

<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2019-12-2-49-58>

Состояние и динамика волнового фронта глаза у детей с различной рефракцией на фоне регулярных занятий спортом (бадминтоном)

Е.П. Тарутта — д-р мед. наук, профессор, начальник отдела патологии рефракции бинокулярного зрения и офтальмоэргономики¹

Н.А. Тарасова — канд. мед. наук, старший научный сотрудник отдела патологии рефракции бинокулярного зрения и офтальмоэргономики¹

Г.А. Маркосян — д-р мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела патологии рефракции бинокулярного зрения и офтальмоэргономики¹

Н.В. Ходжабекян — канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник отдела патологии рефракции, бинокулярного зрения и офтальмоэргономики¹

С.Г. Арутюнян — канд. мед. наук, врач-офтальмолог¹, старший научный лаборант²

С. Георгиев — студент³

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

² ФПДО ГБОУ ВПО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, 127473, Москва, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1

³ Первый МГМУ им. И.М. Сеченова, 119991, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2

Целью настоящей работы явился сравнительный анализ уровня аберраций, структуры волнового фронта, его реакции на циклоплегию у детей с различной рефракцией до и через год после регулярных занятий спортом (бадминтоном). **Материал и методы.** Обследовано 40 детей (80 глаз) с аномалиями рефракции от +6,63 до -6,75 дптр (в среднем $-1,28 \pm 2,28$ дптр) в возрасте от 7 до 11 лет (в среднем $9,24 \pm 1,06$ года) до, через 6 мес (38 детей, 72 глаза) и 1 год (27 детей, 54 глаза) занятий бадминтоном. Всем пациентам проводили аберрометрию волнового фронта до и после циклоплегии на аберрометре OPD-Scan III (Nidek). Анализировали коэффициенты Цернике до 12-го порядка включительно: вертикальный и горизонтальный наклон (tilt 1, tilt 2), вертикальный и горизонтальный трейfoil (trefoil 6, trefoil 9), вертикальную и горизонтальную кому (coma 7, coma 8), сферическую аберрацию (SA), среднеквадратичное отклонение от идеального волнового фронта (RMS). **Результаты.** Установлено, что SA при миопии отрицательная, при гиперметропии положительная; tilt 1, tilt 2, trefoil 9, coma 7 при миопии достоверно выше, а coma 8 достоверно ниже, чем при гиперметропии. Наклон волнового фронта (tilt 1, tilt 2) в условиях циклоплегии достоверно снижается в гиперметропических глазах и не изменяется в миопических. Последнее свидетельствует о недостаточном натяжении цинновых связок миопического глаза. На фоне регулярных занятий бадминтоном отмечаются достоверные изменения аберраций волнового фронта, свидетельствующие об укреплении связочного аппарата хрусталика и нормализации тонуса цилиарной мышцы. **Заключение.** Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией достоверно различается. Занятия бадминтоном способствуют укреплению связочного аппарата хрусталика.

Ключевые слова: миопия, гиперметропия, аберрации, бадминтон

Для цитирования: Тарутта Е.П., Тарасова Н.А., Маркосян Г.А., Ходжабекян Н.В., Арутюнян С.Г., Георгиев С. Состояние и динамика волнового фронта глаза у детей с различной рефракцией на фоне регулярных занятий спортом (бадминтоном). Российский офтальмологический журнал. 2019; 12 (2): 49-58. doi: 10.21516/2072-0076-2019-12-2-49-58

Конфликт интересов: отсутствует.

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

The state and dynamics of the wavefront of the eye in children with different refractions engaged in regular sport activities (badminton)

E.P. Tarutta — Dr. Med. Sci., Professor, head, department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics¹

N.A. Tarasova — Cand. Med. Sci., senior researcher, department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics¹

G.A. Markosian — Dr. Med. Sci., leading researcher, department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics¹

N.V. Khodzhbekyan — Cand. Med. Sci., leading researcher, department of refractive pathology, binocular vision and ophthalmoeconomics¹

S.G. Harutyunyan — Cand. Med. Sci., ophthalmologist¹, senior research assistant²

S. Georgiev — student³

¹ Moscow Helmholtz Research Institute of Eye Diseases, 14/19, Sadovaya-Chernogryazskaya St., 105062, Moscow, Russia

² Moscow Evdokimov State Medical Stomatological University, Faculty of Postgraduate Education, 20, Bldg. 1, Delegatskaya St., 127473, Moscow, Russia

³ I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, 8/2, Trubetskaya st., Moscow, 119991, Russia tar221@yandex.ru

*The paper is **aimed** at comparing the level of aberrations, structure of the wavefront, and its response to cycloplegia in children with different refractions before they started practicing badminton regularly and after a year's duration of this practice. **Material and methods.** 40 children (80 eyes) with refractive errors from +6.63 to -6.75 D (average -1.28 ± 2.28 D) aged 7 to 11 years (average 9.24 ± 1.06 years) were examined before the practice, 6 months after practice start (38 children, 72 eyes) and after 1 year of badminton playing (27 children, 54 eyes). All patients underwent wavefront aberrometry before and after cycloplegia on an OPD-Scan III (Nidek) aberrometer. We analyzed Zernike coefficients up to the 12th order inclusive: vertical and horizontal slope (tilt 1, tilt 2), vertical and horizontal trefoil (trefoil 6, trefoil 9), vertical and horizontal coma (coma 7, coma 8), spherical aberration (SA), mean square deviation from the ideal wavefront (RMS). **Results.** SA in myopia was found to be negative, in hyperopia positive; tilt 1, tilt 2, trefoil 9, coma 7 in myopia were significantly higher, and coma 8 significantly lower than in hyperopia. The slope of the wavefront (tilt 1, tilt 2) in cycloplegia falls significantly in hyperopic eyes and does not change in myopic ones. The latter fact points to insufficient tension of Zinn ligaments in the myopic eye. Regular badminton practice results in significant changes in wavefront aberrations, indicating a strengthening of the ligaments of the lens and the normalization of the ciliary muscle tone. **Conclusions.** The structure of the wavefront in children with different refractions shows significant differences. Badminton helps strengthen the ligaments of the lens.*

Keywords: myopia, aberrations, badminton

For citation: Tarutta E.P., Tarasova N.A., Markosian G.A., Khodzhbekyan N.V., Harutyunyan S.G., Georgiev S. The state and dynamics of the wavefront of the eye in children with different refractions engaged in regular sport activities (badminton). Russian ophthalmological journal. 2019; 12 (2): 49-58 (In Russian). doi: 10.21516/2072-0076-2019-12-2-49-58

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

Частота миопии в последние десятилетия неуклонно увеличивается и составляет 30–40 % среди лиц молодого возраста в нашей стране, в США и европейских странах и 70–96 % в регионе Юго-Восточной Азии [1–5].

По данным А.И. Дашевского [6], дети 4–7 лет в норме должны иметь гиперметропическую рефракцию (порядка 1,0 дптр). К сожалению, повышение зрительных нагрузок, компьютеризация всех аспектов жизни современных детей, увеличение требований к новым программам в школе, снижение физической нагрузки и гиподинамия привели к ранней эметропизации (в возрасте 4–6 лет) и возникновению близорукости в школьном возрасте [7]. В последние годы в развитии приобретенной миопии все большую роль отводят снижению физической активности, особенно на открытом пространстве, и для минимизации патогенного действия неблагоприятных факторов окружающей среды рекомендуют занятия спортом. В этом отношении идеальным видом спорта, в котором гармонично сочетаются слежение за движущимся объектом (тренировка аккомодации), повороты головы и туловища (активизация гемодинамики), глубокое дыхание (оксигенация крови), является бадминтон.

Согласно современным воззрениям, в развитии приобретенной близорукости, помимо наследственной обусловленности, значительную роль играют факторы внешней среды и прежде всего — оптические погрешности формирования ретинального изображения. В экспериментах показано, что как центральная, так и периферическая гиперметропическая дефокусировка изображения стимулирует рост глаза и миопизацию рефракции. В свою очередь, фокусировка изображения на сетчатке определяется точностью (адекватностью) и устойчивостью аккомодационного ответа, а также аберрациями волнового фронта глаза. Последние тесно взаимосвязаны с аккомодацией и периферической рефракцией. С одной стороны, аберрации определяют качество ретинального изображения и являются стимулом к его фокусировке. Известно, что отрицательная сферическая аберрация (СА) и кома стимулируют аккомодационный ответ; напряжение аккомодации, в свою очередь, усиливает отрицательную СА [8, 9]. С другой стороны, высокий уровень аберраций, в частности положительной СА, увеличивает глубину фокусной области, облегчает зрительную работу вблизи без участия аккомодации (так называемая псевдоаккомодация) и может снижать аккомодационный ответ, что приводит к отставанию аккомодации (accommodation lag) и формированию гиперметропического дефокуса на сетчатке.

По предположению М. Collins и С. Wildsoet, индивидуальные аберрации, такие как СА, могут нарушить процесс эметропизации. По мнению авторов, отрицательная СА индуцирует миопический рост глаза, а положительная, наоборот, замедляет [10].

В ряде работ сообщается о высоких значениях аберраций 4-го, 5-го и более высоких порядков у лиц с миопией по сравнению с эметропами [11]. В глазах с быстрым прогрессированием миопии наблюдался более высокий уровень как общих аберраций (total HOAs) и среднеквадратичного отклонения от идеального волнового фронта (RMS), так и аберраций 3-го порядка и комы, чем в глазах с медленным прогрессированием миопии [12–15]. Изменение СА при близорукости связывают с изменением хрусталика во время роста глаза [16, 17]. Более высокий уровень аберраций, снижающих качество ретинального изображения, может играть роль в развитии миопии [13, 18, 19].

В то же время в некоторых исследованиях в миопических глазах зарегистрирован, наоборот, более низкий, чем в эметропических, уровень аберраций 4-го порядка [10], СА [20–22], аберраций 3-го и высших порядков [20, 23, 24]. В других работах не обнаружено различий в параметрах волнового фронта в разных рефракционных группах [25–28].

В естественных условиях существует физиологический тонус аккомодации, обеспечивающийся балансом между симпатической и парасимпатической иннервацией [29]. Благодаря этому тону (в основном) внутренняя оптика глаза стремится компенсировать роговичные аберрации, что приводит к снижению общих (глазных) HOAs и улучшению ретинального образа. У детей и молодых лиц с миопией и гиперметропией общие HOAs ниже роговичных [30, 31].

Изменения волнового фронта выявляются и при циклоплегии в сравнении с нециклоплегическими условиями [32].

Представляет особый интерес сравнение аберраций волнового фронта и их изменений под действием циклоплегии в глазах с миопией и гиперметропией. Согласно полученным нами ранее данным, в естественных условиях при ширине зрачка 3 мм уровень аберраций tilt 1, горизонтальный трейлоид и вертикальная кома достоверно выше при миопии, чем при гиперметропии, а их изменения в ответ на циклоплегию существенно ниже или отсутствуют. Нам представляется, что эти особенности можно связать с состоянием связочного аппарата хрусталика и цилиарной мышцы. Повышенный уровень аберраций, связанных с наклоном хрусталика, его смещением, децентрацией оптических элементов глаза, может свидетельствовать о слабом натяжении связок (возможно, связанном с избыточным тонусом цилиарной мышцы). Это подтверждается и при циклоплегии: изменение тонуса цилиарной мышцы, натяжения цинновых связок и положения хрусталика при миопии недостаточны для существенных изменений волнового фронта [33].

Помимо аккомодации и центрального дефокуса, роль аберраций велика и в формировании периферического ретинального дефокуса. По ряду

сообщений, положительная СА способствует формированию относительной периферической миопии, а отрицательная — гиперметропии. Не только экспериментальные, но и клинические наблюдения убедительно показывают тормозящее влияние миопического дефокуса на процесс прогрессирования близорукости [34].

Перечисленные факты объясняют повышенный интерес к изучению волнового фронта глаза, отмечаемый в научной литературе последних лет. Роль aberrаций в постнатальном рефрактогенезе представляется несомненной, однако результаты многочисленных исследований неоднозначны. Связь общего уровня aberrаций с рефракцией, прогрессированием близорукости, отставанием аккомодации подтверждается в одних работах и не находит подтверждения в других.

ЦЕЛЬЮ настоящей работы явился сравнительный анализ уровня aberrаций, структуры волнового фронта, его реакции на циклоплегию у детей с различной рефракцией до и через год после регулярных занятий спортом (бадминтоном).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Обследовано 40 детей (80 глаз) в возрасте от 7 до 11 лет (в среднем $9,24 \pm 1,06$ года) с аномалией рефракции от $+6,63$ до $-6,75$ дптр (в среднем $-1,28 \pm 2,28$ дптр), из них с миопией 34 ребенка (67 глаз), в том числе слабой степени — 26 детей (51 глаз), средней — 6 детей (12 глаз), высокой — 2 ребенка (4 глаза), с гиперметропией и эмметропией — 7 детей (13 глаз) соответственно. Из общего числа участников исследования была выделена группа со спазмом аккомодации (СпА) и привычно-избыточным напряжением аккомодации (ПИНА): 11 детей (20 глаз), из них с миопией 4 ребенка (7 глаз), с гиперметропией — 3 ребенка (6 глаз) и эмметропией — 4 ребенка (7 глаз). Через 6 мес занятий бадминтоном обследовано 38 детей (76 глаз). Через год обследовано 27 детей (54 глаза) в возрасте от 8 до 12 лет (в среднем $9,42 \pm 1,10$ года) с различной рефракцией (в среднем $-1,62 \pm 1,81$ дптр), из них с миопией — 23 ребенка (46 глаз): слабой степени — 19 детей (37 глаз), средней — 4 ребенка (7 глаз), высокой — 1 ребенок (2 глаза), а также с гиперметропией и эмметропией — 4 ребенка (8 глаз), и выделена группа пациентов (7 детей, 14 глаз) со СпА и ПИНА, имеющих миопию (3 ребенка, 6 глаз), гиперметропию (2 ребенка, 4 глаза) и эмметропию (2 ребенка, 4 глаза). Всем пациентам проводили aberрометрию волнового фронта в затемненной комнате до и после медикаментозной циклоплегии (применяли 1 % циклопентолат дегидрохлорид дважды, с интервалом 10 мин, aberрометрию проводили через 40 мин после первого закапывания) на aberрометре OPD-Scan III (Nidek). Поскольку действие циклоплектиков сопровождается и мидриазом, увеличивающим уровень многих aberrаций, мы проводили анализ волно-

вого фронта до и после инстилляций циклопентолата при фиксированной ширине зрачка, чтобы оценить влияние на него только циклоплегии, а не мидриаза. Aberrации анализировали при ширине зрачка 3 мм как без циклоплегии, так и в условиях циклоплегии (в последнем случае — с помощью выбора 3-мм зоны). Анализировали коэффициенты Цернике до 12-го порядка включительно: вертикальный и горизонтальный наклон (tilt 1, tilt 2), вертикальный и горизонтальный трейфол (trefoil 6, trefoil 9), вертикальную и горизонтальную кому (coma 7, coma 8), СА и RMS.

Занятия бадминтоном проводились по методике В.И. Турманидзе [35].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показывает анализ таблиц 1–4, при миопии и гиперметропии выявляются достоверные различия следующих aberrаций: СА, tilt 1, tilt 2, trefoil 9, coma 7 при миопии достоверно выше, а coma 8 — достоверно (в 10 раз) ниже, чем при гиперметропии. СА при миопии имеет отрицательные значения, а при гиперметропии — положительные.

Реакция на циклоплегию также весьма характерна. СА и при миопии, и при гиперметропии показывала сдвиг в сторону положительных значений: в первом случае в 2 раза уменьшалась отрицательная СА, во втором — увеличивалась положительная. При спазме и ПИНА положительная СА увеличивалась в 5 раз! Эти изменения укладываются в изменения формы хрусталика под циклоплегией — его уплощение со снижением преломляющей силы центральных отделов (см. табл. 2).

Наклон волнового фронта (tilt 1, tilt 2) в глазах с гиперметропией под циклоплегией снижался (tilt 2 в 25 раз!), а при миопии уменьшался недостоверно (в 1,5 раза) или даже увеличивался. Trefoil 9 при гиперметропии под циклоплегией увеличивался в 5 раз, а при миопии не изменялся (см. табл. 1–3).

Указанные изменения в ответ на циклоплегию перечисленных aberrаций, связанных с наклоном волнового фронта, согласуются с описанными нами ранее и укладываются в предложенное объяснение [33]. Натяжение цинновых связок под действием циклоплектика в глазах с гиперметропией достаточно для изменения формы и положения хрусталика, а при миопии — недостаточно, что, очевидно, вызвано слабостью связочного аппарата и/или привычным гипертонусом цилиарной мышцы.

Изменения волнового фронта в ответ на циклоплегию в глазах с ПИНА и спазмом аккомодации были неоднозначны. Сферическая aberrация и tilt 1 вели себя так же, как в глазах с гиперметропией (каковыми они в среднем и являлись): т. е. первая увеличивалась в 5 раз в сторону положительных значений (в соответствии с уплощением хрусталика), а второй снижался (см. табл. 1, 2).

Таблица 1. Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией до и после занятий бадминтоном: RMS и tilt 1 ($M \pm \sigma$)
Table 1. Wavefront structure in children with different refraction before and after badminton classes: RMS and tilt 1 ($M \pm \sigma$)

Рефракция Refraction	RMS						Tilt 1					
	до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year		до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year	
	до цикло- плетгии before cycloplegia	после цикло- плетгии after cycloplegia										
В среднем по группе Averaging over the group n = 54	0,1788 ± 0,1000	0,19833 ± 0,10000	0,23178 ± 0,15000	0,19167 ± 0,09000	0,08621 ± 0,03000	0,08164 ± 0,03000	0,00839 ± 0,03000	0,0091 ± 0,0600	0,0125 ± 0,0600	0,0096 ± 0,0600	0,0146 ± 0,0600	0,0184 ± 0,0600
Миопия Myopia n = 46	0,1822 ± 0,1000	0,19545 ± 0,11000	0,22764 ± 0,15000	0,195 ± 0,090	0,08187 ± 0,03000	0,081 ± 0,030	0,011834 ± 0,060000*	0,0149 ± 0,0600*	0,0182 ± 0,0600*	0,0202 ± 0,0600*	0,0219 ± 0,0500*	0,0167 ± 0,0600*
Миопия слабой степени Low myopia n = 37	0,1631 ± 0,0800	0,18343 ± 0,08000	0,22389 ± 0,17000	0,18257 ± 0,08000	0,08187 ± 0,03000	0,081 ± 0,020	0,0186 ± 0,0600*	0,0134 ± 0,0600*	0,015 ± 0,060*	0,0189 ± 0,0500*	0,0219 ± 0,0600*	0,0167 ± 0,0500*
Миопия средней степени Moderate myopia n = 7	0,2943 ± 0,1500	0,28857 ± 0,16000	0,25143 ± 0,08000	0,27143 ± 0,13000	0,079 ± 0,030	0,08333 ± 0,03000	0,03486 ± 0,05000*	0,0247 ± 0,0700*	0,0304 ± 0,0900*	0,0264 ± 0,0800*	0,0062 ± 0,0600*	0,0033 ± 0,0600*
Миопия высокой степени High myopia n = 2	0,125 ± 0,050	0,08 ± 0,03	0,21 ± 0,10	0,145 ± 0,060	0,0465 ± 0,0100	0,066 ± 0,000	-0,044 ± 0,030	0,007 ± 0,010	0,032 ± 0,010*	0,021 ± 0,100*	0,015 ± 0,010*	0,0135 ± 0,0700*
Гипер- метропия и эметро- пия Hyperopia and emmetropia n = 8	0,20 ± 0,08	0,25 ± 0,05	0,22 ± 0,03	0,23 ± 0,10	0,068 ± 0,020	0,0735 ± 0,0200	-0,0528 ± 0,0400	-0,0423 ± 0,0600	-0,0383 ± 0,0400	-0,049 ± 0,060	-0,059 ± 0,040	-0,0428 ± 0,0700
Спазм и ПИНА Spasm and seudomyopia n = 14	0,1613 ± 0,0900	0,18615 ± 0,0500	0,23 ± 0,14	0,14923 ± 0,05000	0,13 ± 0,04	0,08767 ± 0,02000	-0,0134 ± 0,0300	0,005 ± 0,040	-0,0069 ± 0,0500	-0,0169 ± 0,0300	0,019 ± 0,040	0,0427 ± 0,0600

Примечание. n — количество глаз; * — $p < 0,05$ — достоверно относительно показателей показателей гиперметропии и эметропии.
Note. n — number of eyes; * — $p < 0,05$ — significant with respect to patients with hyperopia and emmetropia.

Таблица 2. Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией до и после занятий бадминтоном: tilt 2 и сферические аберрации ($M \pm \sigma$)
Table 2. Wavefront structure in children with different refraction before and after badminton classes: tilt 2 and spherical aberrations ($M \pm \sigma$)

Рефракция Refraction	Tilt 2						CA Sph					
	до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year		до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year	
	до цикло- плетии before cycloplegia	после цикло- плетии after cycloplegia										
В среднем по группе Averaging over the group n = 54	0,0306 ± 0,2900	0,0217 ± 0,2900	-0,0157 ± 0,0400	-0,0139 ± 0,0400	-0,0269 ± 0,0400	-0,0198 ± 0,1400	-0,00926 ± 0,15000	0,003019 ± 0,010000	0,021981 ± 0,050000	0,002458 ± 0,040000	0,001071 ± 0,050000	
Миопия Myopia n = 46	0,0383 ± 0,3200*	0,0263 ± 0,3200*	-0,0174 ± 0,0400	-0,0185 ± 0,0400*	-0,0172 ± 0,0400	-0,02545 ± 0,16000*	-0,01405 ± 0,16000*	0,00175 ± 0,01000	0,013977 ± 0,040000	-0,00253 ± 0,04000*	0,001333 ± 0,05000	
Миопия слабой степени Low myopia n = 37	-0,0031 ± 0,0400	-0,0169 ± 0,0400*	-0,0139 ± 0,0400	-0,0096 ± 0,0400	-0,0172 ± 0,0300	-0,0022 ± 0,0100*	0,0122 ± 0,0400	0,001857 ± 0,010000	0,013971 ± 0,050000	-0,00253 ± 0,04000*	0,001333 ± 0,050000	
Миопия средней степени Moderate myopia n = 7	0,2703 ± 0,800*	0,242 ± 0,820*	-0,0247 ± 0,0300	-0,0554 ± 0,0600	-0,0703 ± 0,0600	-0,14814 ± 0,40000*	-0,14914 ± 0,40000*	0,001571 ± 0,010000	0,018143 ± 0,020000	0,0182 ± 0,0400	-0,004 ± 0,040	
Миопия высокой степени High myopia n = 2	-0,0495 ± 0,0100	-0,0525 ± 0,0100	-0,0085 ± 0,0900	0,027 ± 0,020	-0,032 ± 0,030	-0,003 ± 0,010*	-0,0005 ± 0,0100*	0,0005 ± 0,0100	-0,0005 ± 0,0100	-0,0155 ± 0,0100	-0,037 ± 0,030	
Гиперметропия и эмметропия Hyperopia and emmetropia n = 8	-0,002 ± 0,030	-0,0008 ± 0,0500**	-0,0028 ± 0,0200	-0,0002 ± 0,0400**	0,0073 ± 0,0300**	0,00725 ± 0,01000	0,025 ± 0,020**	0,0075 ± 0,0100	0,0445 ± 0,0400**	0,0035 ± 0,0100	0,01075 ± 0,01000**	
Спазм и ПИНА Spasm and pseudomyopia n = 14	0,0049 ± 0,0400	0,0022 ± 0,0400	-0,0045 ± 0,0300	0,0067 ± 0,0300	-0,0110 ± 0,0300	0,004 ± 0,010	0,023077 ± 0,050000**	0,006385 ± 0,010000	0,060923 ± 0,090000**	0,0596 ± 0,0700	0,003333 ± 0,08000**	

Примечание. n — количество глаз; * — $p < 0,05$ — достоверно относительно показателей у пациентов с гиперметропией и эмметропией; ** — $p < 0,05$ — достоверно относительно показателей до циклоплетии.

Note. n — number of eyes; * — $p < 0.05$ — significant with respect to patients with hyperopia and emmetropia; ** — $p < 0.05$ — significant with respect to parameters before cycloplegia.

Таблица 3. Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией до и после занятий бадминтоном: trefoil 6 и trefoil 9 (M ± σ)
Table 3. Wavefront structure in children with different refraction before and after badminton classes: trefoil 6 and trefoil 9 (M ± σ)

Рефракция Refraction	Тrefoil 6						Тrefoil 9					
	до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year		до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year	
	до цикло- плетии before cycloplegia	после цикло- плетии after cycloplegia										
В среднем по группе Averaging over the group n = 54	-0,0274 ± 0,0500	-0,02376 ± 0,04000	-0,031 ± 0,060	-0,0118 ± 0,0400	-0,01813 ± 0,04000	-0,02093 ± 0,04000	0,023593 ± 0,260000	-0,00407 ± 0,03000	-0,00419 ± 0,03000	-0,01167 ± 0,03000	0,002571 ± 0,030000	
Миопия Myopia n = 46	-0,0259 ± 0,0500	-0,0208 ± 0,0400	-0,02607 ± 0,05000	-0,01075 ± 0,04000	-0,01753 ± 0,04000	-0,023 ± 0,040	0,034205 ± 0,280000	0,000864 ± 0,030000	-0,00132 ± 0,03000	-0,00187 ± 0,03000	0,005333 ± 0,030000	
Миопия слабой степени Low myopia n = 37	-0,0323 ± 0,0500	-0,02437 ± 0,04000	-0,03071 ± 0,05000	-0,01651 ± 0,04000	-0,01753 ± 0,04000	-0,023 ± 0,040	-0,01023 ± 0,03000	-0,00177 ± 0,03000	-0,00077 ± 0,020000*	-0,00187 ± 0,03000	0,005333 ± 0,030000*	
Миопия средней степени Moderate myopia n = 7	-0,0039 ± 0,0500	-0,00957 ± 0,06000	-0,00814 ± 0,05000	0,022143 ± 0,030000	-0,0086 ± 0,0500	0,000333 ± 0,040000	0,258571 ± 0,700000	-0,00014 ± 0,020000	0,000714 ± 0,060000*	-0,0256 ± 0,0400	0,006667 ± 0,050000*	
Миопия высокой степени High myopia n = 2	0,0085 ± 0,0100	0,0025 ± 0,0100*	-0,0075 ± 0,0400	-0,025 ± 0,010	-0,009 ± 0,020	0,0015 ± 0,0600	0,0265 ± 0,0400	0,0505 ± 0,0200*	-0,018 ± 0,020	-0,0065 ± 0,0100	-0,0055 ± 0,0300	
Гипер- метропия и эметро- пия Hyperopia and emmetropia n = 8	-0,0353 ± 0,0100	-0,04025 ± 0,04000	-0,03725 ± 0,02000	-0,0345 ± 0,0200	-0,036 ± 0,030	-0,04675 ± 0,02000	-0,00875 ± 0,04000	-0,0175 ± 0,0300	-0,01275 ± 0,01000	-0,0145 ± 0,0300	-0,0145 ± 0,0400	
Спазм и ПИНА Spasm and pseudomyopia n = 14	-0,0236 ± 0,0400	-0,03154 ± 0,04000	-0,03469 ± 0,07000	-0,00538 ± 0,03000	-0,00467 ± 0,04000	-0,003 ± 0,050	-0,01769 ± 0,04000	-0,01646 ± 0,04000	-0,00492 ± 0,03000	-0,0347 ± 0,0400	0,002667 ± 0,030000	

Примечание. n — количество глаз; * — p < 0,05 — достоверно относительно показателей у пациентов с гиперметропией и эметропией.
Note. n — number of eyes; * — p < 0.05 — significant with respect to patients with hyperopia and emmetropia.

Таблица 4. Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией до и после занятий бадминтоном: сома 7 и сома 8 (M ± σ)
Table 4. Wavefront structure in children with different refraction before and after badminton classes: сома 7 and сома 8 (M ± σ)

Рефракция Refraction	Сомма 7						Сомма 8						
	до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year		до before		через 6 мес after 6 months		через 1 год after 1 year		
	до цикло- плетии before cycloplegia	после цикло- плетии after cycloplegia											
В среднем по группе Averaging over the group n = 54	0,001407 ± 0,020000	0,002963 ± 0,020000	0,005481 ± 0,020000	0,006389 ± 0,030000	0,008214 ± 0,020000	0,005792 ± 0,020000	0,008214 ± 0,020000	-0,00015 ± 0,020000	-0,00222 ± 0,030000	-0,00481 ± 0,010000	-0,00256 ± 0,010000	-0,00329 ± 0,020000	-0,00793 ± 0,010000
Миопия Myopia n = 46	0,004023 ± 0,020000*	0,004545 ± 0,020000*	0,006977 ± 0,020000*	0,009795 ± 0,030000*	0,008533 ± 0,020000*	0,008533 ± 0,020000*	0,007556 ± 0,020000*	0,000205 ± 0,030000	-0,00236 ± 0,030000	-0,0052 ± 0,010000	-0,00348 ± 0,010000*	-0,005 ± 0,020000	-0,005 ± 0,010000
Миопия слабой степени Low myopia n = 37	0,004343 ± 0,010000*	0,004457 ± 0,020000*	0,006657 ± 0,010000*	0,0064 ± 0,0200*	0,008533 ± 0,020000*	0,008533 ± 0,020000*	0,007556 ± 0,020000*	-0,0018 ± 0,010000	-0,00509 ± 0,010000	-0,00429 ± 0,010000	-0,00197 ± 0,010000	-0,005 ± 0,010000	-0,005 ± 0,010000
Миопия средней степени Moderate myopia n = 7	0,007714 ± 0,020000*	0,004857 ± 0,020000*	0,007571 ± 0,030000*	0,027143 ± 0,070000*	0,0018 ± 0,0100*	0,0018 ± 0,0100*	0,001 ± 0,020*	0,014714 ± 0,060000*	0,008714 ± 0,070000*	-0,00714 ± 0,010000	-0,00843 ± 0,010000	-0,0004 ± 0,020000	-0,02133 ± 0,030000
Миопия высокой степени High myopia n = 2	-0,0145 ± 0,0100	0,005 ± 0,000*	0,0105 ± 0,0100*	0,0085 ± 0,0300*	0,007 ± 0,020*	0,007 ± 0,000*	0,007 ± 0,020*	-0,0155 ± 0,0100	0,0065 ± 0,0100	-0,0145 ± 0,0300	-0,0125 ± 0,0100	-0,0035 ± 0,0200	-0,008 ± 0,0100
Гипер- метропия и эметропия Hyperopia and emmetropia n = 8	-0,0185 ± 0,0100	-0,0145 ± 0,0200	-0,01325 ± 0,02000	-0,014 ± 0,020	-0,01025 ± 0,02000	-0,02 ± 0,02	-0,01025 ± 0,02000	-0,00225 ± 0,01000	-0,00375 ± 0,02000	-0,0015 ± 0,01000	0,00025 ± 0,01000	0,0045 ± 0,01000	0,00125 ± 0,01000
Спазм и ПИНА Spasm and pseudomyopia n = 14	-0,00369 ± 0,01000	0,002385 ± 0,010000	0,000308 ± 0,020000	-0,00185 ± 0,010000	0,008667 ± 0,010000	0,008667 ± 0,010000	0,015 ± 0,020	0,001154 ± 0,010000	0,000231 ± 0,010000	-0,00108 ± 0,010000	0,001538 ± 0,010000	-0,00207 ± 0,020000	-0,00333 ± 0,010000

Примечание. n — количество глаз; * — p < 0,05 — достоверно относительно показателей у пациентов с гиперметропией и эметропией.
Note. n — number of eyes; * — p < 0.05 — significant with respect to patients with hyperopia and emmetropia.

Tilt 2, trefoil 6, trefoil 9 достоверно не изменялись в ответ на циклоплегию (табл. 1–3).

Сoma 7 у пациентов с ПИНА и спазмом, как и при гиперметропии, имела отрицательные значения (при миопии — положительные), а после циклоплегии увеличивалась в 8 раз с переходом в положительные значения (во всех остальных группах — не изменялась) (см. табл. 4).

Значения сoma 8 при ПИНА также соответствовали таковым при гиперметропии, а после циклоплегии снижались более значительно, чем в других группах, — в 4,5 раза (при гиперметропии — в 1,5 раза, при миопии — в 3,5 раза) (см. табл. 4).

В целом можно сказать, что структура волнового фронта глаза при ПИНА и спазме аккомодации соответствовала истинной рефракции этих глаз, т. е. гиперметропии. В то же время реакция волнового фронта на циклоплегию в этих глазах отличалась от реакции и миопических, и гиперметропических глаз.

После регулярных занятий бадминтоном произошли достоверные изменения значений ряда aberrаций волнового фронта глаза. Так, суммарные aberrации (RMS) через 6 мес занятий достоверно не изменились, а через год снизились во всех группах, что позволяет говорить об улучшении качества зрения. SA при миопии через 6 мес снизилась в 20 раз и перешла в положительные значения, т. е. приблизилась к состоянию глаз с гиперметропией. Через год сохранялось уменьшение уровня SA в 10 раз по сравнению с исходным (см. табл. 1).

Изменения tilt 1 носили непостоянный характер, и к году занятий значения вернулись к исходному уровню. Tilt 2 через 6 мес при миопии уменьшился в 2,5 раза с сохранением этих значений через год. При гиперметропии tilt 2 через 6 мес не изменился, а через год резко увеличился с переходом в положительные значения. При ПИНА и спазме tilt 2 уменьшился в течение года, однако реакция на циклоплегию была парадоксальной: он увеличивался в 25 раз (см. табл. 1, 2).

Trefoil 6 не изменился в течение года при гиперметропии и снизился в 1,7 раза при миопии с появлением реакции на циклоплегию (показатель после циклоплегии снижался в 2 раза). Еще более выраженная реакция на циклоплегию появилась через 6 мес в группе с ПИНА и спазмом: trefoil 6 снизился в 5 раз. Через год в этой группе уровень этой aberrации снизился в 4,5 раза по сравнению с исходным (см. табл. 3).

Trefoil 9 в глазах с миопией через полгода занятий снизился в 12 раз с появлением отсутствовавшей ранее реакции на циклоплегию. Эти изменения сохранились и через год. При спазме и ПИНА данные aberrации в течение года увеличились, однако появилась реакция на циклоплегию, аналогичная таковой при миопии: отмечено увеличение в 5 раз с переходом из отрицательных в положительные значения (см. табл. 3).

Достоверных изменений сoma 7 в естественных условиях через 6 мес не отмечено ни в одной группе. Только при ПИНА и спазме появилась реакция на циклоплегию в виде увеличения сoma 7 в 6 раз с переходом из положительных значений в отрицательные. Через год в этой группе значения сoma 7 повысились в 3 раза по отношению к исходным. При гиперметропии изменений не отмечено ни до, ни после циклоплегии (см. табл. 4).

Значения сoma 8 в течение года у пациентов с миопией, ПИНА и спазмом еще больше снизились с переходом в отрицательные; реакция на циклоплегию при этом отсутствовала. В глазах с гиперметропией динамика aberrаций сoma 8 была противоположной: их уровень еще повысился с переходом в положительные значения; реакция на циклоплегию была выраженной: снижение в 3,5 раза (см. табл. 4).

Таким образом, на фоне регулярных занятий бадминтоном в глазах с миопией, ПИНА и спазмом произошли достоверные изменения aberrаций волнового фронта, которые можно связать с укреплением связочного аппарата хрусталика и нормализацией тонуса цилиарной мышцы. Это прежде всего сдвиг сферических aberrаций из отрицательных (когда центр оптической системы преломляет сильнее, чем периферия) в положительные значения (периферия преломляет сильнее центра). Такой эффект однозначно свидетельствует об уплощении хрусталика, что, в свою очередь, связано с устранением гипертонуса цилиарной мышцы и повышением натяжения цинновых связок.

Уменьшение наклона волнового фронта (tilt 2), вертикального и горизонтального трейфоила и горизонтальной комы (сoma 8), т. е. aberrаций, связанных с несогласованием и иррегулярностью элементов оптической системы, также можно отнести на счет укрепления связочного аппарата хрусталика. Еще в большей мере об этом свидетельствует появление отсутствовавшей ранее реакции на циклоплегию, а именно изменений волнового фронта при натяжении цинновых связок под действием циклоплегических средств (см. табл. 2–4).

ВЫВОДЫ

1. Структура волнового фронта у детей с различной рефракцией достоверно различается: SA при миопии отрицательная, при гиперметропии положительная; tilt 1, tilt 2, trefoil 9, сoma 7 при миопии достоверно выше, а сoma 8 — достоверно ниже, чем при гиперметропии.

2. Наклон волнового фронта (tilt 1, tilt 2) в условиях циклоплегии достоверно снижается в гиперметропических глазах и не изменяется в миопических. Последнее свидетельствует о недостаточном натяжении цинновых связок.

3. На фоне регулярных занятий бадминтоном выявлены достоверные изменения aberrаций волнового фронта, свидетельствующие об укреплении связочного аппарата хрусталика и нормализации тонуса цилиарной мышцы.

Литература/References

1. *Катаргина Л.А., Тарутта Е.П.* Медико-социальное значение нарушений аккомодации. Аккомодация: руководство для врачей. Москва: Апрель; 2012: 9–12.
Katargina L.A., Tarutta E.P. Medical-social significance of the disorders of accommodation: Accommodation: a guide for physicians. Moscow: April; 2012: 9–12 (in Russian).
2. *Jonas J.B., Xu L., Wei W.B., Wang Y.X., et al.* Myopia in China: a population-based cross-sectional, histological, and experimental study. *Lancet*. 2016; 388 (Oct. Suppl 1): S20. doi: 10.1016/S0140-6736(16)31947-X
3. *Matamoros E., Ingrand P., Pelen F., et al.* Prevalence of myopia in France: a cross-sectional analysis. *Medicine*. 2015; 94 (45 November). doi: 0.1097/MD.0000000000001976
4. *McCullough S.J., O'Donoghue L., Saunders K.J.* Six year refractive change among white children and young adults: evidence for significant increase in myopia among white UK Children. *PLoS ONE*. 2016; 11(1): e0146332. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146332>
5. *Williams K.M., Verhoeven V.J.M., Cumberland P., et al.* Prevalence of refractive error in Europe: the European Eye Epidemiology (E³) Consortium. *Eur. J. Epidemiol.* 2015; 30 (4): 305–15. doi: 10.1007/s10654-015-0010-0
6. *Дашевский А.И.* Новые методы изучения оптической системы глаза и развития его рефракции. Киев; 1956.
Dashevsky A.I. New methods of studying the optical system of the eye and the development of its refraction. Kiev; 1956 (in Russian).
7. *Ястребцева Т.А., Чупров А.Д., Плотникова Ю.А.* Показатели общей, церебральной и регионарной гемодинамики у школьников 13–15 лет с миопией. *Вестник офтальмологии*. 2002; 5: 12–5.
Yastrebtseva T.A., Chuprov A.D., Plotnikova Yu.A. Indicators of general, cerebral and regional hemodynamics in schoolchildren 13–15 years with myopia. *Vestnik oftal'mologii*. 2002; 5: 12–5 (in Russian).
8. *Theagarayan B., Radhakrishnan H., Allen P.M., Calver R.I., Rae S.M.* The effect of altering spherical aberration on the static accommodative response. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2009; 29 (1): 65–71. doi.org/10.1111/j.1475-1313.2008.00610.x
9. *Allen P.M., Radhakrishnan H., Rae S., Calver R.I., Theagarayan B.P.* Aberration control and vision training as an effective means of improving accommodation in individuals with myopia. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2009; 50: 5120–9. doi: 10.1167/iops.08-2865
10. *Collins M.J., Wildsoet C.F.* Optical treatment method. Australia: Queensland University of technology. Brisbane (Australia); 2000.
11. *Buehren T., Collins M.J.* Accommodation stimulus-response function and retinal image quality. *Vision Research*. 2006; 46 (10): 1633–45. doi.org/10.1016/j.visres.2005.06.009
12. *Zhang N., Yang X., Zhang W., Liu L., Dong G.* Relationship between higher-order aberrations and myopia progression in schoolchildren. A retrospective study. *Int. J. Ophthalmol.* 2013 18; 6 (3): 295–9. doi: 10.3980/j.issn.2222-3959.2013.03.07
13. *He J.C., Sun P., Held R., et al.* Wave-front aberrations in eyes of emmetropic and moderately myopic schoolchildren and young adults. *Vis. Res.* 2002; 42: 1063–70. doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00035-4
14. *Zadok D., Levy Y., Segal O., et al.* Ocular higher-order aberrations in myopia and skiascopic wavefront repeatability. *J. Cataract. Refract. Surg.* 2005; 31 (June): 1128–32. doi.org/10.1016/j.jcrs.2004.10.075
15. *Kirwan C., O'Keffe M., Soeldner H.* Higher-order aberrations in children. *Am. J. Ophthalmol.* 2006; 141 (1 Jan.): 67–70. doi.org/10.1016/j.ajo.2005.08.031
16. *Philip K., Sankaridurg P., Holden B., Ho A., Mitchell P.* Influence of higher-order aberrations and retinal image quality in myopisation of emmetropic eyes. *Vision Research*. 2014; 105: 233–43.
17. *Hartwig A., Atchison D. A., Radhakrishnan H.* Higher-order aberrations and anisometropia. *Curr. Eye Res.* 2013; 38 (1): 215–29. doi: 10.3341/kjo.2014.28.1.66
18. *Paquin M. P., Hamam H., Simonet P.* Objective measurement of optical aberrations in myopic eyes. *Optometry and Vision Science*. 2002; 79: 285–91.
19. *He J.C., Sun P., Held R., Thorn F.* Wavefront aberrations in eyes of emmetropic and moderately myopic schoolchildren and young adults. *Vis. Research*. 2002; 42: 1063–1070. doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00035-4
20. *Kwan W. C., Yip S. P., Yap M. K.* Monochromatic aberrations of the human eye and myopia. *Clinical and Experimental Optometry*. 2009; 92 (3): 304–12. doi:10.1111/j.1444-0938.2009.00378.x
21. *Carkeet A., Luo H. D., Tong L., Saw S. M., Tan D.* Refractive error and monochromatic aberrations in Singaporean children. *Vision Research*. 2002; 42 (14): 1809–24. doi.org/10.1016/S0042-6989(02)00114-1
22. *Marcos S., Barbero S., Llorente L.* The sources of optical aberrations in myopic eyes. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2002; 43 (13 Dec.): 1510.
23. *Martinez A. A., Sankaridurg P. R., Naduvilath T. J., Mitchell P.* Monochromatic aberrations in hyperopic and emmetropic children. *Journal of Vision*. 2009; 9 (1): 21–14. doi: 10.1167/9.1.23
24. *Thapa D., Fleck A., Lakshminarayanan V., Bobier W. R.* Ocular wavefront aberration and refractive error in pre-school children. *Journal of Modern Optics*. 2011 Nov; 58 (19–20): 1681–19. doi: 10.1080/09500340.2011.564316
25. *Atchison D. A., Lucas S. D., Ashman R., et al.* Refraction and aberration across the horizontal central 10 degrees of the visual field. *Optom. Vis. Sci.* 2006 Apr; 83 (4): 213–21. doi:10.1097/01.opx.0000214382.75847.c4
26. *Cheng H., Barnett J. K., Vilupuru A. S., et al.* A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J. Vis.* 2004; 4: 272–80. <https://doi.org/10.1167/4.4.3>
27. *Bao J., Le R., Wu J., et al.* Higher-order wavefront aberrations for populations of young emmetropes and myopes. *J. Optom.* 2009; 2 (1): 51–8. doi: 10.3921/joptom.2009.51
28. *Porter J., Guirao A., Cox I. G., Williams D. R.* The human eye's monochromatic aberrations in a large population. *J. Opt. Soc. Am.* 2001; A18: 1793–803. doi.org/10.1364/JOSAA.18.001793
29. *Gilmartin B.* A review of the role of sympathetic innervations of the ciliary muscle in ocular accommodation. *Ophthalmic. Physiol. Opt.* 1986; 6 (1): 23–37.
30. *He J. C., Burns S. A., Marcos S.* Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res.* 2000; 40 (1): 41–8. doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00156-X
31. *Hiraoka T., Miyata K., Nakamura Y., et al.* Influences of cycloplegia with topical atropine on ocular higher-order aberrations. *Ophthalmology*. 2013; 120 (1): 8–13. doi: 10.1016/j.ophtha.2012.07.057
32. *Carkeet A., Velaedan S., Tan Y. K., Lee D. Y., Tan D. T.* Higher order ocular aberrations after cycloplegic and non-cycloplegic pupil dilation. *J. Refract. Surg.* 2003; 19 (3): 316–20. doi.org/10.3928/1081-597X-20030501-08
33. *Тарутта Е.П., Арутюнян С.Г., Смирнова Т.С.* Аберрации волнового фронта у детей с миопией и гиперметропией до и после циклоплегии. *Российский офтальмологический журнал*. 2017; 10 (3): 78–83. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2017-10-3-78-83>
Tarutta E. P., Arutyunyan S. G., Smirnova T. S. Wavefront aberrations in children with myopia and hyperopia before and after cycloplegia. *Russian ophthalmological journal*. 2017; 10 (3): 78–83 (in Russian). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2017-10-3-78-83>
34. *Tarutta E., Khodzhabekeyan N., Filinova O., Milash S., Kruzhkova G.* Long-term effects of optical defocus on eye growth and refractogenesis. *Pomeranian J. Life Sci.* 2016; 62 (1): 25–30.
35. *Turmanidze V. G., Tarutta E. P., Shakrai S. M.* Badminton against myopia. *Instructional Manual*. Moscow: Kuchkovo Pole Publishers. 2017.

Поступила: 07.02.2019

Принята к печати: 09.04.2019

Для контактов: Наталья Алексеевна Тарасова
E-mail: tar221@yandex.ru