

УДК 612.843.74+617.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПРИЯТИЯ ОБЪЕМНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФИГУР ИЗ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ИХ ДВУХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ У ДЕТЕЙ С ОФТАЛЬМОПАТОЛОГИЕЙ

© 2023 г. С. И. Рычкова^{1, 2, *}, Р. И. Сандимиров³

¹ФГБУН Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича РАН, Москва, Россия

²Медико-биологический университет инноваций и непрерывного образования ФГБУ «Государственный научный центр РФ – Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна» ФМБА РФ, Москва, Россия

³ФГАОУ ВО Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова МЗ РФ, Москва, Россия

*E-mail: lana.rych@mail.ru

Поступила в редакцию 22.01.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Проявления иллюзии трехмерной структуры, появляющейся при вращении плоской проекции трехмерного объекта (*structure from motion (SfM)*) были исследованы в трех группах детей в возрасте от 7 до 17 лет: 1) 40 детей контрольной группы с ортотропией, нормальным состоянием зрительных функций (в том числе бинокулярного и стереозрения) и глазного дна; 2) 33 ребенка с содружественным (непаралитическим) косоглазием и нормальным состоянием глазного дна; 3) 50 детей с косоглазием на фоне врожденной частичной атрофии зрительного нерва (ЧАЗН). В качестве тестового изображения использовали фигуру шестиугольника с диагоналями, проходящими через его центр, предъявляемого в бинокулярных и монокулярных условиях наблюдения в виде неподвижного изображения, и при его вращении со скоростью 5, 10, 15, 20, 30, 40 об./мин (*rpt*). Было показано, что восприятие объемной структуры в виде куба возможно при неподвижном предъявлении тестового изображения у 2–3% детей как контрольной группы, так и групп детей с косоглазием в бинокулярных и в монокулярных условиях наблюдения. При вращении тестового изображения как в бинокулярных, так и в монокулярных условиях наблюдения, количество детей, воспринимавших куб, во всех группах увеличивалось при повышении скорости вращения изображения, достигало максимальных значений при 15–30 об./мин и значительно снижалось при 40 об./мин. В контрольной группе при переходе от бинокулярных условий наблюдения к монокулярным существенно увеличивается количество детей, воспринимающих изображение как куб, при скоростях вращения 5 об./мин ($p = 0.023$), 10 об./мин ($p = 0.005$), 20 об./мин ($p = 0.002$) и 30 об./мин ($p = 0.001$). В группах детей с косоглазием (как на фоне нормального глазного дна, так и на фоне ЧАЗН) бинокулярные и монокулярные показатели были статистически сопоставимы ($p > 0.05$). Сравнение показателей в разных группах демонстрировало большее количество детей, воспринимающих объемную фигуру в контрольной группе, чем в обеих группах детей с косоглазием при некоторых скоростях вращения тестового изображения (от 10 до 20 об./мин). В группах детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна и детей с косоглазием на фоне ЧАЗН бинокулярные и монокулярные показатели статистически сопоставимы для всех скоростей вращения изображения. Не было выявлено достоверной зависимости характера восприятия тестового изображения от возраста во всех исследуемых группах детей. Таким образом, наряду с общими закономерностями проявлений *SfM* у детей исследуемых групп, выявлены различия, обусловленные характером взаимодействия монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного восприятия в норме и при офтальмопатологии. Таким образом, исследование *SfM* может использоваться для оценки эффектов глубины и силовых отношений монокулярного и бинокулярного механизмов пространственного восприятия в норме и при офтальмопатологии.

Ключевые слова: структура из движения, косоглазие, амблиопия, эффект глубины.

DOI: 10.31857/S0131164623600040, **EDN:** WZLERA

Пространственное зрительное восприятие является сложным процессом, включающим анализ

отдельных признаков зрительного сигнала, создание адекватных гипотез о характере стимула,

отнесение его к определенной категории, сравнение с имеющимся внутренним эталоном экстраперсонального пространства и схемой тела [1–7].

Физиологическую основу пространственного восприятия чаще связывают с бинокулярной системой, интегрирующей сигналы, поступающие в мозг от каждого глаза в единый образ трехмерного внешнего мира. При этом сигналы от объектов, попадающих в зону бинокулярного поля зрения (составляющего примерно 120° по горизонтали), приходят в соседние колонки глазодоминантности зрительной коры и затем к бинокулярным нейронам каждого полушария. Идентичными (корреспондирующими) элементами являются центральные ямки сетчатки обоих глаз, а также зоны сетчатки, расположенные симметрично по отношению к центральным ямкам (элементы назальной сетчатки одного глаза являются корреспондирующими по отношению к элементам височной половины сетчатки парного глаза, и наоборот). Благодаря этому корреспондирующие зоны сетчаток того и другого глаза имеют одно и то же субъективное зрительное направление. Несовпадающие точки сетчаток называют диспаратными. Горизонтальная диспаратность служит необходимым ориентиром для восприятия рельефа и глубины [1–7].

Между тем, видимый одним глазом окружающий мир не является для наблюдателя плоским за счет достаточно большого количества монокулярных признаков глубины, позволяющих оценивать трехмерность пространства (более близкие предметы частично закрывают более дальние, градиент текстуры, близость к горизонту, линейная перспектива, распределение света и тени и др.) [3, 4].

Наиболее выраженный эффект глубины в монокулярных условиях возникает при взаимном смещении проекций разноудаленных объектов на сетчатку при перемещении наблюдателя или самих объектов, отражая геометрию зрительной сцены. На сетчатке при этом получается последовательность “кадров”, которые могут объединяться в стереопары, что позволяет обеспечить точность пространственного анализа, не уступающую бинокулярным условиям наблюдения [1–4, 8].

В настоящее время в исследованиях, посвященных эффектам глубины, возникающих при наблюдении движущихся плоских изображений, используется несколько близких по смыслу терминов: стереокинетический эффект (*stereokinetic effect*), кинетический эффект глубины (*kinetic depth effect*), структура из движения (*structure from motion*) [8].

Под термином “стереокинетический эффект” (СЭ) принято понимать эффект глубины, возникающий при вращении плоских эллиптических

или кольцевых изображений со смещенным центром (эксцентриситетом) [1, 2, 9–12]. Одно из наиболее ранних известных описаний СЭ было сделано С. Musatti в 1955 г. [9].

Для описания эффекта восприятия объемной структуры, создаваемой тенью вращающегося трехмерного объекта, H. Wallach и D. O’Connell впервые использовали термин “кинетический эффект глубины” (*kinetic depth effect — KDE*) [13]. Возникновение данного эффекта объясняют процессами ассоциации на уровне центрального отдела зрительного анализатора между ретинальной проекцией и трехмерным объектом. В некоторых случаях такие ассоциации могут быть причиной восприятия 3D структуры даже при отсутствии движения проекции объекта [13].

В дальнейшем, благодаря работам S. Ullman [14], посвященным исследованию эффекта глубины и объема при движении проекций двух прозрачных цилиндров с нанесенными на их поверхность в случайном порядке точками, появился термин “структура из движения” (*structure from motion — SfM*), ставший более распространенным, чем KDE [14–17].

В настоящее время наиболее изученным с точки зрения характеристик векторных отношений бинокулярного и монокулярного механизмов пространственного зрения в норме, а также при неврологической и офтальмологической патологии является СЭ [1, 2, 18–20]. В работах, проводившихся в данном направлении, были выявлены особенности проявления СЭ, характеризующиеся уменьшением или исчезновением разницы между бинокулярными и монокулярными оценками СЭ (как за счет повышения бинокулярных оценок, так и за счет снижения монокулярных) у взрослых и детей при нарушениях бинокулярного зрения (при неврологической патологии, амблиопии, косоглазии) [1, 2, 18, 20]. Было показано, что при органической патологии глазного дна (например, у пациентов с частичной атрофией зрительного нерва (ЧАЗН)), также наблюдается уменьшение разницы между монокулярными и бинокулярными показателями за счет снижения монокулярных показателей [19, 21–26].

Наряду с СЭ не менее важным представляется изучение возможностей и других способов создания эффектов глубины на основе последовательных зрительных образов при наблюдении вращающихся плоских геометрических фигур. Так, например, в своем исследовании SfM в группе здоровых взрослых (в возрасте от 19 до 24 лет) испытуемых U. Vanzelli и M. Farne [27] использовали тестовое изображение в виде светлого шестиугольника на черном фоне с диагоналями, проходящими через его центр. Изображение проецировалось при помощи светопроектора на черный плоский экран в темной комнате на расстоянии

1 м от глаз испытуемого. Авторами была показана зависимость восприятия здоровыми субъектами (испытуемыми) вращающегося двухмерного плоского изображения шестиугольника от скорости его вращения — максимальное количество испытуемых, воспринимавших плоское изображение как объемную фигуру (куб или пирамиду), было максимальным при скорости вращения изображения 10 об./мин [27].

Между тем, исследования возможностей данной методики для изучения особенностей пространственного восприятия у пациентов с нарушениями бинокулярного зрения и другой офтальмопатологией в настоящее время проведено не было. Важно также отметить, что эти исследования проводились с использованием не компьютерных технологий, а светопроектора, поэтому результаты могли иметь некоторые погрешности.

Учитывая большой интерес современной нейробиологии и офтальмологии к проблеме изучения нейронных структур и механизмов, участвующих в организации пространственного зрения, исследования способности к восприятию объемных структур при наблюдении вращательного движения плоских изображений не только у здоровых взрослых, но также у детей с ЧАЗН (представляющей собой дегенеративный процесс в ганглиозных клетках сетчатки и их аксонах) и амблиопией (связанной с процессами торможения на уровне центрального отдела зрительного анализатора) имеют особое значение.

Цель настоящей работы — исследовать возможности зрительного анализатора по выявлению эффекта трехмерной структуры при различных скоростях вращательного движения ее двухмерного изображения, представленного на экране монитора.

МЕТОДИКА

Под наблюдением находилось 123 ребенка в возрасте от 7 до 17 лет, которые в результате стандартного офтальмологического обследования были разделены на 3 группы: 1) 40 детей контрольной группы (средний возраст 11.9 ± 0.5 лет; 19 мальчиков и 21 девочка) с ортотропией, нормальным состоянием зрительных функций (в том числе бинокулярного и стереозрения), а также сетчатки и зрительного нерва; 2) 33 ребенка с содружественным (непаралитическим) косоглазием и нормальным состоянием глазного дна (средний возраст 12.1 ± 0.5 лет; 15 мальчиков и 18 девочек); 3) 50 детей с содружественным косоглазием на фоне врожденной частичной атрофии зрительного нерва обоих глаз (средний возраст 12.5 ± 0.03 лет; 23 мальчика и 27 девочек).

Все дети контрольной группы имели нормальное бинокулярное и стереозрение с классическими

офтальмологическими тестами. Рефракция была эметропической у 16 (40%) детей, гиперметропической — у 5 (12.5%) детей, миопической — у 18 (45%) детей, и смешанный астигматизм — у 1 (2.5%) ребенка. Острота зрения (у детей с эметропией без коррекции, у детей с аметропией с коррекцией) составляла не меньше 0.9 (для лучше видящего глаза в среднем 0.92 ± 0.02 , для хуже видящего глаза — в среднем 0.91 ± 0.02).

Группа детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна включала 25 (75.8%) детей со сходящимся косоглазием и 8 (24.2%) детей с расходящимся косоглазием. Все дети данной группы имели нарушения бинокулярного зрения и отсутствие стереозрения с классическими офтальмологическими тестами. Рефракция была гиперметропической — у 26 (78.8%) детей, миопической — у 4 (12.5%) детей и трое (9.1%) детей были с односторонней артифакцией. У всех детей наблюдалась дисбинокулярная двусторонняя амблиопия слабой степени. Острота зрения лучше видящего глаза составляла от 0.65 до 0.8 (в среднем 0.77 ± 0.03), хуже видящего глаза от 0.45 до 0.65 (в среднем 0.54 ± 0.05).

Группа детей с косоглазием на фоне врожденной частичной атрофии зрительного нерва (ЧАЗН) обоих глаз включала 32 (64%) ребенка со сходящимся косоглазием и 18 (36%) детей с расходящимся косоглазием. Все дети данной группы имели нарушения бинокулярного зрения и отсутствие стереозрения с классическими офтальмологическими тестами. Рефракция была гиперметропической — у 19 (38%) детей, миопической — у 22 (44%) детей, смешанный астигматизм — у 5 (10%) детей и четверо (8%) детей были с двусторонней артифакцией. Острота зрения лучше видящего глаза составляла от 0.2 до 0.4 (в среднем 0.32 ± 0.03), хуже видящего глаза — от 0.1 до 0.25 (в среднем 0.18 ± 0.02).

По результатам предыдущего обследования невролога в рамках диспансерного осмотра ни у кого из включенных в исследование детей не были выявлены нарушения нейропсихического развития.

Предъявляемое тестовое изображение представляло собой фигуру в виде белого шестиугольника с проходящими через его центр шестью диагоналями на черном фоне экрана монитора (рис. 1).

Диаметр фигуры составлял 20 см, толщина всех линий 3 мм. Данное тестовое изображение предъявляли испытуемому с расстояния 2 м от глаз в мезопических условиях освещения (в наших исследованиях 250 лкс). Вариантами предъявления тестового изображения на экране монитора были следующие: 1) статичное (неподвижное) предъявление, 2) со скоростью вращения 5 об./мин; 3) со скоростью вращения 10 об./мин; 4) со скоростью вращения 15 об./мин; 5) со ско-

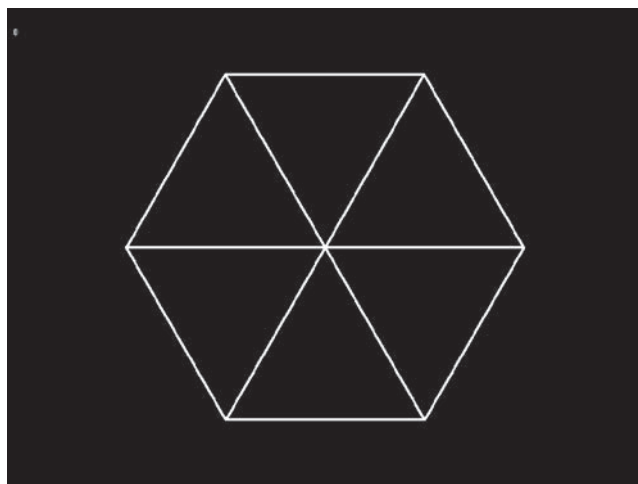


Рис. 1. Тестовое изображение.

ростью вращения 20 об./мин; 6) со скоростью вращения 30 об./мин; 7) со скоростью вращения 40 об./мин. Центр вращения совпадал с центром фигуры. Использовали как бинокулярные условия наблюдения (при двух открытых глазах), так и монокулярные (один глаз открыт, а другой прикрыт заслонкой). Варианты предъявления тестового изображения и условия наблюдения меняли в случайном порядке. Время наблюдения не ограничивали, но обычно оно составляло 1–2 мин для каждого варианта предъявления стимула. Задачей испытуемого было описать свои зрительные впечатления (плоская фигура или объемная, на что похожа). Отмечали следующие основные три градации ответов: 1) плоская фигура (описываемая как плоский шестиугольник с диагоналями, колесо, снежинка, пицца, пропеллер, медуза), 2) слабое ощущение объема (зонтик, шестиугольник с выпуклой или немного проваливающейся серединой, небольшая пирамида), 3) объемная фигура (чаще всего описываемая как куб с прозрачными гранями). Иногда восприятие куба было неустойчивым — куб периодически превращался в плоскую фигуру, но затем снова появлялся куб. В таких случаях описание восприятия фигуры фиксировали как наличие куба. Исследование было организовано таким образом, чтобы дети, прошедшие и непрошедшие тестирование, между собой не общались.

Статистическую обработку материала проводили при помощи программы *SPSS*. Для сравнения связанных выборок использовали *W*-критерий Уилкоксона, для межгрупповых сравнений — *U*-критерий Манна-Уитни. Статистическая значимость была установлена на уровне 0.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализируя полученные данные нужно отметить, что при неподвижном предъявлении тестового изображения не более 2–3% детей в каждой группе как в бинокулярных, так и в монокулярных условиях наблюдения были способны воспринимать данное изображение как каркас куба, остальные дети воспринимали его как плоскую фигуру (вариантами ее описания детьми были — шестиугольник с диагоналями, пицца, колесо со спицами, снежинка).

При подвижном предъявлении тестового изображения у всех детей контрольной группы в монокулярных условиях характер восприятия зрительной информации от лучше видящего глаза соответствовал характеру восприятия зрительной информации от хуже видящего глаза. Предъявление изображения с минимальной скоростью 5 об./мин вызывало эффект восприятия его в виде куба у 10% детей в бинокулярных условиях наблюдения, а в монокулярных условиях — у 22.5% детей (в 2 раза больше). Максимальное количество детей контрольной группы, воспринимавших куб, в бинокулярных условиях выявлялось при скоростях вращения изображения 15 и 20 об./мин (50% детей) и в монокулярных условиях при скорости 20 об./мин (77.5% детей). При дальнейшем увеличении скорости вращения фигуры до 40 об./мин количество детей, воспринимавших изображение как куб, уменьшалось и составляло в группе контроля только 10% в бинокулярных условиях и 15% — в монокулярных (рис. 2).

При максимальной скорости вращения изображения (40 об./мин) большинство детей во всех группах описывали его как вентилятор, колесо велосипеда, медузу с волнистыми краями или пропеллер.

Увеличение количества детей контрольной группы, воспринимающих изображение как куб, в монокулярных условиях по сравнению с бинокулярными являлось статистически достоверным при скоростях вращения 5 об./мин ($p = 0.023$), 10 об./мин ($p = 0.005$), 20 об./мин ($p = 0.002$) и 30 об./мин ($p = 0.001$). При скоростях вращения 15 и 40 об./мин показатели для монокулярных и бинокулярных условий были сопоставимы ($p > 0.05$).

У всех детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна в монокулярных условиях характер восприятия зрительной информации (плоское изображение, слабый объем или куб) от лучше видящего глаза соответствовал характеру восприятия зрительной информации от хуже видящего глаза, однако семь детей из данной группы с разницей в остроте зрения 0.3–0.4 отмечали более выраженный объем и более четкое восприятие фигуры при наблюдении его лучше видящим глазом по сравнению с хуже видящим. При увеличении скорости вращения тестового изображения в

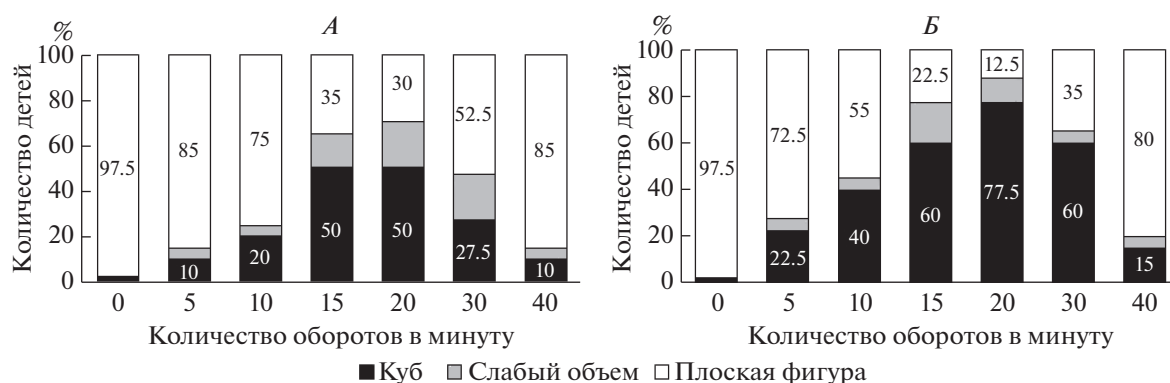


Рис. 2. Распределение детей контрольной группы в зависимости от восприятия изображения, предъявляемого с различной скоростью вращения в бинокулярных (А) и в монокулярных (Б) условиях наблюдения.

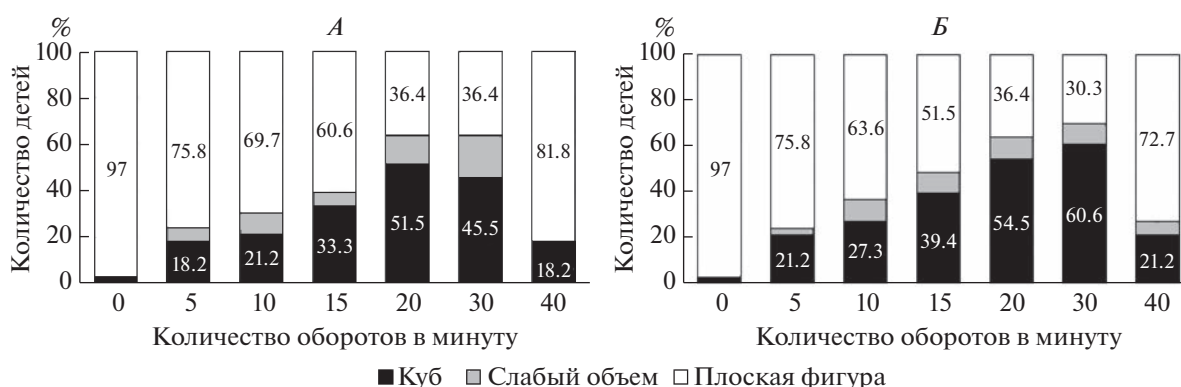


Рис. 3. Распределение детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна в зависимости от восприятия изображения, предъявляемого с различной скоростью вращения в бинокулярных (А) и в монокулярных (Б) условиях наблюдения.

данной группе, так же как и в контрольной, наблюдалось увеличение количества детей, воспринимающих изображение в виде куба. Максимальное количество детей, воспринимавших изображение объемным, выявлялось в бинокулярных условиях при скорости вращения 20 об./мин (51.5% детей), в монокулярных условиях — при скорости вращения 30 об./мин (60.6% детей). При дальнейшем увеличении скорости вращения фигуры до 40 об./мин количество детей, воспринимавших изображение как куб, уменьшалось и составляло в этой группе 18.2% детей при бинокулярных условиях наблюдения и 21.2% детей при монокулярных (рис. 3). При максимальной скорости вращения изображения большинство детей, как и в контрольной группе, описывали его как вентилятор, колесо велосипеда, медузу с волнистыми краями или пропеллер.

Сравнение количества детей данной группы, воспринимавших куб, в бинокулярных и монокулярных условиях наблюдения показало отсутствие достоверной разницы при всех скоростях вращения изображения ($p > 0.05$).

Достоверная корреляция с остротой зрения не была выявлена ($p > 0.05$), вероятно в связи с тем, что у всех детей данной амблиопия была слабой степени, и максимальная разница в остроте зрения составляла 0.15–0.2.

В группе детей с косоглазием на фоне ЧАЗН во всех случаях в монокулярных условиях характер восприятия зрительной информации от лучше видящего глаза соответствовал характеру восприятия зрительной информации от хуже видящего глаза. Максимальное количество детей, воспринимавших куб, было в бинокулярных условиях при скоростях вращения 15 и 20 об./мин (44% детей) и в монокулярных условиях — при скорости вращения 20 об./мин (48% детей). При дальнейшем увеличении скорости вращения фигуры до 40 об./мин количество детей, воспринимавших изображение как куб, уменьшалось и составляло в группе детей с косоглазием на фоне ЧАЗН — 22% в бинокулярных условиях и 24% в монокулярных (рис. 4). Описание зрительного образа при такой максимальной скорости у большинства детей данной группы было похожим на коммен-

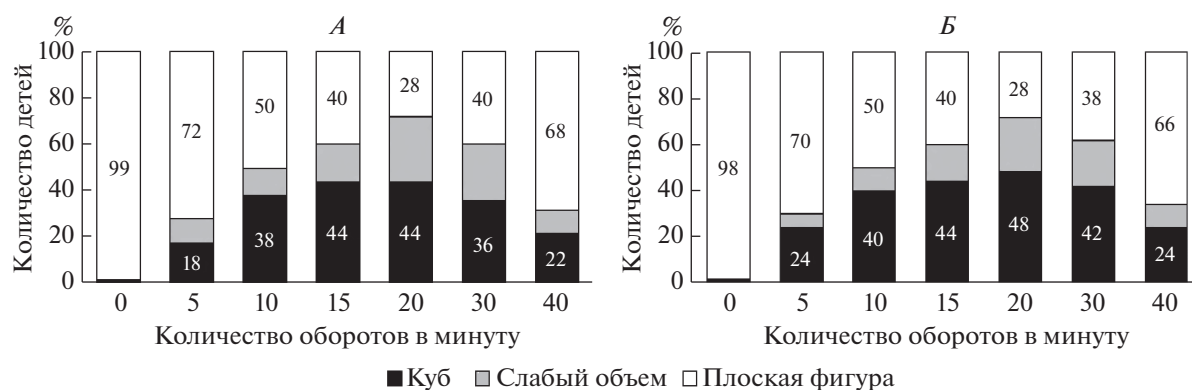


Рис. 4. Распределение детей с косоглазием на фоне частичной атрофии зрительного нерва (ЧАЗН) в зависимости от восприятия изображения, предъявляемого с различной скоростью вращения в бинокулярных (А) и в монокулярных (Б) условиях наблюдения.

тарии детей других групп (вентилятор, колесо велосипеда, медуза с волнистыми краями, пропеллер). Достоверная корреляция с остротой зрения в этой группе детей также не была выявлена ($p > 0.05$), предположительно в связи с тем, что у всех детей группы острота зрения была низкой без существенных различий (максимальная разница 0.2).

Сравнение количества детей данной группы, воспринимавших куб, в бинокулярных и монокулярных условиях наблюдения также показало отсутствие достоверной разницы при всех скоростях вращения изображения ($p > 0.05$).

Межгрупповой сравнительный анализ показал, что сравнение характера восприятия изображения между контрольной группой и группой детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна при каждой скорости вращения позволило выявить достоверно большее количество детей, воспринимающих изображение как куб в контрольной группе, чем у детей с косоглазием в монокулярных условиях при скоростях вращения 15 и 20 об./мин ($p = 0.03$ и $p = 0.02$ соответственно). Для бинокулярных условий достоверной разницы не было обнаружено. Сравнение показателей контрольной группы и группы детей с косоглазием на фоне ЧАЗН показало достоверно большее количество детей, воспринимающих изображение как куб в контрольной группе в монокулярных условиях при скорости вращения 20 об./мин ($p = 0.006$) и в бинокулярных условиях при скорости вращения 10 об./мин ($p = 0.02$). В остальных случаях достоверная разница не выявлялась.

При сравнении групп детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна и детей с косоглазием на фоне ЧАЗН бинокулярные и монокулярные показатели были статистически сопоставимы для всех скоростей вращения изображения ($p > 0.05$).

Во всех группах детей результаты для мальчиков были сопоставимы с результатами для девочек ($p > 0.05$ по критерию χ -квадрат).

Корреляционный анализ не выявил достоверной зависимости характера воспринимаемого изображения от возраста обследуемых во всех группах ($p > 0.05$). На диаграммах представлены результаты корреляционного анализа характера воспринимаемого изображения от возраста при скорости вращения тестового изображения 20 об./мин, так как при такой скорости частота восприятия объемного изображения была максимальной в большинстве случаев (рис. 5–7). При этом нужно отметить статистическую тенденцию к увеличению частоты восприятия объемного изображения с возрастом детей контрольной группы в бинокулярных условиях наблюдения (рис. 5, А).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты данного исследования хорошо согласуются с полученными нами данными в предыдущих работах, посвященных изучению СЭ у детей с ЧАЗН и у детей с оперированным содружественным (непаралитическим) косоглазием [19, 20].

В исследованиях СЭ эффекта у детей с ЧАЗН мы использовали кольцевые тестовые изображения с эксцентриситетом (смещенным центром) 0.2, 0.4, 0.6 и 0.8. Тестовые изображения предъявляли на экране монитора с разной скоростью вращения (от 2 до 90 об./мин) [19]. Было показано, что у большинства (63.9%) детей с ЧАЗН при наблюдении кольцевого тестового изображения с минимальным эксцентриситетом (0.2) и минимальной скоростью вращения (2 об./мин), эффекта глубины не возникало в отличие от детей контрольной группы, а при увеличении скорости вращения более 30 об./мин СЭ появлялся у всех детей (как в контрольной группе, так и в группе с ЧАЗН) при любом эксцентриситете [19]. Было

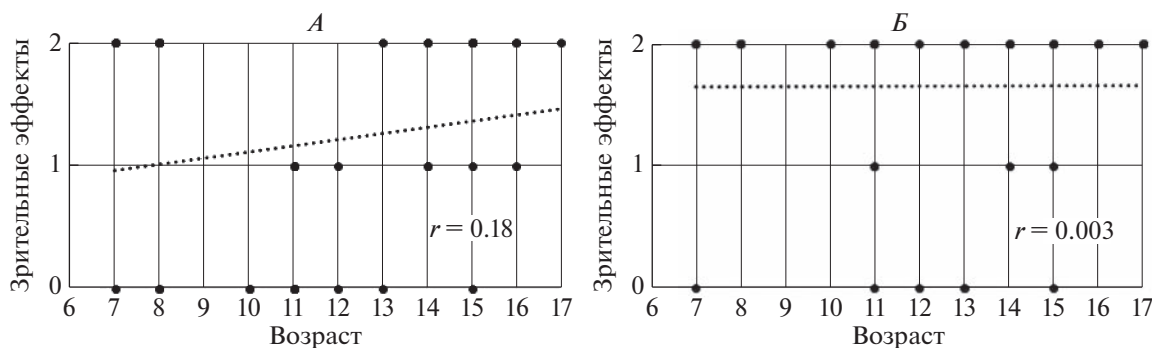


Рис. 5. Зависимость зрительного эффекта от возраста детей контрольной группы при исследовании в бинокулярных (А) и монокулярных (Б) условиях наблюдения.

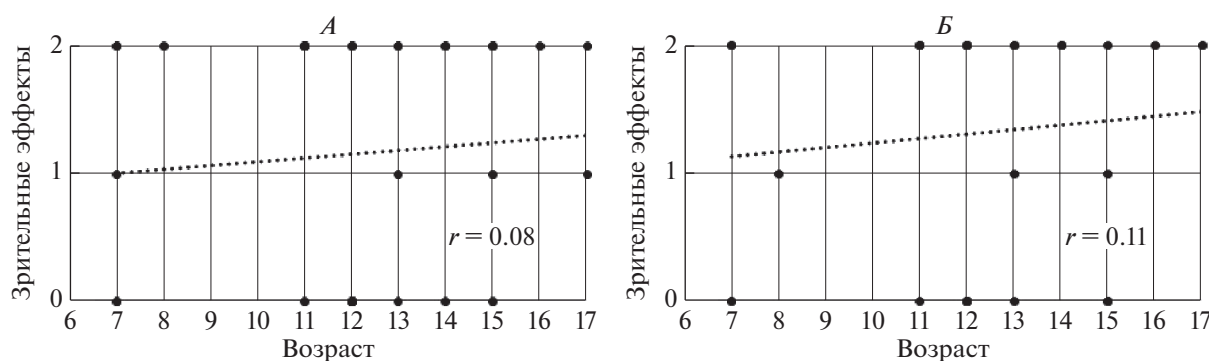


Рис. 6. Зависимость зрительного эффекта от возраста детей с косоглазием на фоне нормального глазного дна при исследовании в бинокулярных (А) и монокулярных (Б) условиях наблюдения.

также показано, что бинокулярные оценки выраженности СЭ в группе детей с ЧАЗН были сопоставимы с монокулярными оценками в отличие от детей контрольной группы, у которых монокулярные оценки выраженности СЭ значительно превышали бинокулярные. На основании полученных данных было сделано предположение о сдвиге силовых отношений монокулярного и би-

нокулярного механизмов пространственного зрения в сторону монокулярного [19].

В другой нашей работе [20], посвященной оценке динамики СЭ в результате функционального лечения детей с остаточной микродевиацией после хирургического лечения содружественного косоглазия, были получены данные, демонстрирующие возможности использования СЭ в мони-

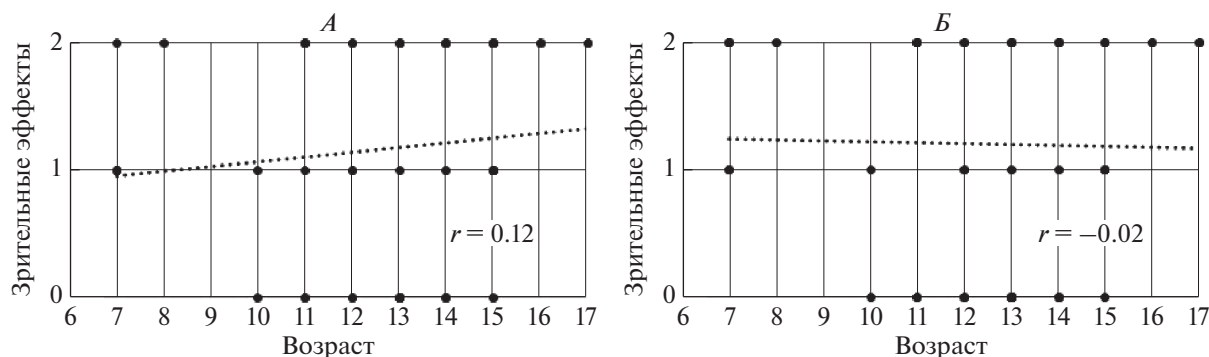


Рис. 7. Зависимость зрительного эффекта от возраста детей с частичной атрофией зрительного нерва (ЧАЗН) при исследовании в бинокулярных (А) и монокулярных (Б) условиях наблюдения.

торинге силовых отношений бинокулярного и монокулярного механизмов пространственного зрения в ходе лечения. Была показана положительная динамика в виде сдвига векторных отношений механизмов пространственного зрения в сторону усиления влияния бинокулярного механизма [20].

Анализ результатов данного исследования *SfM*, также как и анализ результатов предыдущего исследования СЭ позволяет предположить, что различия характера восприятия тестового изображения в монокулярных и бинокулярных условиях наблюдения у детей контрольной группы обусловлены нормальными силовыми соотношениями бинокулярного и монокулярного механизмов пространственного зрения. В обеих группах детей с косоглазием (на фоне нормального глазного дна и на фоне ЧАЗН), в отличие от детей контрольной группы, нарушения бинокулярного механизма приводят к сдвигу силовых отношений механизмов пространственного зрения в сторону монокулярного. Следует отметить, что нарушения бинокулярного зрения, очевидно имеют в этом процессе большее значение, чем состояние глазного дна, учитывая сопоставимость показателей детей двух групп с косоглазием.

Снижение остроты зрения, обусловленное как центральным торможением (у пациентов с дисбинокулярной амблиопией), так и дегенеративными изменениями ганглиозных клеток сетчатки и их аксонов (у пациентов с ЧАЗН), очевидно, может быть причиной уменьшения выраженности *SfM*, судя по разнице монокулярных показателей детей контрольной группы и детей обеих групп с косоглазием при некоторых скоростях вращения изображения.

Таким образом, показано, что исследование *SfM*, также как и исследование СЭ может использоваться для оценки эффектов глубины и силовых отношений монокулярного и бинокулярного механизмов пространственного восприятия в норме и при офтальмопатологии.

ВЫВОДЫ

1. Восприятие объемного изображения возможно при неподвижном предъявлении тестового двухмерного изображения у 2–3% детей как контрольной группы, так и групп детей с косоглазием в бинокулярных и в монокулярных условиях наблюдения.

2. При вращении тестового изображения как в бинокулярных, так и в монокулярных условиях наблюдения, количество детей, воспринимавших объемную структуру, во всех группах увеличивалось при повышении скорости вращения изображения, достигало максимальных значений при

15–30 об./мин и значительно снижалось при 40 об./мин.

3. В контрольной группе при переходе от бинокулярных условий наблюдения к монокулярным существенно увеличивается количество детей, воспринимающих изображение как куб, при скоростях вращения 5 об./мин ($p = 0.023$), 10 об./мин ($p = 0.005$), 20 об./мин ($p = 0.002$) и 30 об./мин ($p = 0.001$).

4. В группах детей с косоглазием (как на фоне нормального глазного дна, так и на фоне ЧАЗН) бинокулярные и монокулярные показатели статистически сопоставимы ($p > 0.05$).

5. Сравнение показателей в разных группах демонстрирует большее количество детей, воспринимающих объемную фигуру в контрольной группе, чем в обеих группах детей с косоглазием при некоторых скоростях вращения тестового изображения (от 10 до 20 об./мин).

6. Не выявлено достоверной зависимости характера восприятия тестового изображения от возраста во всех исследуемых группах детей.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом Института проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им или его законным представителем (для несовершеннолетних) после разъяснения потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Могилев Л.Н. Механизмы пространственного зрения. М.: Наука, 1982. 112 с.
2. Рычков И.Л. Пространственное зрение человека и животных. Иркутск: Издательство Иркутского университета, 1990. 216 с.
3. Рожкова Г.И., Матвеев С.Г. Зрение детей: проблемы оценки и функциональной коррекции. М.: Наука, 2007. 315 с.
4. Рожкова Г.И., Алексеенко С.В. Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на разные механизмы зрительной системы // Мир техники кино. 2011. Т. 21. № 3. С. 12.
5. Рожкова Г.И., Васильева Н.Н. Взаимодействие бинокулярного и стереокинетического механизмов восприятия глубины у детей с нормальным и нару-

- шенным бинокулярным зрением // Сенсорные системы. 2001. Т. 15. № 1. С. 61.
6. Howard I.P., Fujii Y., Allison R.S. Interactions between cues to visual motion in depth // J. Vis. 2014. V. 14. № 2. P. 14.
 7. Thompson L., Ji M., Rokers B., Rosenberg A. Contributions of binocular and monocular cues to motion-in-depth perception // J. Vis. 2019. V. 19. № 3. P. 2.
 8. Vezzani S., Kramer P., Bressan P. Stereokinetic effect, kinetic depth effect, and structure from motion / The Oxford Handbook of Perceptual Organization. Oxford University Press. Oxford UK, 2014. 26 p.
 9. Musatti C.L. La stereocinesi e il problema della struttura dello spazio visibile // Rivista di Psicologia. 1955. V. 49. P. 3.
 10. Wieland B.A., Mefferd R.B. Perception of depth in rotating objects: Asim-metry and velocity as the determinants of the stereokinetic effect // Percept Mot. Skills. 1968. V. 26. № 3. P. 671.
 11. Mogilev L.N., Rychkov I.L., Rizolatti G. Alcune osservazioni sui fenomeni stereocinetici // Boll. Soc. Ital. Biol. Sper. 1978. V. 5. № 18. P. 1763.
 12. Fischer G.T. Factors affecting estimation of depth with variations of the stereokinetic effect // Am. J. Psychol. 1956. V. 69. № 2. P. 252.
 13. Wallach H., O'Connell D. The kinetic depth effect // J. Exp. Psychol. 1953. V. 45. № 4. P. 205.
 14. Ullman S. The interpretation of structure from motion // Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 1979. V. 203. № 1153. P. 405.
 15. Ferris S.H. Motion parallax and absolute distance // J. Exp. Psychol. 1972. V. 95. № 2. P. 258.
 16. Holmin J., Nawro M. Motion parallax thresholds for unambiguous depth perception // Vision Res. 2015. V. 115. P. 40.
 17. Shindler A., Bartels A. Motion parallax links visual motion areas and scene regions // Neuroimage. 2016. V. 125. P. 803.
 18. Рычкова С.И., Васильева Н.Н. Взаимоотношение монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного восприятия при разных видах амблиопии // Сенсорные системы. 2011. Т. 25. № 2. С. 119.
 19. Рычкова С.И., Сандимиров Р.И., Кособуцкая Л.В. Зависимость стереокинетического эффекта от скорости вращения и эксцентриситета тестового изображения у детей с частичной атрофией зрительного нерва // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 4. С. 13.
Rychkova S.I., Sandimirov R.I., Kosobutskaya L.V. Dependence of the stereokinetic effect on the rotational speed and eccentricity of the test image in children with partial optic atrophy // Human Physiology. 2019. V. 45. № 4. P. 356.
 20. Рычкова С.И., Лихванцева В.Г. Взаимоотношения монокулярного и бинокулярного механизмов пространственного восприятия до и после функционального лечения у детей с послеоперационной остаточной микродевиацией // Офтальмохирургия. 2019. № 4. С. 42.
 21. Kim H.R., Angelaki D.E., DeAngelis G.C. Gain modulation as a Mechanism for Coding depth from motion parallax in macaque area MT // J. Neurosci. 2017. V. 37. № 34. P. 8180.
 22. Nadler J.W., Barbash D., Kim H.R. et al. Joint representation of depth from motion parallax and binocular disparity cues in macaque area MT // J. Neurosci. 2013. V. 33. № 35. P. 14061.
 23. Brodsky M.C. Optic atrophy in children / Pediatric Neuro-Ophthalmology. NY: Springer, 2016. P. 199.
 24. Peragallo J.H., Keller S., van der Knaap M.S. et al. Retinopathy and optic atrophy: Expanding the phenotypic spectrum of pathogenic variants in the AARS2 gene // Ophthalmic Genet. 2018. V. 39. № 1. P. 99.
 25. Turan K.E., Sekeroglu H.T., Koc I., Sanac A.S. Bilateral optic disc pathologies as an accompanying feature of comitant strabismus in children // Int. Ophthalmol. 2018. V. 38. № 2. P. 425.
 26. Васильева Н.Н., Рычкова С.И., Рожкова Г.И. Монокулярные и бинокулярные механизмы пространственного восприятия у слабовидящих детей с заболеваниями сетчатки и зрительного нерва // Дефектология. 2010. № 6. С. 39.
 27. Vanzelli U., Farne M. Movimento dello stimolo e tridimensionalita // Boll. Soc. Ital. Biol. Sper. 1970. V. 46. № 11. P. 529.

Investigation of the Perception of Three-Dimensional Geometric Figures from the Rotational Movement of Their Two-Dimensional Image in Children with Ophthalmopathology

S. I. Rychkova^{a, b, *}, R. I. Sandimirov^c

^aInstitute for Information Transmission Problems of the RAS, Moscow, Russia

^bBiomedical University of Innovation and Continuing Education of the Federal State Research Center of the Russian Federation, A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia, Moscow, Russia

^cPirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

*E-mail: lana.rych@mail.ru

Manifestations of the illusion of a three-dimensional structure appearing when rotating a flat projection of a three-dimensional object (structure from motion (SfM)) were studied in three groups of children aged 7 to 17 years: 1) 40 children of the control group with orthotropy, the normal state of visual functions (including binocular and stereovision) and fundus; 2) 33 children with non-paralytic strabismus and normal fundus con-

dition; 3) 50 children with non-paralytic strabismus on the background of congenital partial atrophy of the optic nerve (PAON). As a test image, we used the figure of a hexagon with diagonals passing through its center, presented in binocular and monocular observation conditions in the form of a still image, and when it rotates at a speed of 5, 10, 15, 20, 30, 40 rpm. It was shown that the perception of a three-dimensional structure in the form of a cube is possible with a stationary presentation of a test image in 2–3% of children of both the control group and groups of children with strabismus in binocular and monocular observation conditions. When rotating the test image in both binocular and monocular observation conditions, the number of children who perceived the cube in all groups increased with increasing image rotation speed, reached maximum values at 15–30 rpm and significantly decreased at 40 rpm. In the control group, during the transition from binocular observation conditions to monocular, the number of children perceiving the image as a cube significantly increases at rotational speeds of 5 rpm ($p = 0.023$), 10 rpm ($p = 0.005$), 20 rpm ($p = 0.002$) and 30 rpm ($p = 0.001$). In groups of children with strabismus (both on the background of normal fundus and on the background of PAON), binocular and monocular indicators were statistically comparable ($p > 0.05$). Comparison of indicators in different groups demonstrated a greater number of children perceiving a three-dimensional figure in the control group than in both groups of children with strabismus at certain speeds of rotation of the test image (from 10 to 20 rpm). In groups of children with strabismus on the background of normal fundus and children with strabismus on the background of PAON, binocular and monocular indicators are statistically comparable for all image rotation speeds. There was no significant dependence of the nature of the perception of the test image on age in all the studied groups of children. Thus, along with the general patterns of SfM manifestations in children of the studied groups, differences were revealed due to the nature of the interaction of monocular and binocular mechanisms of spatial perception in normal and ophthalmopathy. Thus, the SfM study can be used to evaluate the effects of depth and force relations of the monocular and binocular mechanisms of spatial perception in normal and ophthalmopathy.

Keywords: structure of movement, strabismus, amblyopia, depth effect.