

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БИНОКУЛЯРНОЙ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ У ШКОЛЬНИКОВ

© 2021 г. Н. Н. Васильева<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН  
127051 Москва, Большой Каретный переулок, д. 19, Россия*

*\*E-mail: nn\_vasilyeva@mail.ru*

Поступила в редакцию 29.03.2020 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 29.04.2021 г.

Представлен анализ результатов систематического изучения развития бинокулярного зрения (БЗ) у детей на протяжении школьного обучения. В исследовании приняли участие 750 школьников в возрасте от 6 до 18 лет. Оценивалась возрастная динамика функциональных показателей БЗ: остроты бинокулярного стереозрения, конвергентных и дивергентных фузионных резервов, скорости бинокулярной интеграции, баланса бинокулярных и монокулярных механизмов пространственного восприятия. Комплексный сравнительный анализ показателей БЗ в разном возрасте позволил уточнить сроки и темпы гетерохронного созревания отдельных механизмов, возраст достижения максимального уровня перед намечающимся ослаблением функций. Установлено, что наиболее быстрые темпы увеличения вклада бинокулярных механизмов в пространственное восприятие и улучшения различных показателей БЗ характерны для периода от 6–7 до 9–10 лет. По средним данным, фузионные резервы достигают максимальных значений в 12–13 лет, острота бинокулярного стереозрения и скорость бинокулярной интеграции – в 14–15 лет. Выявлена тенденция к снижению функциональных показателей БЗ в юношеском возрасте, что может быть связано с естественными возрастными процессами постепенной потери пластичности зрительных механизмов после их полного созревания, а также с влиянием различных неблагоприятных факторов. В ходе дискриминантного анализа данных определены показатели, имеющие наибольшее диагностическое значение для характеристики возрастных особенностей пространственного зрительного восприятия у детей: конвергентные фузионные резервы, острота стереоскопического зрения для пространственной частоты 0.7 цикл/град, бинокулярная острота зрения для близи, показатели успешности бинокулярной интеграции для времени экспозиции тестовых объектов 100 и 400 мс, соотношение данных стереокинетического теста в бинокулярных и монокулярных условиях наблюдения.

*Ключевые слова:* зрение детей, возрастная динамика, бинокулярная зрительная система, пространственное восприятие, острота стереозрения, фузионные резервы, бинокулярная интеграция

DOI: 10.31857/S0235009221030069

### ВВЕДЕНИЕ

В процессе обучения и осуществления многих видов деятельности для человека очень важны способности правильно оценивать размеры, форму объектов и их взаимное расположение в окружающем трехмерном пространстве, анализировать информацию о положении, ориентации и движении собственного тела, обеспечивая осуществление эффективной деятельности. Эти способности в значительной мере базируются на бинокулярных зрительных механизмах.

Бинокулярное зрение по сравнению с монокулярным обеспечивает более совершенное восприятие трехмерной формы объектов, более точную оценку их абсолютной и относительной удаленности, лучшее восприятие яркости и кон-

траста. При бинокулярном восприятии уменьшается утомляемость и растет вероятность распознавания объекта восприятия. Состояние бинокулярного зрения и зрелость бинокулярных механизмов являются определяющими для полноценного восприятия фото-, кино-, видеопродукции в 3D-формате. При этом бинокулярная зрительная подсистема представляет собой очень тонкий и подверженный внешним воздействиям механизм, функциональная незрелость и разлад которого в значительной мере отражаются на всем процессе зрительного восприятия.

Базовыми механизмами, обуславливающими преимущества бинокулярного пространственного восприятия по сравнению с монокулярным зрением, являются бинокулярный стереопсис, бинокулярная фузия и бинокулярная интеграция

(Кропман, 1966; Котлярский, 1982; Рожкова, 1992; Blake, Fox, 1973; Tyler, 1983; Howard, Rogers, 2012; Rogers, 2017 и др.).

На фоне большого числа публикаций о зрении детей объем работ, посвященных изучению возрастных аспектов бинокулярного зрения сравнительно невелик. Анализ работ, направленных на изучение онтогенеза зрительной системы и зрительного восприятия, показывает, что многие зрительные функции, в том числе бинокулярные, не заканчивают своего формирования к концу сенситивного периода и могут совершенствоваться в период школьного обучения (Базарный, 1991; Васильева, 2002; Фарбер, Бетелева, 2005; Рожкова, Матвеев, 2007; Морозова, 2016; Бондарко, 2018; Жукова и др., 2018; Николаева, Джалаева, 2020; Oduntan et al., 1998; Chen, Abidin, 2002; Irving et al., 2006; Dyea, Bavelierb, 2010; Namaeh et al., 2020 и др.). Усложнение деятельности зрительной системы, повышение скорости и точности зрительного анализа, совершенствование разнообразных зрительно-моторных актов в постнатальном онтогенезе связаны с морфофункциональным созреванием разных модулей зрительной сенсорной, аккомодационной и глазодвигательной систем.

Одной из основных закономерностей морфофункционального созревания растущего организма является гетерохронность развития. Гетерохронность проявляется в разной скорости созревания различных систем и функций и достижении ими полной зрелости на разных этапах индивидуального развития. Гетерохронность развития — специфический для онтогенеза механизм адаптации живой системы, благодаря которому в каждом возрасте наиболее эффективно используются те структуры и их функциональные возможности, которые к данному времени созрели настолько, чтобы отвечать запросам следующего этапа развития организма. Таким образом, каждый возрастной этап имеет характерную для него неповторимую морфофункциональную структуру физиологических систем, определяющую функциональные возможности данного возраста. Причем достижение адаптивного результата не исключает в последующем перестройки функциональных систем в связи с изменением круга задач и созреванием других более эффективных или более специализированных механизмов.

Результаты фундаментальных исследований указывают на необходимость проведения комплексного исследования бинокулярной зрительной системы детей и подростков, учитывающего наличие в зрительной системе большого числа параллельных каналов переработки информации, различающихся между собой по принципам и механизмам анализа поступающей информации (Леушина, 1967; Супин, 1974; 1981; Шевелев,

1984; Плосконос, 1989; Глезер и др., 1992; Пигарев, 1992; Рожкова, 1992; Рожкова, Матвеев, 2007; Алексеенко, 2018; Hubel, Wiesel, 1962; Wolfe, 1986; Cogan, 1987; Hubel, Livingstone, 1987).

Использование комплексного подхода имеет принципиально важное значение, поскольку позволяет уточнить данные о сроках и темпах созревания различных механизмов, периодах интенсивного формирования функций, условиях достижения максимального уровня и причинах намечающегося ослабления функций. Эти ключевые вопросы имеют не только теоретический интерес, позволяя раскрыть закономерности развития зрительной системы в периоды высокой адаптационной нагрузки растущего организма, но и практическое значение при создании условий для своевременной реализации времяспецифических функций, обосновании технологий и методик обучения, разработки подходов к охране и укреплению здоровья детей и подростков.

В настоящей статье кратко суммированы результаты долгосрочного систематического комплексного изучения функциональных показателей бинокулярной зрительной системы у школьников 6–18-летнего возраста.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

**Испытуемые.** Исследования были проведены в период с 2003 по 2020 г. С учетом имеющихся возможностей в разных сериях экспериментов участвовало различное количество испытуемых, но оно всегда было достаточным для получения достоверных результатов. В целом в исследовании приняли участие 750 человек в возрасте от 6 до 18 лет, обучающиеся в образовательных учреждениях г. Москвы и г. Чебоксары.

Испытуемые участвовали в исследовании добровольно, от совершеннолетних было получено информированное согласие на проведение процедуры измерений. Родители (законные представители) несовершеннолетних были проинформированы о проводившемся исследовании и дали письменное согласие на участие в нем детей. Отбор испытуемых проводили на основе анализа анамнестических данных и медицинских карт. По результатам стандартного медицинского осмотра были отобраны дети, у которых аномалий бинокулярного зрения не выявлено. Условно можно считать, что эти испытуемые имели нормальное бинокулярное зрение, хотя не исключено, что у незначительной части имелись скрытые или устраненные ранее дефекты, которые не выявляются при стандартном медицинском исследовании зрения. У всех участников проводили оценку монокулярной и бинокулярной остроты дальнего (4 м) и ближнего (0.5 м) зрения и измеряли рефракцию.

Организация проведения исследования соответствовала принципам биомедицинской этики, представленным в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях.

**Основные оцениваемые бинокулярные показатели.** На основе анализа и обобщения представлений о функциональной организации пространственного восприятия человека, современных нейрофизиологических данных о бинокулярных и монокулярных механизмах, а также многоканальности переработки информации в зрительной системе, нами были выделены четыре функциональных показателя, которые, на наш взгляд, позволяют достаточно разносторонне охарактеризовать состояние бинокулярного зрения:

- *острота бинокулярного стереозрения*, отражающая качество стереопсиса, т.е. способность определять малые сдвиги объектов по глубине на основе бинокулярной диспаратности;

- *фузионные резервы*, характеризующие совместную работу окуломоторного аппарата и сенсорных механизмов фузии, отражающие прочность, помехоустойчивость и гибкость механизмов фузии, обеспечивающих формирование единого трехмерного образа в результате совместной обработки изображений объекта на сетчатках двух глаз;

- *скорость бинокулярной интеграции*, отражающая временные характеристики бинокулярного восприятия, а именно — способность зрительной системы за короткое время сформировать целостный образ объекта на основе двух неполных изображений в правом и левом глазу;

- *баланс бинокулярных и монокулярных механизмов пространственного восприятия*, характеризующий особенности взаимодействия бинокулярных и монокулярных механизмов и вклад бинокулярных механизмов в пространственное восприятие.

**Обоснование выбора методик.** Острота бинокулярного стереозрения и фузионные резервы оцениваются в настоящее время в офтальмологической и профессионально-экспертной практике при необходимости уточнения и постановки диагноза или выявления нарушений бинокулярного зрения. В то же время для решения поставленных в исследовании задач ограничиться уже известными и апробированными методами, широко применяемыми в офтальмологической практике, не представляло возможным в силу ряда обстоятельств.

Во-первых, для оценки остроты бинокулярного стереозрения доступные тесты Titmus test и Randot stereo test ограничены точностью 20" и 40" соответственно. Анализ опубликованных в настоящее время данных о количественных характеристиках стереопсиса у взрослых позволяет заключить, что стереопороги у школьников могут быть значительно ниже 20".

Во-вторых, синоптофор, применяемый для оценки фузионных резервов, не всегда позволяет точно и объективно оценить эти показатели, так как достоверность данных в значительной мере зависит от субъективных ответов обследуемого ребенка, а значит, от правильного понимания им своих зрительных ощущений и тех требований, которые к нему предъявляются в процессе обследования.

В-третьих, цветотест, применяемый для оценки способности зрительной системы формировать единый образ объекта, комбинируя фрагменты его проекций в правом и левом глазу, не позволяет количественно охарактеризовать скорость бинокулярной интеграции.

В-четвертых, чтобы обеспечить возможность проведения исследования по единой комплексной методике в широком возрастном интервале, важно было подобрать такой комплекс измерительных процедур, который был бы понятен и доступен испытуемым младших возрастных групп и в то же время не снизил интерес к исследованию в старших возрастных группах.

Отбор методов осуществляли на основе следующих принципов:

- максимальное исключение влияния субъективных факторов на результат;

- возможность количественного выражения результата;

- высокий уровень успешности тестирования: возможность довести процедуру до конца в подавляющем большинстве случаев;

- возможность реализации метода в игровой форме (важно для детей младших возрастных групп);

- возможность автоматизации и компьютеризации процедуры.

В итоге комплексное исследование развития механизмов бинокулярной зрительной системы школьников в данной работе включало оценку остроты стереоскопического зрения, конвергентных и дивергентных фузионных резервов, скорости бинокулярной интеграции, баланса бинокулярных и монокулярных механизмов пространственного восприятия.

#### *Описание тестовых процедур*

**Оценка остроты бинокулярного стереозрения.** Для количественной оценки остроты стереозрения измеряли пороги стереовосприятия методом пространственно-частотной стереовизометрии при помощи компьютерной программы "Стереопсис", диагностические возможности которой были продемонстрированы при исследовании офтальмологически здоровых взрослых и лиц с различными заболеваниями зрительной системы (Белозе-

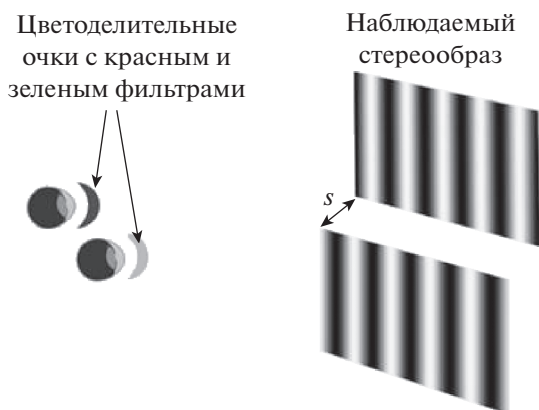


Рис. 1. Схема измерения стереопорогов.

ров, 2003). Достоинством программы является возможность оценки малых стереопорогов, величиной до 1". Процедура ее применения подробно описана в публикации (Васильева и др., 2010а).

Тестовым стимулом являлась стереопара, занимающая всю поверхность экрана монитора и изображающая две расположенные одна над другой вертикальные решетки с синусоидальным профилем яркости и высоким контрастом (рис. 1). В каждом стимуле решетки имели одинаковую пространственную частоту, но различную диспаратность (которую варьировали), поэтому при разделении полей зрения они казались отстоящими друг от друга по глубине, если величина диспаратности превосходила порог.

Измерения проводили на пространственных частотах: 0.4; 0.5; 0.7; 1.0; 1.4; 2.0; 2.8; 4.0 цикл/град в условиях дихоптического предъявления стимулов на расстоянии 2.27 м от экрана (расстояние от глаз наблюдателя до экрана автоматически задавалось программой, учитывающей размеры монитора, чтобы обеспечить постоянство углового размера экрана по горизонтали — 8.3°). Разделение полей зрения осуществляли методом анаглифической гаплоскопии, тестирование проходило в красно-зеленых очках.

Задача испытуемого состояла в определении взаимного расположения воспринимаемых решеток, занимающих верхнюю и нижнюю часть экрана по отношению друг к другу, т.е. испытуемый должен был сказать, какая решетка находится ближе к нему, верхняя или нижняя.

За порог стереозрения принимали минимальную относительную диспаратность верхней и нижней решеток, при которой испытуемый надежно определял их взаимное расположение.

*Оценка фузионных резервов.* Фузионные резервы измеряли при помощи интерактивной компьютерной программы “Фурор”, разработанной в ИППИ РАН. Данная программа использовала

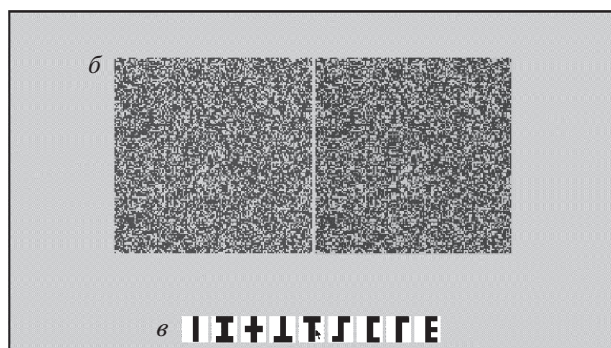
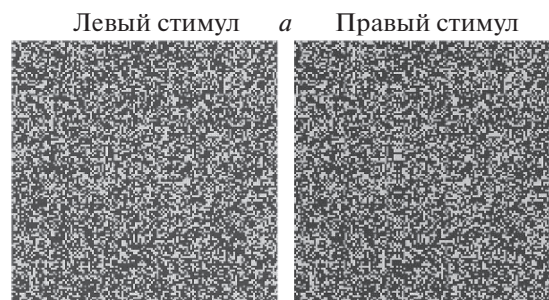


Рис. 2. Пояснения к методике: *a* — стереограмма, кодирующая основной ТО — вертикальную полосу; *б* — вид экрана после измерения с остановленной стереограммой, кодирующей ТО в виде буквы Т; *в* — набор тест-объектов.

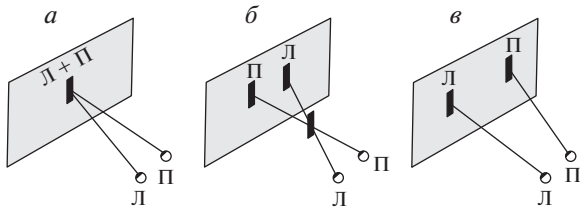
лась нами во многих исследованиях и подробно описана в публикациях (Васильева, Рожкова, 2009; Рожкова, Васильева, 2010).

Тестовым стимулом являлась случайно-точечная стереограмма (СТС). СТС на поле 140 × 140 мм кодировала тест-объект (ТО) в виде вертикальной полосы размером 114 × 26 мм, к которой по ходу процедуры измерения в случайном порядке добавлялись маркеры, меняющие вид ТО (рис. 2).

При измерении конвергентных фузионных резервов правый стимул двигался влево, а левый — вправо, что приводило к постепенному увеличению угла конвергенции. При измерении дивергентных фузионных резервов правый стимул двигался вправо, а левый — влево, что приводило к дивергенции зрительных осей (рис. 3).

Скорость движения стимулов по экрану составляла 50 мм/мин. Применение СТС позволяло контролировать сохранение у испытуемых способности к формированию полноценных стереообразов на основе бинокулярной диспаратности на всем протяжении измерения до момента распада сфузионрованного образа при достижении критических углов конвергенции/дивергенции.

Измерения проводили на расстоянии 50 см от экрана в условиях дихоптического предъявления стимулов. Разделение полей зрения осуществляли методом анаглифической гаплоскопии, тести-



**Рис. 3.** Схемы расположения левого (Л) и правого (П) стимулов в исходный момент (а) и при измерении конвергентных (б) и дивергентных (в) фузионных резервов.

рование проходило в красно-зеленых очках. В отличие от призм и синоптофора, используемых в клинической практике для оценки фузионных резервов, данная программа позволяла установить момент пропадания бинокулярного образа очень точно: как только испытуемый прекращал фузировать СТС, он переставал видеть закодированный ТО.

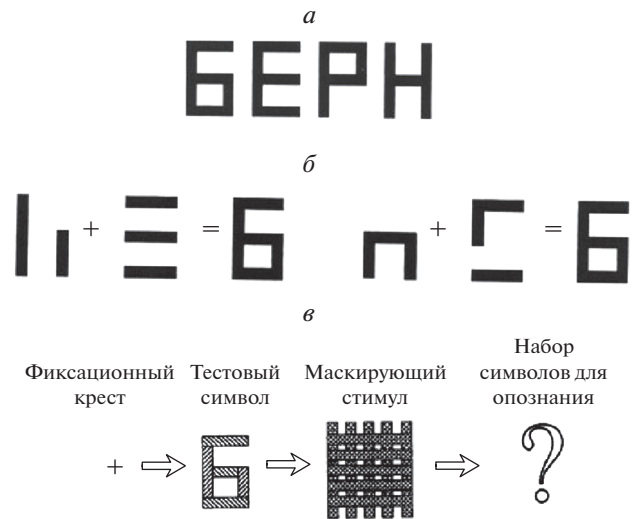
Перед испытуемым ставилась задача как можно дольше удерживать состояние фузии, следя за сменой тест-объектов и констатируя момент потери фузии и исчезновения бинокулярного образа.

Оценкой фузионных резервов служили те предельные углы конвергенции и дивергенции, превышение которых вызывало срыв фузии, исчезновение циклопического объекта и диплопию.

*Оценка скорости бинокулярной интеграции.* Для оценки скорости бинокулярной интеграции была использована интерактивная компьютерная программа, разработанная в ИППИ РАН. Процедура ее применения подробно описана в публикации (Рожкова и др., 2002).

В качестве тестовых объектов использовали схематические изображения букв, составленных из фрагментов, которые случайным образом разделялись на две части и предъявлялись правому и левому глазу на определенное время (рис. 4, а, б). Линейные размеры прямоугольной области, в которую вписывались тестовые символы, на экране составляли 24 × 37,5 мм; толщина линий равнялась 5 мм. Время экспозиции варьировало в диапазоне от 50 до 800 мс. Измерения проводили на расстоянии 50 см от экрана в условиях дихоптического предъявления стимулов с использованием цветоделительных очков. Для одного глаза фрагменты буквы были красными, для второго — синими.

В каждом испытании для опознания последовательно предъявляли 10 тестовых символов (букв). После каждого предъявления тестовой буквы на экран выводилась маскирующая решетка, перекрывающая все тестовое поле и содержащая горизонтальные и вертикальные элементы,



**Рис. 4.** Примеры тестовых объектов и схема процедуры эксперимента: а — образцы букв; б — два варианта комбинации буквы Б из левого и правого фрагментов; в — последовательность предъявления изображений в ходе тестирования.

из которых были составлены символы. Затем на экране возникал образец со всеми тестовыми знаками, из которых надо было выбрать только что увиденную букву (рис. 4, в).

В каждой серии фиксировали вероятность правильного ответа (отношение количества правильно названных букв к общему числу предъявленных тестовых символов). Об интегративных способностях судили по минимальному времени предъявления фрагментов букв, обеспечивающему 75% правильных ответов.

Для обеспечения единообразия в тестировании испытуемых из различных образовательных учреждений измерения проводили при помощи одной и той же переносной аппаратуры. Интерактивные компьютерные программы были установлены на ноутбуке ASUS, размер экрана составлял 210 × 330 мм.

*Оценка баланса бинокулярных и монокулярных механизмов.* Для оценки баланса бинокулярных и монокулярных механизмов пространственного восприятия был использован стереокинетический тест. Данный тест применялся Л.Н. Могилевым при исследовании взрослых испытуемых и в наших предыдущих работах (Могилев, 1982; Рожкова, Васильева, 2001; Васильева, Рожкова, 2010б; Васильева, 2011). Мы усовершенствовали методику применения данного теста, сделав возможным количественную оценку баланса бинокулярных и монокулярных механизмов, на основе введенного нами коэффициента В, и адаптировали для детей, дополнив рядом эталонов.



Тестовым стимулом служил плоский диск диаметром 12 см с эксцентрическим кольцевым черно-белым паттерном. Диск вращался со скоростью 60 об/мин. Расстояние от глаз испытуемого до тест-объекта было равно 3 м. Когда стимул был неподвижен, он воспринимался как плоский или почти плоский объект. При вращении стимула возникала сильная иллюзия объемности: диск воспринимался как конический объект, вершина которого была направлена либо к испытуемому, либо от него. В данном тесте разные механизмы противопоставлены друг другу: монокулярные механизмы порождают сильную стереокинетическую иллюзию объемности плоского объекта, а бинокулярные механизмы должны противодействовать этой иллюзии.

Задача испытуемого заключалась в оценке иллюзорной глубины (высоты виртуального конуса) в монокулярных и бинокулярных условиях наблюдения.

Для характеристики баланса бинокулярных и монокулярных влияний на пространственное восприятие вычисляли введенный нами коэффициент вклада бинокулярных механизмов  $B$  по формуле:

$$B = (h_m - h_b)/h_m,$$

где  $h_m$  — средняя для двух глаз монокулярная оценка глубины,  $h_b$  — бинокулярная оценка.

В работе (Рожкова, Васильева, 2001) представлены расчеты результирующего коэффициента вклада бинокулярных механизмов с учетом представлений о сложной структуре бинокулярной зрительной системы и возможные его варианты в зависимости от функционирования у человека монокулярных и бинокулярных подсистем зрения. Положительные значения коэффициента  $B$  соответствуют случаям уменьшения иллюзорной глубины при переходе от монокулярных условий наблюдения к бинокулярным и должны регистрироваться у испытуемых с нормальным бинокулярным зрением. В идеале коэффициент, отражающий вклад бинокулярных механизмов, должен быть равен +0.3. При “полной победе” бинокулярных механизмов  $h_b = 0$  и  $B = 1$ . Нулевые значения  $B$  свидетельствуют об отсутствии влияния бинокулярных механизмов вследствие недостаточного их развития либо нарушения функционирования, а отрицательные значения  $B$  — о принципиальной перестройке взаимоотношений между монокулярными механизмами на фоне бездействия бинокулярных. Таким образом, возрастная и индивидуальная вариабельность этого коэффициента у испытуемых, по-видимому, определяется вариациями весовых коэффициентов, отражающими степень развития и баланс разных подсистем в процессе индивидуального жизненного опыта.

*Статистический анализ* полученного цифрового материала проводили методами описательной и вариационной статистики с использованием программного пакета статистического анализа “StatSoft Statistica 6.0”. Весь цифровой материал до оценки значимости различий проверен на тип распределения при помощи критериев Колмогорова—Смирнова и Лиллиефорса с построением гистограмм. Достоверность отличий определяли по  $t$ -критерию Стьюдента. В случаях, когда распределение данных не соответствовало нормальному, мы использовали непараметрический  $U$ -критерий Манна—Уитни. Для определения влияния разных факторов на изучаемые показатели проводили дисперсионный анализ. С целью уточнения классификации групп и выявления наиболее значимых функциональных показателей для характеристики формирования механизмов бинокулярного зрения был применен дискриминантный анализ.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### *Возрастные показатели механизмов бинокулярного стереопсиса*

Величина порогов стереозрения во всех возрастных группах зависела от пространственной частоты стимула: при увеличении пространственной частоты от 0.4 до 0.7 цикл/град стереопороги понижались ( $p < 0.05$ ); в диапазоне частот от 1.0 до 2.0 цикл/град стереопороги были минимальными, а с повышением пространственной частоты от 2.8 до 4.0 цикл/град было зафиксировано их повышение ( $p < 0.05$ ). Во всех возрастных группах наименьшие пороги были зарегистрированы на частотах 1.0–2.0 цикл/град. При этом число испытуемых, имеющих порог ниже 10", неуклонно повышалось до 15 лет ( $p < 0.05$ ): 12% в возрастной группе 7–8 лет; 28% — в 9–10 лет; 51% — в 11–12 лет; 89% — в 14–15 лет; 82% — в 16–17 лет.

Особенности возрастной динамики стереопорогов, измеренных на пространственных частотах 1.0–2.0 цикл/град, показаны на рис. 5. Ход кривых свидетельствует о монотонном снижении порогов с возрастом.

Характер возрастных изменений стереопорогов заключался в статистически достоверном их снижении на возрастном интервале от 7 до 14–15 лет и увеличении остроты стереоскопического зрения на разных частотах в 3–4 раза ( $p < 0.05$ ). Это позволяет говорить о совершенствовании механизмов стереозрения на данном возрастном отрезке. В возрастной группе 16–18 лет выявлено небольшое, но достоверное ухудшение показателей стереоскопического зрения на частотах 1.4–4.0 цикл/град по сравнению с возрастной группой 14–15 лет.

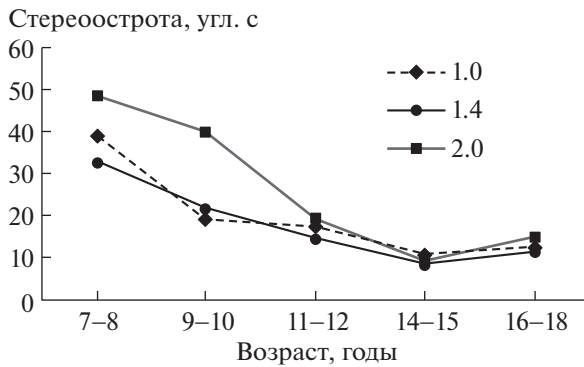


Рис. 5. Возрастная динамика стереоостроты.

#### Особенности возрастной динамики механизмов аккомодационно-окуломоторного обеспечения фузии

Проведенная оценка фузионных резервов показала, что наиболее быстрый темп увеличения конвергентных и дивергентных фузионных резервов на исследованном возрастном интервале характерен для детей младшего школьного возраста (рис. 6). В возрастной период от 7 до 11 лет конвергентные резервы нелинейно нарастают от  $14.0 \pm 3.1^\circ$  до  $18.2 \pm 3.8^\circ$  ( $p < 0.001$ ), а дивергентные от  $-6.2 \pm 1.5^\circ$  до  $-8.1 \pm 1.9^\circ$  ( $p < 0.01$ ). После некоторого пологого максимума, характерного для возрастного периода от 11 до 13 лет ( $18.2 \pm 3.6^\circ$  в 12 лет;  $18.6 \pm 3.9^\circ$  в 13 лет,  $p > 0.05$ ), отмечается постепенное снижение конвергентных резервов после 14 лет (от  $17.6 \pm 4.1^\circ$  в 14 лет до  $15.1 \pm 4.2^\circ$  в 18 лет,  $p < 0.05$ ). По средним данным дивергентные резервы, достигнув максимальных значений в 13 лет ( $-8.6 \pm 1.8^\circ$ ), с возрастом изменяются незначительно ( $p > 0.05$ ).

Результаты оценки фузионных резервов у учащихся 1, 4 и 10 классов при помощи синоптофора с использованием слайдов с СТС, представленные в работе (Вашенко, 2001), свидетельствуют о том, что наивысшие значения конвергентных фузионных резервов отмечены у обучающихся четвертого класса.

Опираясь на полученные в нашем исследовании данные и ориентировочные средние значения, полученные разными авторами на взрослых при измерениях на синоптофоре (Сомов, 1989; Рожков, Овсянникова, 2003), мы ввели следующие критерии для высоких и низких показателей фузионных резервов. Положительные резервы, не превышающие  $10^\circ$ , мы считали низкими, превосходящие  $20^\circ$  — высокими, находящиеся в диапазоне от 10 до  $20^\circ$  — средними; отрицательные резервы до  $-3^\circ$  — низкими, свыше  $-10^\circ$  — высокими, находящиеся в диапазоне от  $-3^\circ$  до  $-10^\circ$  — средними.

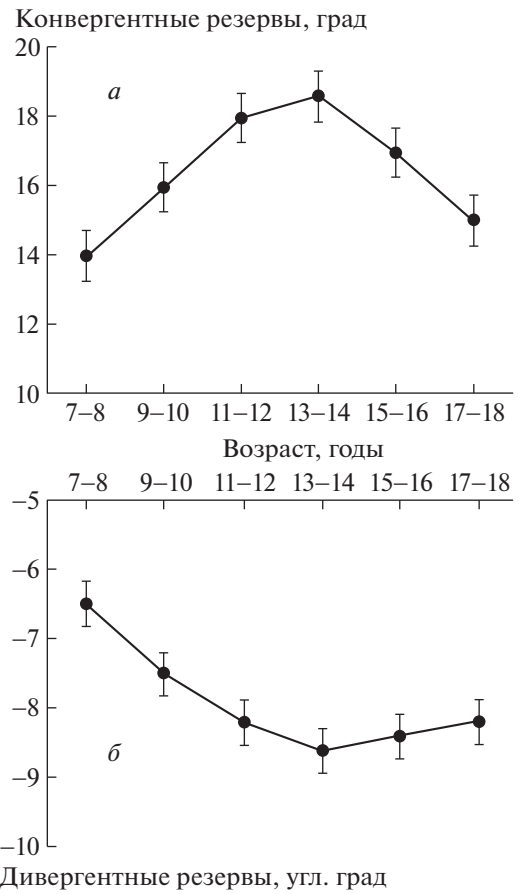
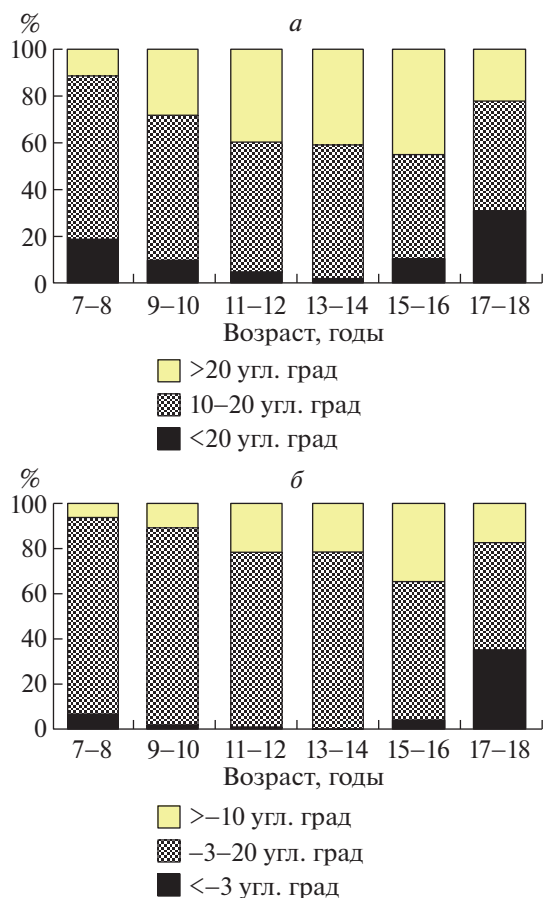


Рис. 6. Возрастная динамика конвергентных (а) и дивергентных (б) фузионных резервов.

Классифицируя полученные данные по выделенным критериям, можно видеть, что с увеличением возраста постепенно уменьшается доля детей с низкими показателями конвергентных и дивергентных фузионных резервов (рис. 7).

В возрастном интервале от 6 до 16 лет число детей с высокими конвергентными фузионными резервами (более  $20^\circ$ ) по мере взросления неуклонно нарастало (0% — в 6 лет; 28% — в 9–10 лет; 40% — в 13–14 лет; 45% — в 15–16 лет,  $p < 0.05$ ), при этом количество детей с низкими конвергентными резервами (менее  $10^\circ$ ) уменьшалось до 13–14 лет (34% — в 6 лет; 9% — в 9–10 лет; 2% — в 13–14 лет,  $p < 0.05$ ). В возрастной группе 17–18 лет наблюдалось уменьшение числа обучающихся с высокими конвергентными резервами (до 22%,  $p < 0.05$ ) и увеличение с низкими (до 30%,  $p < 0.05$ ). Иная закономерность выявлена в динамике высоких и низких значений дивергентных фузионных резервов. Установлено, что число детей с низкими дивергентными резервами в возрастном интервале от 6 до 16 лет существенно не менялось (1–3%), в то же время с высокими с возрастом неуклонно увеличивалось до 15–16 лет



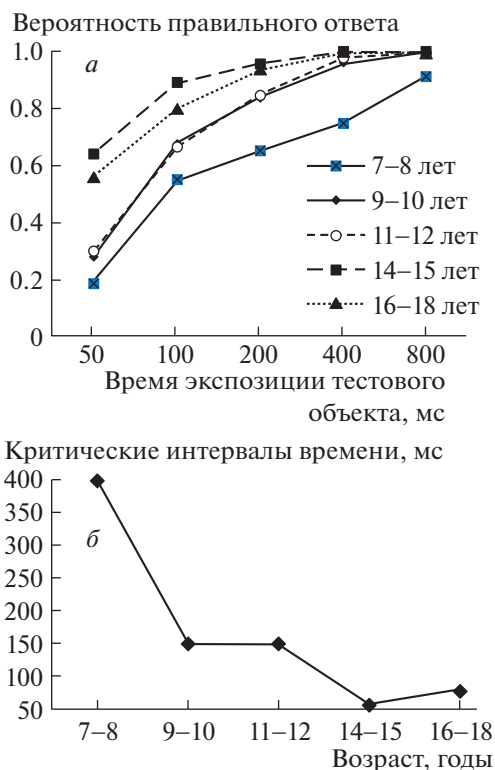
**Рис. 7.** Процентные соотношения детей с разными показателями конвергентных (а) и дивергентных (б) фузионных резервов.

(2% – в 6 лет; 11% – в 9–10 лет; 21% – в 13–14 лет; 35% – в 15–16 лет,  $p < 0.05$ ).

#### Возрастные изменения скорости бинокулярной интеграции

В период от 7 до 15 лет происходит неуклонное повышение скорости бинокулярной интеграции при переходе к более старшему возрасту (рис. 8, а). Кривые зависимости средних значений вероятности правильного ответа от времени экспозиции для 9–10 и 11–12 лет практически совпадают. После 16 лет обнаружена тенденция к снижению способности к успешному комбинированию информации, содержащейся в левом и правом сетчаточных изображениях ( $0.05 < p < 0.1$ ).

Опираясь на средние данные, можно констатировать, что ускорение интегративных процессов происходит дважды: в младшем школьном до 9–10 лет и подростковым возрасте с 12 до 14–15 лет. При анализе минимального времени предъявления фрагментов тест-объектов, обеспечивающего 75% правильных ответов, установле-



**Рис. 8.** Возрастная динамика скорости бинокулярной интеграции: а – кривые зависимости средних значений вероятности правильного ответа от времени экспозиции; б – критические интервалы времени для осуществления бинокулярной интеграции у детей разных возрастных групп.

ны возрастные критические интервалы времени для осуществления бинокулярной интеграции (рис. 8, б): в 7–8 лет – 400 мс; в 9–10 лет и 11–12 лет – 150 мс; в 14–15 лет – 60 мс; в 16–18 лет – 80 мс.

#### Возрастная динамика баланса бинокулярных и монокулярных механизмов пространственного восприятия

В процессе анализа данных установлено, что во всех возрастных группах индивидуальный разброс показателя  $B$  был достаточно большим: от  $-1.3$  до  $+1.0$ . В каждой группе в бинокулярных условиях наблюдения встречались случаи полного отсутствия иллюзии, т.е. вращающийся диск мог восприниматься как плоский объект. Число таких случаев было наибольшим в возрастной группе 9–10 лет (18% от общей численности группы). В других возрастных группах на долю испытуемых с полным отсутствием стереокинетической иллюзии при бинокулярном наблюдении приходилось от 1 до 8%.

Анализируя возрастную динамику средних показателей коэффициента  $B$  (рис. 9), можно за-



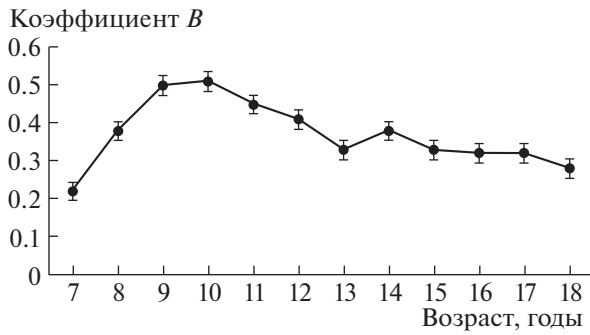


Рис. 9. Возрастная динамика баланса бинокулярных и монокулярных механизмов.

ключить, что в возрастном интервале от 7 до 9 лет имеет место быстрое развитие бинокулярных механизмов пространственного зрительного восприятия. Средние значения коэффициента  $B$  в этот возрастной период увеличиваются от  $0.22 \pm 0.27$  до  $0.50 \pm 0.28$  ( $p < 0.05$ ).

В возрасте от 10 до 12 лет коэффициент  $B$  в среднем остается на высоком уровне ( $0.51 \pm 0.25$  в 10 лет;  $0.48 \pm 0.20$  – в 11 лет;  $0.43 \pm 0.21$  – в 12 лет;  $p > 0.05$ ). В возрастном интервале от 13 до 17 лет значения  $B$  приближаются к 0.3.

Соотношение низких и высоких значений коэффициента  $B$  в разные возрастные периоды меняется: к подростковому возрасту заметно уменьшается количество испытуемых с отрицательными и нулевыми значениями и увеличивается число детей с  $B \geq 0.3$  (рис. 10).

*Общий анализ массива полученных данных*

Анализируя весь массив полученных данных, можно отметить, что в исследованных возрастных группах индивидуальный разброс показателей весьма велик. Наглядное представление о вариабельности индивидуальных показателей демонстрируют рис. 11 и 12, на которых приведен разброс индивидуальных значений стереопоров, измеренных на разных пространственных частотах, и фузионных резервов соответственно.

Следует отметить, что неоднородность групп школьников наиболее выражена на начальном этапе обучения и в старших классах школы. Наименьший разброс индивидуальных показателей отмечался в возрастном интервале от 10 до 14 лет.

Анализ индивидуальных показателей сформированности разных механизмов у конкретного ребенка показал, что они могут различаться и быть независимыми от показателей остроты зрения. В качестве примера на рис. 13 приведены индивидуальные профили сформированности механизмов бинокулярного зрения в соответствии с

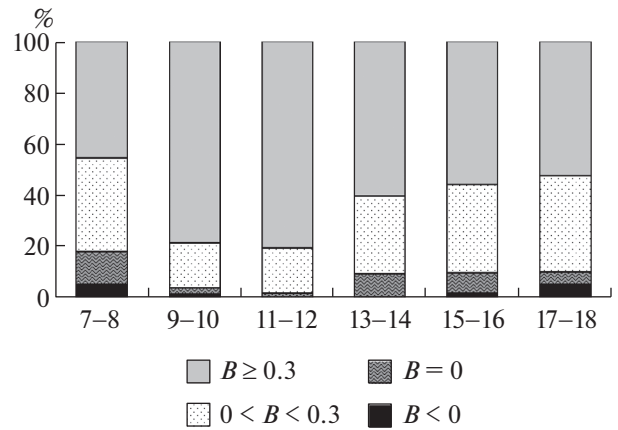


Рис. 10. Процентные соотношения детей с высокими и низкими значениями  $B$  в разных возрастных группах.

выделенными показателями у двух школьников 9 и 13 лет.

У обоих испытуемых монокулярные показатели остроты зрения левого и правого глаза находились в пределах нормативных значений для своей возрастной группы. Допуская наличие разных индивидуальных вариантов профилей сформированности бинокулярных зрительных функций,

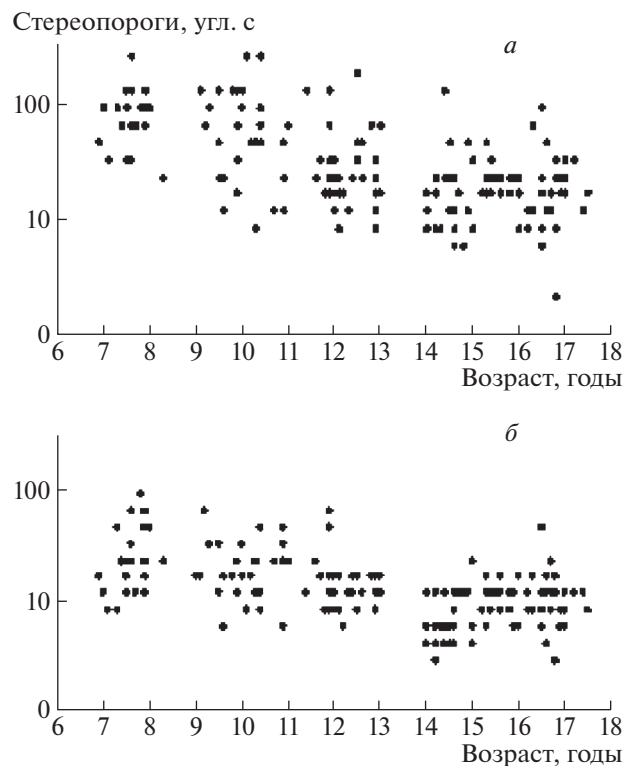


Рис. 11. Разброс индивидуальных значений стереопоров для пространственных частот 0.5 (а) и 1.4 (б) цикл/град.

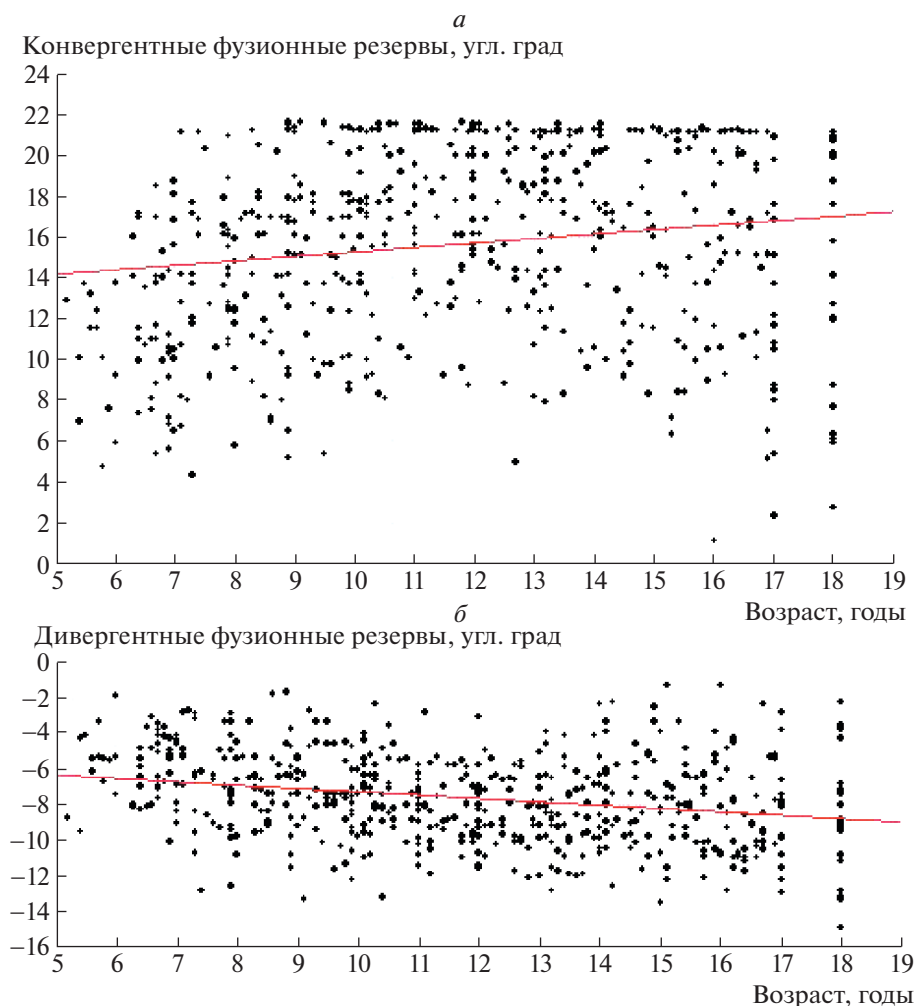


Рис. 12. Разброс индивидуальных значений конвергентных (*a*) и дивергентных (*b*) фузионных резервов.

отметим, что приведенные на рис. 13 графики в некоторой степени отражают общую тенденцию: у многих детей в период роста и развития организма структурные преобразования в зрительной системе выражаются в том, что различные индивидуальные бинокулярные показатели могут быть как выше, так и ниже среднестатистических значений по своей возрастной группе.

Таблица 1. Информативность признаков, вошедших в дискриминантную модель

Показатели	Критерий F	Значение $p$	Толерантность
КФР	7.07	0.001	0.89
БО	8.51	0.0002	0.81
ОСЗ <sub>0.7</sub>	11.22	0.00002	0.73
БИ <sub>400</sub>	5.22	0.006	0.65
БОЗ <sub>6</sub>	3.92	0.021	0.90
БИ <sub>100</sub>	3.98	0.020	0.45

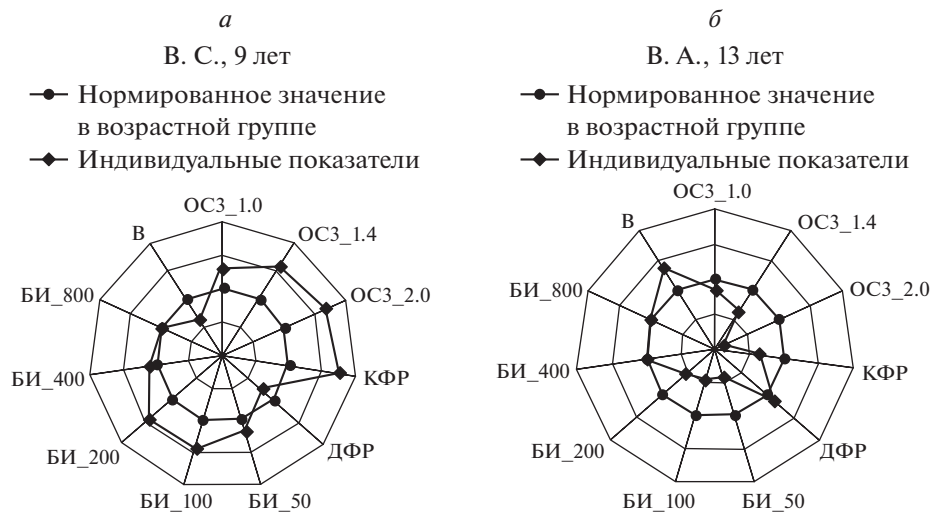
Для определения паттерна наиболее информативных функциональных показателей применительно к оценке развития бинокулярной зрительной системы у детей и построения дискриминантной модели был применен дискриминантный анализ. Группирующим признаком была выбрана принадлежность испытуемых к одной из исследуемых групп: 1 – 7–10 лет; 2 – 11–14 лет; 3 – 15–18 лет. Установлено, что самыми информативными показателями, определяющими принадлежность к одной из исследуемых групп, оказались шесть переменных, имеющих наибольшие отношения межгрупповой и внутригрупповой дисперсий (табл. 1):

КФР – конвергентные фузионные резервы;

БО – бинокулярная оценка высоты виртуального конуса;

ОСЗ<sub>0.7</sub> – острота стереоскопического зрения для пространственной частоты 0.7 цикл/град;

БОЗ<sub>6</sub> – бинокулярная острота зрения для близости;



**Рис. 13.** Круговые диаграммы, демонстрирующие соотношение групповых и индивидуальных функциональных показателей бинокулярной зрительной системы (в относительных единицах): *a* – исп. В.С., 9 лет; *б* – исп. В.А., 13 лет  
 ОСЗ – острота стереоскопического зрения для пространственных частот 1.0, 1.4, 2.0 цикл/град; КФР – конвергентные фузионные резервы; ДФР – дивергентные фузионные резервы; БИ – показатели скорости бинокулярной интеграции для времени экспозиции 50, 100, 200, 400 и 800 мс; В – баланс бинокулярных и монокулярных механизмов.

$БИ_{100}$ ,  $БИ_{400}$  – показатели скорости бинокулярной интеграции для времени экспозиции 100 и 400 мс.

В ходе дискриминантного анализа были получены следующие дискриминантные уравнения (канонические корни  $R_1 = 0.952372$ ,  $x^2 = 555.6767$ ,  $p < 0.000000$ ;  $R_2 = 0.423159$ ,  $x^2 = 42.6188$ ,  $p < 0.002295$ ):

$$F_{1 \text{ группа (7-10 лет)}} = 0.269КФР + 0.468БО + 0.094ОСЗ_{0.7} + 182.015БИ_{400} + 7.044 БОЗ_6 - 29.093БИ_{100}$$

$$F_{2 \text{ группа (11-14 лет)}} = 0.196КФР + 0.568БО + 0.141ОСЗ_{0.7} + 170.501БИ_{400} + 5.459 БОЗ_6 - 34.628БИ_{100}$$

$$F_{3 \text{ группа (15-18 лет)}} = -0.165КФР + 0.933БО + 0.161ОСЗ_{0.7} + 147.603БИ_{400} + 1.804БОЗ_6 - 34.191БИ_{100}$$

Как следует из полученных уравнений, с изменением возраста закономерно наиболее связаны показатели, вошедшие в дискриминантную функцию.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Использование в работе комплекса методов позволило получить значительный массив данных, иллюстрирующих закономерности формирования механизмов пространственного зрительного восприятия у детей в возрастном интервале от 6 до 18 лет, сроки и темпы гетерохронного созревания отдельных механизмов, возраст дости-

жения максимального уровня перед намечающимся ослаблением функций.

Данные проведенного исследования показывают, что развитие и совершенствование бинокулярных зрительных механизмов продолжается в течение длительного периода. Наиболее быстрые темпы увеличения вклада бинокулярных механизмов в пространственное восприятие и улучшения различных функциональных показателей бинокулярного зрения на исследованном возрастном интервале отмечаются в период от 6–7 до 9–10 лет. По средним показателям, фузионные резервы достигают максимальных значений в 12–13 лет, острота бинокулярного стереозрения и скорость бинокулярной интеграции – в 14–15 лет.

Важной теоретической базой, обеспечивающей понимание закономерностей развития зрительных механизмов в онтогенезе, является теория системогенеза (Анохин, 1975). Неодновременное и избирательное созревание отдельных элементов и постепенная консолидация функциональной системы позволяют достигать полезного приспособительного результата задолго до того, как все ее компоненты получают окончательное структурное оформление. Основу гетерохронности развития бинокулярных зрительных функций составляют разная скорость и направленность дифференцировочных процессов в клеточных популяциях. Известно, что участвующие в анализе трехмерной формы на основе бинокулярной диспаратности затылочные, теменные, височные, лобные области коры мозга (Gulyás et al., 1994; Nishida et al., 2001; Naganuma et al., 2005; Fischmeister, Bauer, 2006) имеют длительные перио-

ды морфофункционального созревания. Исследование корковых формаций большого мозга, участвующих в реализации зрительных функций, показало, что в течение всего восходящего онтогенеза от рождения до 20 лет при высокой индивидуальной вариабельности в коре больших полушарий нарастает объем внутрикоровых волокон, что свидетельствует о постепенном увеличении метаболического ресурса для наращивания новых межнейронных контактов и повышения эффективности обработки информации (Цехмистренко и др., 2017). В динамике постнатального развития микроструктуры зон неокортекса большого мозга, связанных со зрительно-пространственным восприятием, на исследованном нами возрастном интервале значимые количественные изменения кластерной организации коры происходят в период от 5–6 до 8–9 лет (Цехмистренко и др., 2019). В 11–12 лет наблюдается более зрелый тип вовлечения дорсолатеральной префронтальной коры, приводящий к повышению эффективности зрительного опознания по сравнению с детьми младшего возраста (Фарбер и др., 2015).

Высокая эффективность вклада бинокулярных механизмов в пространственное восприятие к концу младшего школьного возраста и постепенное ослабление в ходе индивидуального развития является отражением принципа биологической надежности организма, в соответствии с которым биологическая надежность обеспечивается не только высоким приспособительным эффектом гетерохронного формирования функциональных систем, но и такими свойствами живой системы, как избыточность элементов, их дублирование, взаимозамещаемость, быстрота возврата к относительному постоянству и динамичность отдельных звеньев системы.

Полученные нами результаты, свидетельствующие об улучшении бинокулярных функциональных показателей с возрастом, согласуются с имеющимися в литературе данными о совершенствовании других механизмов зрительной системы на этом возрастном этапе и положительной динамике целого ряда зрительных показателей — остроты зрения, точности зрительного восприятия сложных объектов, размеров поля зрения, окуломоторной активности, способности к различению цветов (Рыбалко, 1969; Рожкова и др., 2001; Медведев, Шошина, 2004; Жукова, Циркин, 2008; Безруких и др., 2019; Knoublauch et al., 2001). При этом в ряде исследований было установлено, что, как правило, показатели обнаруживают быстрый рост в начале школьного периода и достигают максимальных значений к подростковому возрасту, после чего сохраняются на достигнутом уровне, либо медленно снижаются.

Использованный в нашей работе комплексный подход позволил выявить степень относи-

тельной зрелости элементов бинокулярной зрительной системы, а также характер их взаимодействия в процессе возрастного индивидуального развития. Согласно данным дискриминантного анализа, нами было установлено, что наибольшее диагностическое значение для характеристики возрастных особенностей пространственного зрительного восприятия у детей имеют конвергентные фузионные резервы, данные стереокINETического теста в бинокулярных и монокулярных условиях наблюдения, острота стереоскопического зрения для пространственной частоты 0.7 цикл/град, бинокулярная острота зрения для близи, показатели успешности бинокулярной интеграции для времени экспозиции тестовых объектов в 100 и 400 мс.

Проведенное исследование показало, что развитие бинокулярной зрительной системы — это длительный процесс, с одной стороны, подчиненный определенным общим закономерностям и направленный на расширение функционального диапазона, и достижение высокой эффективности функционирования, а с другой — в значительной степени обусловленный влиянием наследственности и социально-экономическими факторами, в ходе которого складывается индивидуальное своеобразие.

Обучение в школе является одним из сложных периодов в жизни ребенка как в физиологическом, так и социо-психологическом плане. Адаптация к комплексу факторов, связанных с систематическим обучением и возрастающими умственными и зрительными нагрузками, сопровождается значительным напряжением во всех системах организма, в том числе и зрительной. Очевидно, что результирующую возрастную динамику исследованных зрительных функций определяют и онтогенетические изменения, и условия функционирования зрительной системы. В связи с этим на восходящей фазе онтогенеза естественно наблюдать индивидуальный характер качественных преобразований созревающих функций и проявления сенситивных периодов и, соответственно, значительную вариабельность индивидуальных показателей бинокулярной зрительной системы.

Анализ индивидуальных вариантов функционирования бинокулярной зрительной системы у разных школьников подтвердил, что оптимальные режимы деятельности функциональных систем организма не универсальны (не едины для всех сверстников), они определяются непрерывными динамическими процессами, протекающими во времени в сложной сети коадаптированных регуляторных механизмов. Это требует комплексного подхода к анализу реальных функциональных возможностей системы пространственного зрительного восприятия конкретного ребенка не только на основе количественной оценки

отдельных бинокулярных показателей, отражающих зрелость отдельных механизмов, но и качественной характеристики особенностей их взаимодействия и функционирования. Если качественная специфика функционирования физиологических систем на отдельных этапах развития остается неучтенной, то понятие возрастной нормы перестает отражать реальные функциональные возможности организма в определенные возрастные периоды (Безруких, Фарбер, 2014). Сочетание возрастного и индивидуального подходов к изучению особенностей функционирования ребенка может обеспечить разработку адекватных коррекционных и педагогических мер, способствующих полноценному здоровью и нормальному развитию организма ребенка.

Установленная нами тенденция к снижению функциональных показателей бинокулярного зрения в юношеском возрасте может быть связана с естественными возрастными процессами постепенной потери пластичности зрительных механизмов после их полного созревания, а также с влиянием различных неблагоприятных факторов.

## ВЫВОДЫ

– Общий характер возрастных изменений порогов стереовосприятия в период от 7 до 14–15 лет свидетельствует о совершенствовании механизмов бинокулярного стереопсиса на данном возрастном интервале. На протяжении этого периода острота стереоскопического зрения на разных пространственных частотах увеличивается в 3–4 раза.

– На интервале от 6 до 16 лет с увеличением возраста постепенно повышается доля детей с высокими конвергентными фузионными резервами. Относительно быстрое развитие механизмов аккомодационно-окуломоторного обеспечения фузии осуществляется до 11 лет.

– Возрастные изменения показателей скорости бинокулярной интеграции в период от 7 до 18 лет свидетельствуют о том, что ускорение интегративных процессов формирования единого бинокулярного образа происходит дважды: в младшем школьном возрасте с 7 до 9–10 лет и в подростковом возрасте с 12 до 14–15 лет.

– По результатам стереокинетического теста выявлено постепенное нарастание с возрастом вклада бинокулярных механизмов в пространственное зрительное восприятие и достижение высокой эффективности их функционирования к концу младшего школьного возраста. В ходе дальнейшего развития наблюдается тенденция к ослаблению влияния бинокулярных механизмов, выраженность которой у разных школьников значительно варьирует.

– Выбранный комплекс методов для оценки функциональных показателей бинокулярного зрения можно использовать в целях дифференциальной диагностики нарушений бинокулярного зрения на основе полученных возрастных данных, контроля за динамикой индивидуального развития и разработки программ оптимизации и коррекции функционального состояния бинокулярной зрительной системы.

Автор выражает благодарность главному научному сотруднику ИППИ РАН Г.И. Рожковой за обсуждение работы и консультации при написании статьи, профессору кафедры медицинской биологии с курсом микробиологии и вирусологии ЧГУ им. И.Н. Ульянова В.А. Козлову за техническую помощь при проведении дискриминантного анализа данных.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор данной статьи подтвердил отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев С.В. Нейронные сети, обеспечивающие бинокулярное зрение. *Нейротехнологии*. Коллективная монография под ред. Ю.Е. Шелепина, В.Н. Чихмана. СПб.: ООО “Издательство ВВМ”, 2018. С. 186–205.
- Анохин П.К. *Очерки по физиологии функциональных систем*. М.: Медицина, 1975. 447 с.
- Базарный В.Ф. *Зрение у детей. Проблемы развития*. Новосибирск: Наука, 1991. 138 с.
- Безруких М.М., Иванов В.В., Голландцева А.И. Возрастные особенности окуломоторной активности при чтении текста с различных электронных устройств отображения информации у подростков. *Новые исследования*. 2019. № 4 (60). С. 4–29.
- Безруких М.М., Фарбер Д.А. Актуальные проблемы физиологии развития ребенка. *Новые исследования*. 2014. № 3 (40). С. 4–19.
- Белозеров А.Е. *Разработка и внедрение компьютерных функциональных методов в офтальмологии*. Дисс. докт. биол. наук. М. 2003. 285 с.
- Бондарко В.М. Острота зрения и краудинг-эффект у взрослых и детей различного возраста. *Нейротехнологии*. Коллективная монография под ред. Ю.Е. Шелепина, В.Н. Чихмана. СПб.: ООО “Издательство ВВМ”, 2018. С. 46–116.
- Васильева Н.Н. Особенности взаимодействия монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного восприятия у слабовидящих детей. *Вестник офтальмологии*. 2011. Т. 127. № 1. С. 19–21.
- Васильева Н.Н. *Развитие бинокулярных зрительных функций у детей дошкольного и младшего школьного возраста*. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М.: 2002. 22 с.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Возрастная динамика фузионных резервов, измеренных при помощи



- циклопических тест-объектов с маркерами. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 1. С. 40–50.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Возрастные изменения взаимодействия монокулярных и бинокулярных механизмов пространственного восприятия. *Сенсорные системы*. 2010а. Т. 24. № 1. С. 18–26.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И., Белозеров А.Е. Возрастная динамика остроты стереозрения у школьников. *Сенсорные системы*. 2010б. Т. 24. № 3. С. 179–187.
- Вашенко Д.И. *Возрастная динамика бинокулярных зрительных функций у детей в процессе школьного обучения*. Автореф. дисс. канд. биол. наук. М. 2001. 23 с.
- Глезер В.Д., Праздников Н.В., Леушина Л.И., Невская А.А., Павловская М.Б. Опознание зрительных образов. *Физиология зрения*. М.: Наука, 1992. С. 466–527.
- Жукова Е.А., Циркин В.И. Две тенденции в возрастной динамике остроты зрения мальчиков и девочек на протяжении обучения в средней школе. *Сенсорные системы*. 2008. Т. 22. № 3. Р. 241–247.
- Жукова Е.А., Шитова О.В., Коротаева К.В., Попова Л.И. Анализ индивидуальной динамики изменения остроты зрения вблизи и вдаль у детей первых 4 лет обучения в школе. *Вятский медицинский вестник*. 2018. № 4 (60). С. 49–54.
- Котлярский А.М. *Функционально-системный анализ бинокулярного зрения*. Автореф. дисс. докт. биол. наук. М.: 1982. 66 с.
- Кропман И.Л. *Физиология бинокулярного зрения и строения его при содружественном косоглазии*. Л.: Медицина. 1966. 206 с.
- Леушина Л.И. О раздельности каналов для опознания формы и оценки размера изображения. *Проблемы физиологической оптики*. М., Л.: 1967. Т. 14. С. 128–134.
- Медведев Л.Н., Шошина И.И. Влияние возраста на проявление зрительной иллюзии Поггендорфа. *Сенсорные системы*. 2004. Т. 18. № 4. С. 326–330.
- Могилев Л.Н. *Механизмы пространственного зрения*. М.: Наука, 1982. 112 с.
- Морозова Л.В. Специфика психофизиологического обеспечения зрительного восприятия детей 7–8 лет с разным темпом его формирования. *Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Медико-биологические науки*. 2016. № 1. С. 63–72.
- Николаева Е.И., Джалаева А.К. Сенсомоторная интеграция в подростковом возрасте. Обзор литературных источников. *Вестник психофизиологии*. 2020. № 3. С. 11–25.
- Пигарев И.Н. Экстрастриарные зрительные зоны коры мозга. *Физиология зрения*. Под ред. Бызова А.Л. М.: Наука, 1992. С. 345–400.
- Плосконос Г.А. *Функциональные подсистемы бинокулярного зрения и их взаимодействие у детей*. Автореф. дисс. канд. мед. наук. М.: 1989. 21 с.
- Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. *Стереоскопия в кино, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь*. М.: Парадиз, 2003. 136 с.
- Рожкова Г.И. Бинокулярное зрение. *Физиология зрения*. Под ред. Бызова А.Л. М.: Наука, 1992. С. 586–664.
- Рожкова Г.И., Васильева Н.Н. Взаимодействие бинокулярного и стереокинетического механизмов восприятия глубины у детей с нормальным и нарушенным бинокулярным зрением. *Сенсорные системы*. 2001. Т. 15. № 1. С. 61–68.
- Рожкова Г.И., Васильева Н.Н. Компьютерный метод оценки фузионных резервов с объективным контролем нарушения фузии. *Физиология человека*. 2010. Т. 36. № 3. С. 135–137.
- Рожкова Г.И., Васильева Н.Н., Токарева В.С. Бинокулярная интеграция у детей дошкольного и младшего школьного возраста. *Сенсорные системы*. 2002. Т. 16. № 3. С. 221–229.
- Рожкова Г.И., Матвеев С.Г. *Зрение детей: проблемы оценки и функциональной коррекции*. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Рожкова Г.И., Токарева В.С., Родионова Е.И., Вашенко Д.И., Васильева Н.Н. Возрастная динамика остроты зрения у школьников. III. Соотношение монокулярных и бинокулярных показателей. *Сенсорные системы*. 2001. Т. 15. № 3. С. 266–275.
- Рыбалко Е.Ф. *Возрастные особенности объема и структуры зрительного поля*. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. 135 с.
- Сомов Е.Е. *Методы офтальмоэргономики*. Л.: Наука, 1989. 157 с.
- Супин А.Я. *Нейронные механизмы зрительного анализа*. М.: Наука, 1974. 192 с.
- Супин А.Я. *Нейрофизиология зрения млекопитающих*. М.: Наука, 1981. 252 с.
- Фарбер Д.А., Бетелева Т.Г. Формирование системы зрительного восприятия в онтогенезе. *Физиология человека*. 2005. Т. 31. № 5. С. 26–36.
- Фарбер Д.А., Курганский В.А., Петренко Н.Е. Мозговая организация преднастройки к зрительному опознанию у детей предпубертального возраста. *Физиология человека*. 2015. Т. 41. № 5. С. 5–15.
- Цехмистренко Т.А., Васильева В.А., Шумейко Н.С. Структурные преобразования коры большого мозга у детей и подростков. *Физиология человека*. 2017. Т. 43. № 2. С. 5–14.
- Цехмистренко Т.А., Обухов Д.К., Васильева В.А., Мазлоев А.Б., Шумейко Н.С. Структурные возрастные преобразования нейронных группировок коры большого мозга и мозжечка у детей. *Журнал анатомии и гистопатологии*. 2019. № 8 (4). С. 42–48.
- Шевелев И.А. *Нейроны зрительной коры. Адаптивность и динамика рецептивных полей*. М.: Наука, 1984. 232 с.
- Blake R., Fox R. The psychophysical inquiry into binocular summation. *Jbid.* 1973. V. 14. P. 161–185.
- Chen A.H., Abidin A.H.Z. Vergence and accommodation system in Malay primary school children. *Malaysian J. Med. Sci.* 2002. V. 9 (1). P. 9–15.
- Cogan A.I. Human binocular interaction: towards a neural model. *Vision Res.* 1987. V. 27 (12). P. 2125–2139. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90127-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90127-1)

- Dyea M.W.G., Bavelierb D. Differential development of visual attention skills in school-age children. *Vision Res.* 2010. V. 50 (4). P. 452–459.  
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.010>
- Fischmeister F.P.S., Bauer H. Neural correlates of monocular and binocular depth cues based on natural images: A LORETA analysis. *Vision Res.* 2006. V. 46. P. 3373–3380.  
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.04.026>
- Gulyás B., Roland P., Heywood C., Popplewell D., Cowey A. Visual form discrimination from luminance or disparity cues: functional anatomy by PET. *Neuroreport.* 1994. V. 5 (17). P. 2367–2371.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-199411000-00039>
- Howard I.P., Rogers B.J. *Perceiving in depth. V. 2. Stereoscopic vision.* Oxford. Oxford University Press, 2012. 635 p.
- Hubel D.H., Livingston M.C. Segregation of form, color and stereopsis in primate area 18. *J. Neurosci.* 1987. V. 7 (1). P. 3378–3415.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.07-11-03378.1987>
- Hubel D.H., Wiesel T.N. Receptive fields, binocular interaction, and functional architecture in the cat visual cortex. *Ibid.* 1962. V. 160. P. 105–256.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837>
- Irving E.L., Steinbach M.J., Lillakas L., Babu R.J., Hutchings N. Horizontal Saccade Dynamics across the Human Life Span. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* 2006. V. 47 (6). P. 2478–2484.  
<https://doi.org/10.1167/iovs.05-1311>
- Knoublauch K., Vital-Durand F., Barbur J.L. Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision Res.* 2001. V. 41. № 1. P. 23–36.  
[https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(00)00205-4)
- Naganuma T., Nose I., Inoue K., Takemoto A., Katsuyama N., Taira M. Information processing of geometrical features of a surface based on binocular disparity cues: an fMRI study. *Neuroscience Research.* 2005. V. 51 (2). P. 147–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.neures.2004.10.009>
- Namaeh M., Scheiman M.M., Yaramothu Ch., Alvarez T.L. A Normative Study of Objective Measures of Disparity Vergence and Saccades in Children 9 to 17 Years Old. *Optometry and Vision Science.* 2020. V. 97 (6). P. 416–423.  
<https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001515>
- Nishida Y., Hayashi O., Iwami T., Kimura M., Kani K., Ito R., Shiino A., Suzuki M. Stereopsis-processing regions in the human parieto-occipital cortex. *Neuroreport.* 2001. V. 12 (10). P. 2259–2263.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-200107200-00043>
- Oduntan A., Al-Chamdi M., Al-Dosari H. Randot stereoacuity norms in a population of Saudi Arabian children. *Clinical and Experimental Optometry.* 1998. № 5. P. 193–197.  
<https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.1998.tb06734.x>
- Rogers B. *Perception: a very short introduction.* OUP Oxford. University press, 2017. 162 p.
- Tyler C.W. Sensory processing of binocular disparity. *Vergence eye movements: Basic and clinical aspects.* Boston. Butterworths, 1983. P. 199–295.
- Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol. Rev.* 1986. V. 93 (3). P. 262–282.

## Analysis of the functions of binocular visual systems in schoolchildren

N. N. Vasilyeva<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup> Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences  
 127051 Moscow, B. Karetny per. 19, Russia

<sup>#</sup> E-mail: nn\_vasilyeva@mail.ru

Presented herein is the analysis of the results of a systematic study of the development of binocular vision (BV) in schoolchildren. The study involved 750 schoolchildren aged 6 to 18 years. The age-related dynamics of functional parameters of the BV were assessed: the acuity of binocular stereovision, convergent and divergent fusional reserves, the speed of binocular integration, the balance of binocular and monocular mechanisms of spatial perception. Comprehensive comparative analysis of BV indicators at different ages made it possible to clarify the timing and rates of heterochronous maturation of individual mechanisms and the age of reaching the maximum level before the outlined weakening of functions. It has been established that the fastest rates of increase in the contribution of binocular mechanisms to spatial perception and improvements towards various indicators of biological health are characteristic for the period from 6–7 to 9–10 years. According to average data, fusional reserves reach maximum values at 12–13 years old, binocular stereovision acuity and binocular integration rate at 14–15 years old. A tendency towards decrease in the functional parameters of BV in adolescence was revealed, which may be associated with the natural age-related processes of the gradual loss of plasticity of visual mechanisms after their full maturation, as well as with the influence of various unfavorable factors. In the course of discriminant analysis of the data, the indicators that have the greatest diagnostic value for characterizing the age-related characteristics of spatial visual perception in children were determined: convergent fusional reserves, stereoscopic visual acuity for a spatial frequency of 0.7 cpd, binocular near-sighted visual acuity, indicators of success in binocular integration within exposure time of test objects between 100 and 400 ms, and the ratio of the stereokinetic test data in binocular and monocular observation conditions.

*Key words:* vision of children, age dynamics, binocular visual system, spatial perception, stereoacuity, fusional reserves, binocular integration

## REFERENCES

- Alekseenko S.V. Neironnye seti, obespechivayushchie binokulyarnoe zrenie [Neural networks that provide binocular vision]. *Neirotekhnologii* [Neurotechnology]. Kollektivnaya monografiya pod red. Yu.E. Shelepina, V.N. Chikhmana. St. Petersburg, OOO "Izdatel'stvo VVM", 2018. P. 186–205 (in Russian).
- Anokhin P.K. Essays on the physiology of functional systems. Moscow: Meditsina, 1975. 447 p (in Russian).
- Bazarnyi V.F. Vision in children. Development problems. Novosibirsk: Nauka, 1991. 138 p (in Russian).
- Bezrukikh M.M., Ivanov V.V., Gollandtseva A.I. Vozrastnye osobennosti okulomotornoi aktivnosti pri chtenii teksta s razlichnykh elektronnykh ustroystv otobrazheniya informatsii u podrostkov [Age peculiarities of eye movements when reading texts from various electronic devices in adolescents]. *Novye issledovaniya* [New research]. 2019. V. 4 (60). P. 4–29 (in Russian).
- Bezrukikh M.M., Farber D.A. Aktual'nye problemy fiziologii razvitiya rebenka. [Actual problems of the physiology of child development]. *Novye issledovaniya*. [New research]. 2014. V. 3 (40). P. 4–19 (in Russian).
- Belozеров A.E. Razrabotka i vnedrenie komp'yuternykh funktsional'nykh metodov v oftal'mologii. [Development and implementation of computer functional methods in ophthalmology Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 2003. 285 p (in Russian).
- Bondarko V.M. Ostrota zreniya i krauding-effekt u vzroslykh i detei razlichnogo vozrasta [Visual acuity and crowding effect in adults and children of different ages]. *Neirotekhnologii* [Neurotechnology]. Kollektivnaya monografiya pod red. Yu.E. Shelepina, V.N. Chikhmana. SPb.: OOO "Izdatel'stvo VVM". 2018. P. 46–116 (in Russian).
- Vasilyeva N.N. Osobennosti vzaimodeistviya monokulyarnykh i binokulyarnykh mekhanizmov prostranstvennogo vospriyatiya u slabovidyashchikh detei [Features of the interaction of monocular and binocular mechanisms of spatial perception in visually impaired children]. *Vestnik oftal'mologii* [Annals of Ophthalmology]. 2011. V. 127 (1). P. 19–21 (in Russian).
- Vasilyeva N.N. Razvitie binokulyarnykh zritel'nykh funktsii u detei doskol'nogo i mladshogo shkol'nogo vozrasta [The development of binocular visual functions in pre-school and primary school children. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 2002. 22 p (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Vozrastnaya dinamika fuzionnykh rezervov, izmerennykh pri pomoshchi tsiklopesicheskikh test-ob"ektov s markerami [Age dynamics of fusional reserves assessed by means of cyclopean stimuli with markers]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2009. V. 23 (1). P. 40–50 (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Vozrastnye izmeneniya vzaimodeistviya monokulyarnykh i binokulyarnykh mekhanizmov prostranstvennogo vospriyatiya [Age dynamics of interaction between monocular and binocular mechanisms of spatial perception]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2010. V. 24 (1). P. 18–26 (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I., Belozеров A.E. Vozrastnaya dinamika ostroty stereozreniya u shkol'nikov [Age dynamics of stereoacuity in school children]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2010. V. 24 (3). P. 179–187.
- Vashchenko D.I. Vozrastnaya dinamika binokulyarnykh zritel'nykh funktsii u detei v protsesse shkol'nogo obucheniya [Age-related dynamics of binocular visual functions in children in the process of schooling. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 2001. 23 p (in Russian).
- Glezer V.D., Prazdnikova N.V., Leushina L.I., Nevskaya A.A., Pavlovskaya M.B. Opoznanie zritel'nykh obrazov [Recognition of visual images]. *Fiziologiya zreniya* [Vision physiology]. Moscow. Nauka, 1992. P. 466–527 (in Russian).
- Zhukova E.A., Tsirkin V.I. Dve tendentsii v vozrastnoi dinamike ostroty zreniya mal'chikov i devochek na protyazhenii obucheniya v srednei shkole [Two Trends in Age Dynamics of Visual Acuity of Boys and Girls During School Years]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2008. V. 22 (3). P. 241–247 (in Russian).
- Zhukova E.A., Shitova O.V., Korotaeva K.V., Popova L.I. Analiz individual'noi dinamiki izmeneniya ostroty zreniya vblizi i vdal' u detei pervykh 4 let obucheniya v shkole [Analysis of individual dynamics of changing acute of vision near and far in children of the first 4 years of training at school]. *Vyatskii meditsinskii vestnik* [Medical Newsletter of Vyatka]. 2018. V. 4 (60). P. 49–54 (in Russian).
- Kotlyarskii A.M. Funktsional'no-sistemnyi analiz binokulyarnogo zreniya [Functional-system analysis of binocular vision. Dr. biol. sci. diss.]. Moscow. 1982. 66 p (in Russian).
- Kropman I.L. Fiziologiya binokulyarnogo zreniya i rasstroistva ego pri sodruzhestvennom kosoglazii [Physiology of binocular vision and its disorder in concomitant strabismus]. Leningrad. Meditsina. 1966, 206 p (in Russian).
- Leushina L.I. O razdel'nosti kanalov dlya opoznaniya formy i otsenki razmera izobrazheniya [Separation of channels for shape recognition and image size estimation]. *Problemy fiziologicheskoi optiki* [Physiological optics problems]. Moscow. Leningrad. 1967. V. 14. P. 128–134 (in Russian).
- Medvedev L.N., Shoshina I.I. Vliyanie vozrasta na proyavlenie zritel'noi illyuzii Poggendorfa [Influence of Age on Display of Optical Poggendorff Illusion]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2004. V. 18. (4). P. 326–330 (in Russian).
- Mogilev L.N. Mekhanizmy prostranstvennogo zreniya [Spatial vision mechanisms]. Moscow. Nauka, 1982. 112 p (in Russian).
- Morozova L.V. Spetsifika psikhofiziologicheskogo obespecheniya zritel'nogo vospriyatiya detei 7–8 let s raznym tempom ego formirovaniya [Specificity of psychophysiological support of visual perception in children of 7–8 years old with a different rate of its formation]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta*. Seriya: Mediko-biologicheskie nauki [Arctic Environmental Research]. 2016. V. 1. P. 63–72 (in Russian).

- Nikolaeva E.I., Dzhalalova A.K. Sensomotornaya integratsiya v podrostkovom vozraste. Obzor literaturnykh istochnikov [Sensomotor integration in adolescence. Review of literature sources]. *Vestnik psikhofiziologii* [Psychophysiology News]. 2020. V. 3. P. 11–25 (in Russian).
- Pigarev I.N. Ekstrastrriarnye zritel'nye zony kory mozga [Extrastrriary visual areas of the cerebral cortex]. *Fiziologiya zreniya*. [Vision physiology] Moscow. Nauka, 1992. P. 345–400 (in Russian).
- Ploskonos G.A. Funktsional'nye podsistemy binokulyarnogo zreniya i ikh vzaimodeistvie u detei [Functional subsystems of binocular vision and their interaction in children. Dr. med. sci. diss.]. Moscow. 1989. 21 p (in Russian).
- Rozhkov S.N., Ovsyannikova N.A. Stereoskopiya v kino-, foto-, videotekhnike. Terminologicheskii slovar' [Stereoscopy in film, photo, video equipment. Terminological dictionary]. Moscow. Paradiz. 2003. 136 p (in Russian).
- Rozhkova G.I. Binokulyarnoe zrenie [Binocular vision]. *Fiziologiya zreniya*. [Vision physiology] Moscow. Nauka, 1992. P. 586–664 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. Vzaimodeistvie binokulyarnogo i stereokineticheskogo mekhanizmov vospriyatiya glubiny u detei s normal'nym i narushennym binokulyarnym zreniem [Interaction of binocular and stereokinetic depth mechanisms in children with normal and impaired binocular vision]. *Sensornye sistemy*. [Sensory systems]. 2001. V. 15 (1). P. 61–68 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. Komp'yuternyi metod otsenki fuzionnykh rezervov s ob"ektivnym kontrolem narusheniya fuzii [Computer-Aided Method for the Evaluation of Fusional Reserves with Objective Control of Fusion Break]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2010. V. 36 (3). P. 135–137 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N., Tokareva V.S. Binokulyarnaya integratsiya u detei doskol'nogo i mladshogo shkol'nogo vozrasta [Binocular integration in children of preschool and junior school age]. *Sensornye sistemy*. [Sensory systems]. 2002. V. 16 (3). P. 221–229 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Matveev S.G. Zrenie detei: problemy otsenki i funktsional'noi korrektsii [Children's vision: problems of assessment and functional correction]. Moscow. Nauka, 2007. 315 p (in Russian).
- Rozhkova G.I., Tokareva V.S., Rodionova E.I., Vashchenko D.I., Vasilyeva N.N. Vozrastnaya dinamika ostrot'y zreniya u shkol'nikov. III. Sootnoshenie monokulyarnykh i binokulyarnykh pokazatelei [Age dynamics of visual acuity in schoolchildren. III. Relationship of monocular and binocular estimates]. *Sensornye sistemy*. [Sensory systems]. 2001. V. 15 (3). P. 266–275 (in Russian).
- Rybalko E.F. Vozrastnye osobennosti ob"ema i struktury zritel'nogo polya [Age features of the volume and structure of the visual field]. Leningrad. Izd-vo LGU, 1969. 135 p (in Russian).
- Somov E.E. Metody oftal'moergonomiki [Ophthalmoeconomics methods]. Leningrad. Nauka, 1989. 157 p (in Russian).
- Supin A.Ya. Neironnye mekhanizmy zritel'nogo analiza [Neural mechanisms of visual analysis]. Moscow. Nauka, 1974. 192 p (in Russian).
- Supin A.Ya. Neirofiziologiya zreniya mlekopitayushchikh [Neurophysiology of mammalian vision]. Moscow. Nauka, 1981. 252 p (in Russian).
- Farber D.A., Beteleva T.G. Formirovanie sistemy zritel'nogo vospriyatiya v ontogeneze [Formation of the system of visual perception in ontogeny]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2005. V. 31 (5). P. 26–36 (in Russian).
- Farber D.A., Kurganskii V.A., Petrenko N.E. Mozgovaya organizatsiya prednastroiki k zritel'nomu opoznaniyu u detei predpodrostkovogo vozrasta [Brain organization of the preparation to visual recognition in preadolescent children]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2015. V. 41 (5). P. 5–15 (in Russian).
- Tsekhmistrenko T.A., Vasil'eva V.A., Shumeiko N.S. Strukturnye preobrazovaniya kory bol'shogo mozga u detei i podrostkov [Structural Transformations in the Cerebral Cortex in Children and Adolescents]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 2017. V. 43 (2). P. 5–14 (in Russian).
- Tsekhmistrenko T.A., Obukhov D.K., Vasil'eva V.A., Mazloev A.B., Shumeiko N.S. Strukturnye vozrastnye preobrazovaniya neironnykh gruppirovok kory bol'shogo mozga i mozzhechka u detei [Structural Transformations in Neural Clusters of the Cerebral and Cerebellar Cortex in Children]. *Zhurnal anatomii i gistopatologii* [Journal of anatomy and histopathology]. 2019. V. 8 (4). P. 42–48 (in Russian).
- Shevelev I.A. Neirony zritel'noi kory. Adaptivnost' i dinamika retseptivnykh polei [Neurons of the visual cortex. Adaptability and dynamics of receptive fields]. Moscow. Nauka, 1984. 232 p (in Russian).
- Blake R., Fox R. The psychophysical inquiry into binocular summation. *Jbid.* 1973. V. 14. P. 161–185.
- Chen A.H., Abidin A.H.Z. Vergence and accommodation system in Malay primary school children. *Malaysian J. Med. Sci.* 2002. V. 9 (1). P. 9–15.
- Cogan A.I. Human binocular interaction: towards a neural model. *Vision Res.* 1987. V. 27 (12). P. 2125–2139. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(87\)90127-1](https://doi.org/10.1016/0042-6989(87)90127-1)
- Dyea M.W.G., Bavelier D. Differential development of visual attention skills in school-age children. *Vision Res.* 2010. V. 50 (4). P. 452–459. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.010>
- Fischmeister F.P.S., Bauer H. Neural correlates of monocular and binocular depth cues based on natural images: A LORETA analysis. *Vision Res.* 2006. V. 46. P. 3373–3380. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.04.026>
- Gulyás B., Roland P., Heywood C., Popplewell D., Cowey A. Visual form discrimination from luminance or disparity cues: functional anatomy by PET. *Neuroreport.* 1994. V. 5 (17). P. 2367–2371. <https://doi.org/10.1097/00001756-199411000-00039>
- Howard I.P., Rogers B.J. Perceiving in depth. V. 2. Stereoscopic vision. Oxford. Oxford University Press, 2012. 635 p.
- Hubel D.H., Livingston M.C. Segregation of form, color and stereopsis in primate area 18. *J. Neurosci.* 1987. V. 7

- (1). P. 3378–3415.  
<https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.07-11-03378.1987>
- Hubel D.H., Wiesel T.N. Receptive fields, binocular interaction, and functional architecture in the cat visual cortex. *Ibid.* 1962. V. 160. P. 105–256.  
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837>
- Irving E.L, Steinbach M.J., Lillakas L., Babu R.J., Hutchings N. Horizontal Saccade Dynamics across the Human Life Span. *Investigative Ophthalmology & Visual Science.* 2006. V. 47 (6). P. 2478–2484.  
<https://doi.org/10.1167/iovs.05-1311>
- Knoublauch K., Vital-Durand F., Barbur J.L. Variation of chromatic sensitivity across the life span. *Vision Res.* 2001. V. 41. № 1. P. 23–36.  
[https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(00\)00205-4](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(00)00205-4)
- Naganuma T., Nose I., Inoue K., Takemoto A., Katsuyama N., Taira M. Information processing of geometrical features of a surface based on binocular disparity cues: an fMRI study. *Neuroscience Research.* 2005. V. 51 (2). P. 147–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.neures.2004.10.009>
- Namaeh M., Scheiman M.M. Yaramothu Ch., Alvarez T.L. A Normative Study of Objective Measures of Disparity Vergence and Saccades in Children 9 to 17 Years Old. *Optometry and Vision Science.* 2020. V. 97 (6). P. 416–423.  
<https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001515>
- Nishida Y., Hayashi O., Iwami T., Kimura M., Kani K., Ito R., Shiino A., Suzuki M. Stereopsis-processing regions in the human parieto-occipital cortex. *Neuroreport.* 2001. V. 12 (10). P. 2259–2263.  
<https://doi.org/10.1097/00001756-200107200-00043>
- Oduntan A., Al-Chamdi M., Al-Dosari H. Randot stereoacuity norms in a population of Saudi Arabian children. *Clinical and Experimental Optometry.* 1998. № 5. P. 193–197.  
<https://doi.org/10.1111/j.1444-0938.1998.tb06734.x>
- Rogers B. *Perception: a very short introduction.* OUP Oxford. University?press, 2017. 162 p.
- Tyler C.W. *Sensory processing of binocular disparity. Vergence eye movements: Basic and clinical aspects.* Boston. Butterworths, 1983. P. 199–295.
- Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol. Rev.* 1986. V. 93 (3). P. 262–282.