2023. Переработана: 18.04.2023. Принята к печати: 19.04.2023

Originally received: 12.04.2023. Final revision: 18.04.2023. Accepted: 19.04.2023

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ФГБУ «НМИЦ глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, д. 14/19, Москва, 105062, Россия

Елена Петровна Тарутта — д-р мед. наук, профессор, начальник отдела патологии рефракции бинокулярного зрения и офтальмоэргномики, ORCID 0000-0002-8864-4518

Наталья Алексеевна Тарасова — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргномики, ORCID 0000-0002-3164-4306

Гаяне Айказовна Маркосян — д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргномики

МГТУ им. Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005, Россия

Петр Вячеславович Лужнов — канд. техн. наук, доцент кафедры «Медико-технические информационные технологии»

Людмила Андреевна Шамкина — канд. техн. наук, сотрудник кафедры «Медико-технические информационные технологии»

НИИ педиатрии и охраны здоровья детей РНЦХ им. Б.В. Петровского, ул. Фотиевой, д. 10, стр. 1, Москва, 119333, Россия

Светлана Эдуардовна Кондратова — научный сотрудник НИИ педиатрии и охраны здоровья детей РНЦХ им. Б.В. Петровского, ORCID 0000-0002-6522-5310

Для контактов: Наталья Алексеевна Тарасова,
tar221@yandex.ru

National Medical Research Center of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russia

Elena P. Tarutta — Dr. of Med. Sci., professor, head of the department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics, ORCID 0000-0002-8864-4518

Natalia A. Tarasova — Cand. of Med. Sci., senior researcher of the department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics, ORCID 0000-0002-3164-4306

Gayane A. Markossian — Cand. of Med. Sci., leading researcher of the department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics

Bauman Moscow State Technical University, 5, Bldg. 1, 2nd Bauman St., Moscow, 105005, Russia

Petr V. Luzhnov — Cand. of Tech. Sci., associate professor of chair of medical and technical information technologies

Liudmila A. Shamkina — Cand. of Tech. Sci., researcher of chair of medical and technical information technologies

Research Institute of Pediatrics and Child Health Protection of the Petrovsky National Research Centre of Surgery, 10, Bldg.1, Fotieva St., Moscow, 119333, Russia

Svetlana E. Kondratova — researcher, ORCID 0000-0002-6522-5310

For contacts: Natalia A. Tarasova,
tar221@yandex.ru