

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича
Российской академии наук (ИППИ РАН)**

на правах рукописи

Грачева Мария Александровна

**Применение современных 3D-технологий для оценки
стереозрения и его коррекции**

Специальность 03.01.09 – «Математическая биология, биоинформатика»

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата биологических наук

Научный руководитель:

д.б.н., к.ф-м.н., проф. Рожкова Галина Ивановна

Научный консультант:

чл.-корр. РАН., д.м.н., проф. Тахчиди Христо Периклович

Москва – 2017

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Обзор литературы. Проблемы оценки стереозрения и его коррекции	13
1.1. Стереозрение: основные понятия и показатели функционирования механизмов стереовосприятия человека.....	13
1.2. Методы оценки стереозрения	29
1.3. Основные нарушения стереовосприятия и принципы его коррекции	41
Глава 2. Методы исследования. Современная технологическая база для оценки и коррекции стереозрения и методические подходы, использованные в работе	53
2.1. Методы создания тестовых стереопар и сепарации изображений	53
2.2. Аппаратура, использованная при проведении работы по оценке и коррекции состояния бинокулярных функций	66
Глава 3. Разработка и апробация собственных программ и тестов для точной и скрининговой оценки стереоостроты зрения	67
3.1. Программа для точной оценки стереозрения на основе субпиксельных диспаратностей.....	67
3.1.1. Описание программы	67
3.1.2. Результаты апробации программы для оценки стереоостроты зрения...	71
3.2. Скрининговые тесты для оценки стереозрения	81
3.2.1. Описание растровых тестов.....	81
3.2.3. Результаты апробации табличных тестов	84
3.3. Оценка соответствия между лабораторными тестами и диапазонами стереоостроты, обеспечивающими приемлемое качество пространственного восприятия.....	93
3.3.1. Рекогносцировочное исследование восприятия стереоизображений при искусственном изменении стереопорогов.....	93
3.3.2. Обсуждение точной и скрининговой оценки стереоостроты зрения	99
Глава 4. Апробация программы для оценки фузионных резервов.....	101
4.1. Описание программы для оценки фузионных резервов	101
4.2. Результаты апробации программы для оценки фузионных резервов с применением анаглифного и поляризационного методов сепарации.....	102
Глава 5. Разработка и апробация программ для коррекции бинокулярных функций	106

5.1. Описание программ для коррекции бинокулярных функций	106
5.2. Результаты апробации модулей программного комплекса СКАБ с цветовой сепарацией изображений стереопары	111
5.3. Результаты апробации интерактивной программы «Поиск» комплекса 3D-БИС с поляризационной сепарацией изображений стереопары	124
Заключение	132
Выводы	136
Публикации по теме диссертации	138
Список цитированной литературы	141

Введение

Актуальность

Стереозрение – это способность воспринимать внешнее окружение как пространство, заполненное трехмерными объектами, расположенными на разном удалении от глаз и друг от друга. Исследованию стереозрения человека посвящено огромное число работ, относящихся к таким областям науки, как физиологическая оптика, психофизика, нейрофизиология, теоретическая и клиническая офтальмология, стереоскопия (Валюс, 1962; 1986; Клементьев, 1952).

По мере накопления знаний о механизмах стереозрения и развития стереоскопической техники круг людей, заинтересованных или озабоченных различными аспектами стереовосприятия, постепенно расширялся, и к настоящему времени проблемы стереозрения явно или неявно касаются буквально каждого цивилизованного человека.

Из принципиальных изменений в общих представлениях о физиологии пространственного зрения отметим, во-первых, сложившуюся к настоящему времени концепцию множественности мозговых механизмов анализа зрительной пространственной информации, параллельно функционирующих в процессе формирования видимых образов (Котлярский, 1982; Левашов, 1985; Рожкова, Плосконос, 1988; Плосконос, 1989; Рожкова, 1992; Wolfe, Held, 1981; Cogan, 1987), и, во-вторых, признание того факта, что базовые механизмы стереозрения начинают работать у человека очень рано – буквально в первые месяцы жизни, – и развиваются быстрыми темпами (Atkinson, Braddick, 1976; Held, 1980; Petrig et al., 1981; Simons, 1981; Birch et al., 1982; Braddick et al., 1983; Birch, Petrig, 1996; Ciner et al., 1996; Birch, Salomao, 1998; Teller, 1997; Atkinson, 2000; Brown et al., 2007). Из этого следует, что состояние стереозрения у детей нужно контролировать почти с рождения, притом достаточно часто, применяя целый набор тестов для оценки функционирования разных параллельных каналов. Задача разработки такого набора тестов не только далека от завершения, но и не всеми оптометристами осознается в полной мере, поэтому прогресс идет не слишком быстро. За рубежом сравнительно успешно ведется работа по созданию

и внедрению скрининговых стереотестов (Breyer et al., 2003; 2006; Fox et al., 1980).

В последние два десятилетия наблюдалось быстрое проникновение стереотехнологий (называемых часто 3D-технологиями) не только в новые профессиональные области, но и в разные сферы социальной жизни – обучение, спорт, развлекательную индустрию. Уже десятки фирм выпускают основанные на разных принципах 3D-телевизоры, фотоаппараты, видеокамеры, проекторы, шлемы виртуальной и дополненной реальности, разнообразные 3D-тренажеры, устройства для дистанционного управления сложными манипуляторами в опасной для жизни среде, для проведения хирургических операций.

В результате массового освоения 3D-техники выяснилось, что далеко не все люди способны успешно с ней работать или получать удовольствие от компьютерных 3D-игр и стереокинофильмов. Это обстоятельство поставило на повестку дня две взаимосвязанных задачи: 1) обеспечение полноценного исследования стереозрения пользователей для прогнозирования проблем с 3D-техникой и 2) наилучшее возможное согласование характеристик этой техники со свойствами механизмов стереозрения человека. Решение этих задач требует разработки методов оценки стереозрения, пригодных для массового тестирования в широком возрастном диапазоне и позволяющих провести необходимые исследования за достаточно короткое время.

К сожалению, общепринятых стандартных тестов для оценки стереозрения в настоящее время не существует. Как в научных исследованиях, так и в клинической практике разные специалисты используют разные средства – либо оригинальные собственные разработки, либо нестандартизированные коммерческие тесты, различающиеся по своим критическим параметрам, либо самодельные модификации коммерческих тестов. Это создает большие трудности при сравнительном анализе результатов разных исследований, систематизации полученных данных и создании адекватных представлений о влиянии на стереовосприятие различных факторов (Westheimer, 2013; Westheimer, McKee, 1980).

Одним из самых серьёзных препятствий при оценке показателей стереозрения является их существенная зависимость от параметров тестовых стимулов и условий тестирования. Определение оптимального режима стимуляции требует серьёзной работы, поэтому многие проблемы таких измерений до сих пор не решены. Отсутствие ясности в вопросах выбора наиболее адекватной методики и оптимальных параметров тестов является тормозом и для развития теоретических представлений, и для создания основ стандартизации измерений, и для разработки тестов, которые позволят обеспечить доступность и массовость оценки стереозрения у детей и взрослых, необходимость в которых ощущается в последнее время всё острее.

Параллельно с задачей оптимизации измерительных процедур – создания удобных и эффективных средств диагностики, стоит задача функциональной коррекции нарушений стереозрения (в частности косоглазия и амблиопии), которые выявляются в результате тестирования. Создание адекватных и физиологически обоснованных процедур для тренировки и коррекции требует определения оптимальных методов, выбора стимулов и параметров, анализа существующих процедур и сравнения их эффективности.

Широкие возможности современной компьютерной техники по части варьирования параметров тестов и организации управления процедурами позволяют надеяться на то, что компьютеризация методов оценки и коррекции стереозрения будет значительно способствовать решению указанных проблем (Двейб, 1996). В настоящей работе были исследованы возможности современных 3D-технологий и перспективы компьютеризации процедур оценки наиболее важных показателей стереозрения и коррекции наиболее распространенных функциональных нарушений.

Цель и задачи исследования

Цель исследования: критический анализ существующих методов измерения показателей стереозрения в клинике и в лабораторных условиях и разработка собственных методик и тестов для точной и скрининговой оценки стереовосприятия и его коррекции на основе современных 3D-технологий.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Проанализировать имеющиеся литературные данные по оценке и коррекции бинокулярных зрительных функций.
2. Проанализировать проблемы компьютеризации процедур для оценки и коррекции стереозрения человека, оценить преимущества и недостатки разных методов сепарации левого и правого изображений стереопар.
3. Разработать программу, предназначенную для оценки остроты стереозрения с использованием субпиксельных диспаратностей и предусматривающую возможность использования двух методов сепарации: цветового анаглифного и поляризационного.
4. Провести сравнительное исследование преимуществ и недостатков цветового анаглифного и поляризационного методов сепарации в отношении оценки остроты стереозрения и фузионных резервов.
5. Разработать экспериментальные варианты табличных тестов для скрининговой оценки показателей стереозрения и провести их лабораторную и клиническую апробацию.
6. Провести рекогносцировочное исследование восприятия стереофильмов (фильмов 3D-формата) людьми с различными показателями стереоостроты зрения, в том числе и стереослепыми.
7. Разработать компьютерные коррекционно-тренировочные программы для восстановления и тренировки нарушенных механизмов стереовосприятия и провести их лабораторную и клиническую апробацию.

Научная новизна

В ходе проведенного исследования были систематизированы данные о существующих теоретических подходах и практических приемах для оценки стереозрения человека. Проведен анализ проблемы компьютеризации тестовых и коррекционных процедур и оценены преимущества и недостатки различных методов сепарации изображений стереопары. Впервые экспериментально показаны значительные преимущества поляризационных 3D-технологий по

сравнению с цветовым анаглифным методом сепарации с точки зрения получения более точных и надежных данных.

Впервые разработана и апробирована оригинальная программа для оценки стереозрения с возможностью реализации субпиксельных диспаратностей для тестовых стимулов разного типа, в частности элементов Габора. Программа предусматривает использование как цветового анаглифного, так и поляризационного методов сепарации, что позволяет проводить прямое их сравнение в условиях максимального сходства всех прочих параметров процедуры.

Впервые разработаны и апробированы модули коррекционного комплекса программ для тренировки и развития бинокулярных функций, основанные на пошаговом физиологически обоснованном усложнении зрительных задач и постепенном включении в работу бинокулярных механизмов.

Впервые создана программа для лечения амблиопии, основанная на использовании виртуальной окклюзии (реализованной при помощи поляризационной сепарации); на клинической базе проведено сравнение эффективности тренировок с виртуальной и реальной окклюзией и показаны преимущества виртуальной окклюзии.

Разработаны и клинически испытаны новые варианты табличных тестов на основе растрового метода создания стереоизображений; подтверждена перспективность их использования в практике.

Теоретическая и практическая значимость работы

Составлен многоплановый обзор существующей литературы по стереозрению человека и проведен сравнительный анализ методов, используемых для его оценки и коррекции. Сделанные из обзора выводы позволяют наметить направления оптимизации тестовых процедур для скрининга и точной оценки показателей функционирования механизмов стереовосприятия, в первую очередь – стереоскопической остроты зрения, в целях ранней диагностики и мониторинга, а также подобрать оптимальные алгоритмы тренировочно-коррекционных процедур.

Разработанные и апробированные оригинальные табличные тесты и компьютерные программы для оценки стереозрения могут быть использованы на практике при скрининговых обследованиях и в клинической работе. Перспективность растровых табличных тестов, в которых впервые использованы многоцветные случайно-точечные стереограммы, подтверждена клиническими испытаниями.

Авторская программа, предусматривающая использование субпиксельных диспаратностей для повышения точности оценки стереопорогов при работе со стимульными изображениями разного вида, в том числе элементами Габора, может обеспечить проведение научных лабораторных исследований стереозрения на новом методическом уровне.

Экспериментально продемонстрированные в работе преимущества поляризационной технологии сепарации изображений стереопары по сравнению с цветовой анаглифной технологией при оценке стереопорогов и фузионных резервов указывают на необходимость отказа от цветовой сепарации в измерительных процедурах. При сравнении результатов различных исследований необходимо обязательно принимать во внимание использованный метод сепарации.

Проведенное рекогносцировочное исследование восприятия стереофильмов (фильмов 3D-формата) людьми с различными значениями стереоостроты зрения, в том числе и стереослепыми, выявило некорректность существующего критерия стереослепоты и необходимость его замены.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Применение современных технологий реализации поляризационного метода сепарации левого и правого изображений позволяет более точно и надежно оценивать показатели стереозрения, чем применение цветowego анаглифного метода, используемого во многих существующих коммерческих продуктах.
2. Использование субпиксельных диспаратностей позволяет добиться существенного повышения точности измерений, но делает процедуру длительной

и утомительной. В связи с быстрым совершенствованием характеристик и увеличением разрешения дисплеев этот прием становится менее актуальным.

3. Разработанные табличные тесты на основе растровой технологии можно считать эффективными инструментами для скрининговой оценки стереозрения у детей и взрослых.

4. Предложенный метод виртуальной окклюзии позволяет быстро добиваться хороших результатов в лечении амблиопии (синдрома ленивого глаза), и во многих случаях может полностью заменить дискомфортный метод заклейки амблиопичного глаза.

Апробация результатов

Результаты исследований были представлены **на семинарах** лаборатории №8 «Обработка сенсорной информации», сектора 8.1 «Моделирование биоинформационных процессов в зрительных системах», лаборатории №11 «Зрительные системы» ИППИ РАН,

на российских конференциях:

XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Федоровские чтения» (Москва, 2013),

37 Конференция-школа молодых ученых и специалистов «Информационные технологии и системы» (Калининград, 2013),

VI Российский общенациональный офтальмологический форум (Москва, 2013),

Научная конференция офтальмологов «Невские горизонты» (Санкт-Петербург, 2014, 2016),

на международных конференциях:

V и VI Международная научно-техническая конференция "Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других отраслях" (Москва, Россия, 2013, 2014),

European Conference on Visual Perception – ECVP-36 (Bremen, Germany, 2013),

European Conference on Visual Perception – ECVP-37 (Belgrad, Serbia, 2014),

European Conference on Visual Perception – ECVP-38 (Liverpool, Great Britain, 2015),

European Conference on Visual Perception – ECVP-39 (Barcelona, Spain, 2016),

European Conference on Visual Perception – ECVP-40 (Berlin, Germany, 2017),
 The 41st annual meeting of EPOS – European Paediatric Ophthalmological Society
 (Saint-Petersburg, Russia, 2015),
 1st International Symposium on Visual Physiology, Environment, and Perception (Riga,
 Latvia, 2016).

на выставках:

Выставка MedSoft (Москва, 2012),
 Выставка разработок молодых ученых U-NOVUS (Томск, 2014),
 I Молодежный форум «Молодежь России».

Часть исследования была выполнена при поддержке **грантов:**

Программа ОНИТ РАН III.3;

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития
 научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»
 (уникальный идентификатор прикладных научных исследований
 RFMEFI60414X0076);

Программа «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в
 научно-технической сфере: «Создание безочкового растрового набора тестов
 для быстрой проверки бинокулярного зрения».

Получены два **свидетельства о регистрации** разработанных в ходе выполнения
 работы программ для ЭВМ:

Большаков А.С., Грачева М.А., Рожкова Г.И. Свидетельство о государственной
 регистрации программы для ЭВМ №2013610976: «Интерактивная программа для
 повышения остроты зрения и скорости зрительной работы при амблиопии –
 ПОИСК». Дата регистрации: 9 января 2013 года.

Большаков А.С., Грачева М.А. Свидетельство о государственной регистрации
 программы для ЭВМ №2013610976: «Интерактивная тестовая программа для
 оценки остроты стереозрения - СТЕРЕОПОРОГ». Дата регистрации: 28 ноября
 2012 года

Исследования, входящие в настоящую работу, были отмечены **наградой:**

Диплом 3 степени «За лучшую статью в журнал “Мир техники кино”»
(Москва, 2014).

Личный вклад автора

Все эксперименты, полученные результаты и их возможная интерпретация обсуждались с научным руководителем.

При выполнении исследований, описанных в разделе 3.1, автором разработана программа для точной оценки стереопорогов под руководством Рожковой Г.И. и Большакова А.С.; автором лично проведена апробация разработанной программы, анализ и интерпретация результатов.

Содержание и дизайн скрининговых растровых тестов (раздел 3.2) разработаны автором, идеология тестов обсуждалась с научным руководителем. Клиническая апробация тестов проведена Рычковой С.И., анализ результатов апробации проведен автором.

Все эксперименты, описанные в разделе 3.3, и анализ полученных результатов проведены автором, обсуждение результатов проводилось совместно с научным руководителем.

Эксперименты по оценке фузионных резервов проводились автором и Васильевой Н.Н. Анализ и интерпретация полученных данных проводились автором.

Разработка комплекса СКАБ (разделы 5.1, 5.2) проводилась автором совместно с коллегами из Отдела разработки прикладных медицинских технологий и медицинской техники ФГБОУ ВО РНИМУ им. Н.И.Пирогова под руководством научного консультанта Тахчиди Х.П. Клиническая апробация комплекса проводилась Рычковой С.И., анализ собранных данных и их интерпретация проводились автором совместно с Рычковой С.И.

Программа «Поиск» (разделы 5.1., 5.3) разработана автором совместно с Большаковым А.С. и Рожковой Г.И. Клиническая апробация на пациентах проведена Рычковой С.И. и Наумовой О.И. Дизайн эксперимента предложен автором, анализ и интерпретация результатов проведены совместно автором и Рычковой С.И.

Глава 1. Обзор литературы. Проблемы оценки стереозрения и его коррекции

1.1. Стереозрение: основные понятия и показатели функционирования механизмов стереовосприятия человека

Стереозрение – это способность воспринимать внешнее окружение как пространство, заполненное трехмерными объектами, расположенными на разном удалении от глаз и друг от друга. Исследованию стереозрения посвящено огромное число работ, относящихся к таким областям науки, как физиологическая оптика, психофизика, нейрофизиология, теоретическая и клиническая офтальмология, стереоскопия. Примерно до последней четверти XX века вопросами стереозрения занимался довольно узкий круг специалистов – в основном представители фундаментальной науки и стереоскопической техники. В научных лабораториях изучались оптические и мозговые механизмы стереозрения у человека и различных животных, оценивались их функциональные возможности, а в технических учреждениях разрабатывались разнообразные приборы, позволяющие использовать особенности стереовосприятия человека в отдельных видах профессиональной деятельности для повышения точности измерений и большей наглядности (архитектура, геодезия, аэрофотосъемка, кристаллография, криминалистика) и в искусстве кино (Клементьев, 1952; Валюс, 1962, 1986; Майоров, 2011; 2016). По мере накопления знаний о механизмах стереозрения и развития стереоскопической техники круг людей, заинтересованных или озабоченных различными аспектами стереовосприятия, постепенно расширялся, и к настоящему времени каждый человек хотя бы раз слышал термин «3D-технологии» или «стерео-технологии» относительно визуального контента.

Из числа принципиальных изменений в общих представлениях о физиологии пространственного зрения следует отметить, во-первых, сложившуюся к настоящему времени концепцию о множественности мозговых механизмов анализа зрительной пространственной информации, параллельно функционирующих в процессе формирования видимых образов, и, во-вторых,

признание того факта, что базовые механизмы стереозрения начинают работать у человека очень рано – буквально в первые месяцы жизни – и развиваются быстрыми темпами. Из этого следует, что состояние стереозрения у детей нужно контролировать почти с рождения, притом достаточно часто, применяя целый набор тестов для оценки качества работы разных параллельных каналов. Задача создания такого набора тестов не только далека от завершения, но и не всеми оптометристами осознается в полной мере, поэтому прогресс идет не слишком быстро.

Что же касается техники, то в последние два десятилетия наблюдалось быстрое проникновение стереотехнологий (3D-технологий) не только в новые профессиональные области, но и в разные сферы социальной жизни – обучение, спорт, развлекательную индустрию. Выпускаются основанные на разных принципах 3D-телевизоры, фотоаппараты, видеокамеры, проекторы, разнообразные 3D-тренажеры, устройства для дистанционного управления сложными манипуляторами в опасной для жизни среде, для проведения хирургических операций. В результате массового освоения 3D-техники выяснилось, что далеко не все люди способны успешно с ней работать или получать удовольствие от компьютерных 3D-игр и стереокинофильмов. Это обстоятельство поставило на повестку дня несколько взаимосвязанных задач: обеспечение полноценного исследования стереозрения пользователей для прогнозирования проблем с 3D-техникой, наилучшее возможное согласование характеристик этой техники со свойствами механизмов стереозрения человека, адекватную реализацию методов тренировки и/или функционального восстановления стереозрения. Решение этих задач требует разработки методов оценки стереозрения, пригодных для массового использования в широком возрастном диапазоне и позволяющих провести необходимые измерения за достаточно короткое время, а также разработку и апробацию тренировочных методик, позволяющих улучшить восприятие пользователями контента такого типа. Тренировочные методики, основанные на различных стереотехнологиях,

могут быть использованы и для функционального лечения таких зрительных расстройств, как амблиопия и косоглазие.

Одними из наиболее информативных показателей состояния стереозрения человека представляются стереоострота и фузионные резервы (Ляховецкий, 2004; Elliott, Shafiq, 2005; Westheimer, 2013). К сожалению, общепринятых стандартных тестов для оценки обоих показателей в настоящее время нет. Как в научной, так и в клинической работе разные исследователи используют разные средства – либо оригинальные собственные разработки, либо коммерческие тесты, различающиеся по своим критическим параметрам, либо самодельные модификации коммерческих тестов. Это создает большие трудности в сравнительном анализе результатов разных исследований, систематизации полученных данных и создании адекватных представлений о влиянии различных факторов на стереоостроту зрения и фузионные резервы. Тем не менее, такую работу необходимо проводить как для развития теоретических представлений, так и для создания основ стандартизации измерений и разработки тестов, которые позволят обеспечить доступность и массовость измерений у детей и взрослых.

Основные термины

Приведем краткий список основных понятий, фигурирующих в литературе по стереозрению, стереоостроте зрения, фузионным резервам и функциональному восстановлению бинокулярных зрительных функций. К сожалению, ряду терминов трудно дать однозначные толкования, и потому между разными научными школами имеются разногласия. Кроме того, до настоящего времени еще встречается некорректное употребление узкопрофильными специалистами терминов, введенных специалистами из смежных областей, акцентирующими внимание на других аспектах стереозрения.

Стереоострота зрения, острота стереозрения, острота глубинного зрения – это количественная характеристика способности зрительной системы замечать малые различия в расположении объектов по глубине.

Стереозрение, стереопсис, пространственное зрение, глубинное зрение – это синонимы, обозначающие способность воспринимать объемную форму

предметов, различать относительную и абсолютную удаленность рассматриваемых объектов. Термин **stereos** переводится с греческого языка как *телесный, твердый, прочный, объемный, пространственный*. Будучи составной частью сложных слов, **stereo** может означать одно из двух свойств: постоянство (*стереотип*) либо отношение к восприятию или отображению объемности предметов и их пространственного расположения по глубине (*стереоагнозия, стереозрение, стереофония*). Часть авторов признает, что стереозрение может быть как бинокулярным, так и монокулярным (обоснование этой точки зрения приведено ниже).

Монокулярное зрение – это зрение одним глазом с формированием видимого образа на основе информации, поступающей в мозг от этого глаза.

Бинокулярное зрение – это зрение двумя глазами с формированием единого образа на основе совместной переработки информации, поступающей от обоих глаз.

Стереоскопическое зрение – способность определять объемную форму и глубину на основе различия двух сетчаточных изображений.

На рис. 1.1.1 приведена схема взаимоотношений между указанными понятиями (подразумевающими соответствующие механизмы), которая основана на четких критериях их различения.

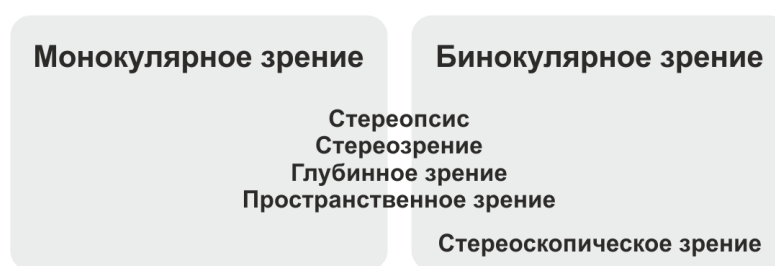


Рис. 1.1.1. Схема взаимоотношений терминов, используемых в литературе по стереоостроте зрения.

Прежде всего, все механизмы зрения можно подразделить на монокулярные и бинокулярные на том основании, что первые могут функционировать, получая информацию от одного глаза, а вторым для успешной работы нужно поступление сигналов от обоих глаз. Существуют еще так называемые моно-бинокулярные механизмы переработки информации, которые успешно функционируют при

поступлении зрительных сигналов из любого источника – левого глаза, правого глаза, обоих глаз. В монокулярных условиях наблюдения эти каналы функционируют как монокулярные, в бинокулярных – как бинокулярные. Далее, среди всех монокулярных и бинокулярных механизмов можно выделить модули, относящиеся к стереозрению, или глубинному зрению. Согласно этой схеме, эти два термина представляются тождественными, но некоторые авторы считают понятие стереозрения более общим, связывая глубинное зрение только с различением глубины расположения объектов, т.е. с оценкой их относительных позиций по глубине, и отделяя эту способность от способности определять абсолютное расстояние до объектов, которая тоже входит в понятие стереозрение. Признавая специфичность мозговых механизмов оценки абсолютных и относительных расстояний, мы полагаем, что они неразделимы: в воспринимаемых образах относительный сдвиг объектов по глубине всегда представлен как различие видимых абсолютных расстояний.

Монокулярные и бинокулярные модули стереозрения работают на разных принципах, но вносят вклад в решение общей задачи – определить трехмерную форму объектов и их расположение по глубине. Путаница понятий, относящихся к стереозрению, возникает в связи с тем, что сложившейся системы их употребления пока нет. Например, в медицинских изданиях часто отождествляют бинокулярное и стереоскопическое зрение, что некорректно, а о монокулярном стереозрении даже не упоминают. В то же время для научных работников, занимающихся общими проблемами пространственного восприятия, для художников и специалистов по стереокино словосочетания «монокулярный стереопсис», «монокулярное стереозрение», «монокулярные факторы глубины» и т. п. привычны и понятны (Валюс, 1962, 1986; Рожков, Овсянникова, 2003; Рожкова, Алексеенко, 2011; Koenderink et al., 2006; Rogers, 2017).

При рассмотрении следующей группы понятий, относящихся к конкретным механизмам стереозрения, желательно опираться на общую схему взаимоотношений между разными механизмами. На рис. 1.1.2 изображена упрощенная структура зрительной системы с параллельными монокулярными и

бинокулярными автономными подсистемами анализа признаков трехмерной формы объектов и их расположения в поле зрения наблюдателя.

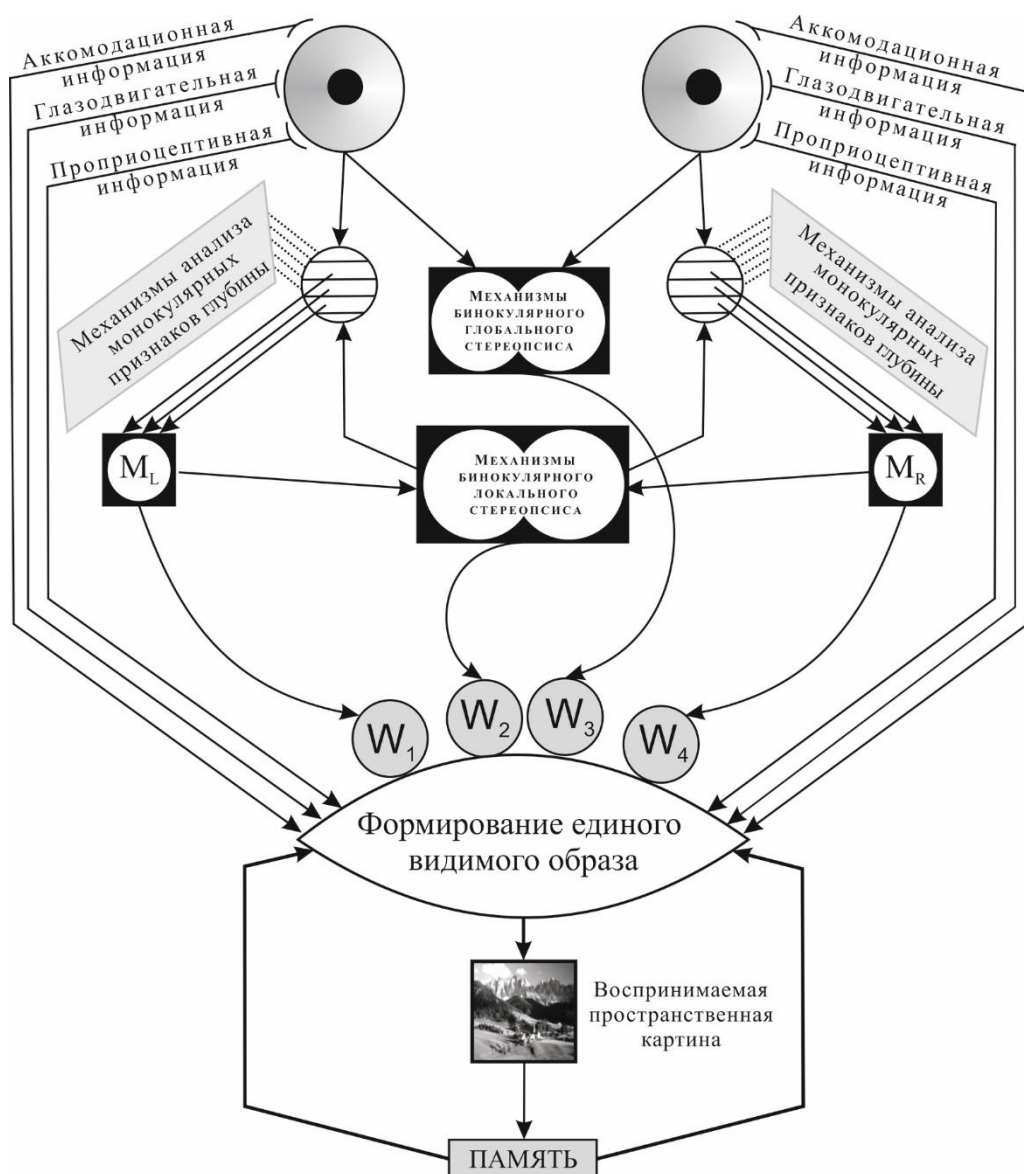


Рис. 1.1.2. Упрощенная схема функциональных отношений между параллельными механизмами стереозрения (Грачёва, Рожкова, 2012).

M_R, M_L – монокулярные подсистемы стереопсиса; W_1, W_2, W_3, W_4 – весовые коэффициенты вклада различных подсистем в формирование видимого образа.

Механизмы, обеспечивающие монокулярное стереозрение, основываются на таких признаках глубины в анализируемых изображениях как окклюзия (заслонение, перекрытие одного объекта другим) или интерпозиция, распределение светотени, геометрическая перспектива, воздушная перспектива

(синеватый оттенок отдаленных объектов, нечеткость их контуров в силу рассеивающих и поглощающих свойств воздушной среды), относительная резкость изображений разных объектов. Кроме того, монокулярные механизмы могут использовать информацию о состоянии аккомодации и анализировать различия в угловых размерах знакомых объектов (деревьев, домов, людей), расположение объектов по отношению к линии горизонта и др. Наиболее эффективным монокулярным признаком глубинности рассматриваемой сцены является динамический признак – параллакс движения (стереокинетический механизм).

Параллакс движения, временной параллакс, монокулярный параллакс – это изменение взаимного расположения зрительных направлений на разноудаленные объекты и их проекций на сетчатке глаза, вызываемое движением объектов или головы наблюдателя перпендикулярно направлению взора. Соответствующий механизм оценки глубины основан на анализе последовательности изображений, сменяющихся на сетчатке. Различия «кадров» в последовательности, возникающие из-за изменения ракурса, дают возможность анализировать их аналогично стереопарам, что обеспечивает полноценное восприятие глубины, не уступающее по качеству бинокулярному стереопсису. Более подробное рассмотрение монокулярных механизмов оценки глубины можно найти в работах (Рожкова, Алексеенко, 2011; Devernay, Beardsley, 2010; Howard, 2012; Rogers, 2017). Следует подчеркнуть, что только динамический монокулярный признак – параллакс движения – сам по себе достаточен для адекватной оценки глубины, тогда как статические монокулярные признаки успешно «работают» лишь при наличии дополнительной информации. Например, для определения рельефа по светотени нужно знать расположение источника света, для оценки расстояний на основе воздушной перспективы нужно иметь представление о поглощении света в воздушной среде. В связи с этим монокулярные признаки глубины иногда называют «вторичными».

Основной принцип работы бинокулярных механизмов восприятия глубины – сравнение изображений, проецирующихся на сетчатки правого и левого глаз.

Из-за небольших различий в углах наблюдения данные проекции несколько разнятся, что может касаться геометрической формы, размеров, яркости/контраста или цвета изображений. Эти небольшие расхождения и являются объектом анализа нейронных структур, ответственных за реконструкцию трехмерной формы предметов, уточнение фактуры их поверхностей или степени прозрачности. Основными стимулами бинокулярных механизмов, специфицирующими относительное расположение объектов в видимом пространстве, являются геометрические сетчаточные **бинокулярные диспаратности**. Сетчаточные диспаратности иногда называют «первичными» факторами глубины, поскольку они как бы самодостаточны для вычисления пространственных координат объектов. На самом деле, это не совсем так: кроме диспаратностей, для расчета координат нужно знать еще и позиции глаз. Но эта информация должна поступать из внутренних источников, тогда как в случае «вторичных признаков» требуется дополнительная информация о свойствах внешней среды.

В литературе используют специальные названия для диспаратностей, относящихся к разным условиям взаимного расположения пар точек.

Абсолютная диспаратность – это диспаратность выбранного объекта по отношению к точке фиксации взора, равная разности угловых координат изображений объекта на сетчатках левого и правого глаза относительно сетчаточных проекций точки фиксации взора, т.е. относительно центров фовеальных зон. Анализируя схему, приведенную на рис. 1.1.3, *а*, легко видеть, что абсолютная диспаратность равна разности между углом схождения зрительных осей в точке фиксации (углом конвергенции глаз) и углом, образуемым лучами, направленными из двух глаз на объект, диспаратность которого требуется вычислить.

$$d_{abc} = \gamma_F - \gamma_A,$$

где d_{abc} – абсолютная диспаратность; γ_F , γ_A – углы между узловыми точками глаз и точками А и F, соответственно. Так как глаза в данном примере фиксируют точку F, γ_F является также углом конвергенции.

В силу того, что глаза непрерывно движутся, точка фиксации взора непостоянна, поэтому удобнее пользоваться понятием относительной диспаратности.

Относительная диспаратность двух точек – это разность их абсолютных диспаратностей. Синонимом этого понятия является термин **бинокулярный параллакс**. На схеме рис. 1.1.3, б дан чертеж, поясняющий вычисление относительной диспаратности. Согласно определению, относительная диспаратность точек А и В равна:

$$d_{отн} = d_{abcA} - d_{abcB} = (\gamma_F - \gamma_A) - (\gamma_F - \gamma_B) = \gamma_B - \gamma_A,$$

где $d_{отн}$ – относительная диспаратность точек А и В; d_{abcA} , d_{abcB} – абсолютная диспаратность точек А и В, соответственно; γ_A , γ_B , γ_F – углы между узловыми точками глаза и точками А, В, F, соответственно. Так как глаза в данном примере фиксируют точку F, γ_F является также углом конвергенции.

Как видно, относительная диспаратность не зависит от угла конвергенции (сведения зрительных осей).

По расположению точек относительно плоскости фиксации принято различать два вида диспаратности: **отрицательную (скрещенную)** и **положительную (нескрещенную)** (рис. 1.1.3, б). Происхождение этих терминов имеет геометрическое и математическое обоснование. Для удобства анализа через точку фиксации взгляда проводят фронтопараллельную плоскость. Геометрические лучи, идущие от двух глаз к более близким объектам (точка А), пересекаются до этой плоскости и скрещиваются под бóльшим углом, нежели угол сведения зрительных осей, так что разность между углом конвергенции и углом схождения двух направлений на интересующую точку имеет отрицательный знак. В то же время лучи, направленные к более удаленным

предметам (точка В), до плоскости фиксации не пересекаются; угол, который они составляют между собой, меньше угла конвергенции, и диспаратность имеет положительный знак.

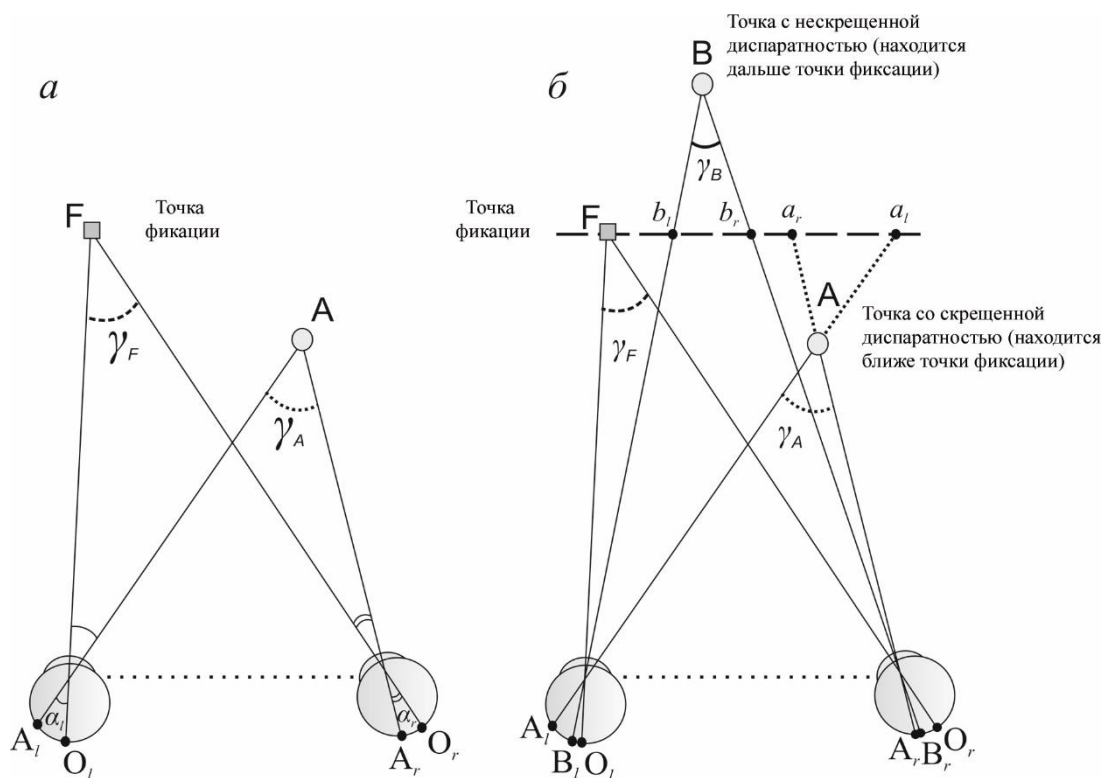


Рис. 1.1.3. Чертежи, поясняющие понятия абсолютной (а) и относительной (б) сетчаточной диспаратности (Грачёва, Рожкова, 2012).

Комментарии в тексте.

В большинстве случаев, когда говорят о диспаратности, имеют в виду **горизонтальную** диспаратность, подразумевая горизонтальную составляющую различия сетчаточных проекций и игнорируя значительно меньшую вертикальную. При обычной вертикальной ориентации головы сдвиг изображений соответствующих точек в левом и правом глазу ориентирован преимущественно горизонтально, так как координаты глаз во внешнем пространстве различаются только по горизонтальному направлению. Лишь сетчаточные проекции периферических объектов, расположенных существенно ближе к одному глазу, имеют некоторое различие по вертикальным координатам. Физиологи связывают горизонтальную и вертикальную диспаратность с основными сетчаточными координатными ориентирами: горизонтальным и

вертикальным меридианами. В действительности в зависимости от позиции головы горизонтальный и вертикальный меридианы, конечно, могут иметь любую ориентацию в гравитационном поле.

При измерениях стереоостроты зрения наряду с физическими тест-объектами в реальном пространстве широко используют виртуальные объемные образы, создаваемые при помощи плоских парных изображений – стереограмм. Принцип создания стереограмм базируется на неоднозначности сетчаточных изображений и возможности получать идентичные изображения на сетчатке разными способами. Каждая точка в поле зрения дает на двух сетчатках проекции, которые можно также получить при помощи двух точек, предъявляемых раздельно левому и правому глазу на соответствующих лучах, проведенных из каждого глаза через рассматриваемую точку. На этом и основана стереоскопическая техника. Традиционно, в качестве стереограммы использовали пару фотоснимков одной сцены, сделанных с двух ракурсов, однако сейчас стереограммы чаще создают искусственно, синтезируя парные изображения на компьютере. Раздельное предъявление левому и правому глазу предназначенных им проекций называют *дихоптическим* или *гангоскопическим предъявлением*, а в технической литературе – *сепарацией* изображений. Различные виды технологий сепарации подробно рассмотрены в методической главе 2.

Следующие несколько определений относятся к технике создания и наблюдения виртуальных стереообъектов.

Стереограмма (стереопара) – зафиксированные с двух ракурсов (или созданные искусственно) две проекции одного и того же объекта, сепарированное предъявление которых позволяет наблюдателю при успешной *фузии* (формировании единого слитного образа) воспринимать объемно-пространственную картину.

Экранный параллакс – параллакс между изображениями стереопары, проецирующимися на экран. На рис. 1.1.4, *а* схематически изображен нулевой экранный параллакс, виртуальный образ в таком случае воспринимается в плоскости экрана. Рис. 1.1.4, *б* – отрицательный экранный параллакс,

виртуальный объект позиционируется ближе к наблюдателю, рис. 1.1.4, *в* положительный экранный параллакс, образ кажется находящимся в заэкранном пространстве, дальше от наблюдателя. На рис. 1.1.4, *г* изображен случай, когда параллакс равен базису зрения (межзрачковому расстоянию); теоретически такой параллакс создает иллюзию бесконечно удаленного объекта. Рис. 1.1.4, *д* – экранный параллакс, превышающий межзрачковое расстояние; при таком параллаксе объект либо воспринимается как бесконечно удаленный, либо не воспринимается как цельный образ, монокулярные изображения не сливаются (не фузируются).

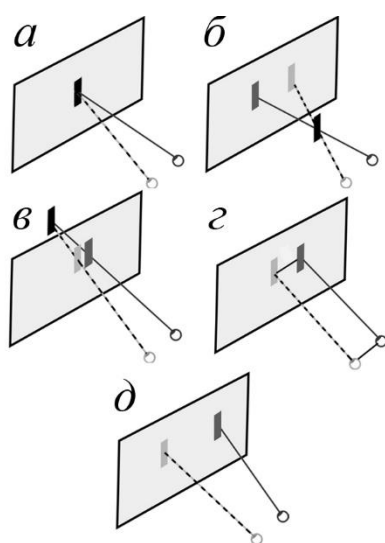


Рис. 1.1.4. Экранный параллакс:

а – нулевой экранный параллакс;

б – отрицательный экранный параллакс;

в – положительный параллакс; *г* – параллакс, равный базису зрения (межзрачковому расстоянию); *д* –

экранный параллакс, превышающий межзрачковое расстояние (Грачёва, Рожкова, 2012).

Циклопический образ – пространственный образ, который не может сформироваться в монокулярных условиях наблюдения и воспринимается только на основе бинокулярной диспаратности. Примером может служить виртуальный объект, закодированный случайно-точечной стереограммой.

Случайно-точечная стереограмма – стереопара, оба изображения которой получены на основе текстуры из случайных точек или иных мелких элементов и отличаются друг от друга заданным взаимным смещением отдельных участков. Диспаратности, возникающие в сетчаточных изображениях из-за этих смещений, формируют бинокулярные параллаксы, и наблюдатель воспринимает закодированную пространственную конфигурацию (рис. 1.1.5).

С восприятием случайно-точечных стереограмм связывают понятие **глобального стереопсиса**, отличительной чертой которого является

необходимость анализа левого и правого изображений по всей их площади или в значительной ее части, обычно, когда контур объекта невозможно отделить от фона при монокулярном рассматривании. Термин *локальный стереопсис* связывают с процессами, основанными на соотнесении левого и правого изображений объекта или деталей объекта, узнаваемых монокулярно.

В качестве одной из количественных мер стереозрения принято использовать наименьшее относительное смещение двух объектов по глубине воспринимаемое человеком, или *порог различения глубины*. При этом на практике вместо термина порог чаще используют термин *стереоострота*. Очевидно, что стереоострота должна была бы описываться величиной, обратной значению порога, так как малые пороги означают высокую остроту, однако на практике стереоостроту характеризуют именно значениями порогов, что иногда приводит к недоразумениям. Пороговые сдвиги по глубине, измеряемые в линейных единицах, зависят от расстояния наблюдения, что затрудняет сравнение результатов, полученных в различных условиях. По этой причине значения порогов обычно переводят в угловые величины, отражающие разность координат изображений объектов на двух сетчатках, т. е. в значения диспаратности.

На рис. 1.1.6 приведен чертеж, поясняющий, каким образом сдвиг точек A и F по глубине (s) переводится в горизонтальный сдвиг проекций точки A на экране (l), по которому затем вычисляется горизонтальная диспаратность d . Если человек фиксирует взглядом точку F , зрительные оси обоих глаз направляются на нее, а ее изображения в обоих глазах оказываются в центре фовеа. Сетчаточные изображения более близкой точки A в обоих глазах будут несколько смещены в височных направлениях. Эти смещения останутся точно такими же, если вместо

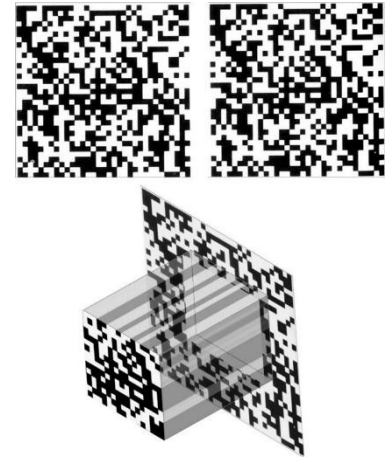


Рис. 1.1.5. Пример случайно-точечной стереограммы.

Схематически показан образ, возникающий при бинокулярном слиянии двух изображений (фузии).

точки A наблюдателю показать пару точек, расположенных в той же фронтальной плоскости, что и точка F : правому глазу – точку A_r , а левому – A_l . Поэтому вместо S для характеристики взаимного расположения точек можно использовать l . И более того: сдвиг точек по глубине можно имитировать, соответственно располагая точки на плоском экране. Обычно диспаратность выражают в угловых секундах и пользуются для перевода следующей приближенной формулой:

$$d = \frac{206000 \times sb}{R^2},$$

где s – сдвиг по глубине, b – межзрачковое расстояние наблюдателя, а R – расстояние от глаз до объектов. Эта формула справедлива только для малых сдвигов по глубине и достаточно больших расстояний ($R \gg s$, $R \gg b$).

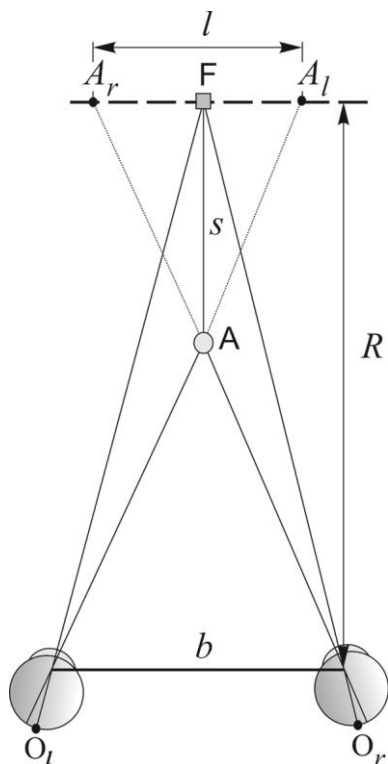


Рис. 1.1.6. Схема, демонстрирующая перевод относительного сдвига по глубине в горизонтальную диспаратность.

F – точка фиксации, s – относительный сдвиг точек A и F по глубине, R – расстояние от точки фиксации до испытуемого, b – межглазной базис, l – линейная диспаратность.

Фузионные резервы – показатель степени развития и силы фузионных механизмов, количественно характеризующий способность сохранять единый бинокулярный образ в условиях рассогласования аккомодации и вергенции (Рожкова и др., 2015)

Аккомодация – способность глаза менять фокусное расстояние, фокусировать на сетчатке глаза изображения рассматриваемых объектов,

находящихся на различном удалении от наблюдателя. Фокусирование осуществляется посредством аккомодационного усилия, изменяющего фокусное расстояние хрусталика (путём изменения его выпуклости) и его расстояние до сетчатки (Рожков и др., 2016).

Вергенция – координированные симметричные повороты глазных яблок в противоположных направлениях (сведение или разведение зрительных осей) при бинокулярном рассматривании объектов и при восприятии стереоизображений. Процесс сведения зрительных осей при переводе взора на более близкие объекты называют *конвергенцией*, или *конвергированием*, а процесс их разведения при переводе взора на более дальние объекты – *дивергенцией*, или *дивергированием*. Для обозначения углов между сходящимися зрительными осями употребляют термин *угол конвергенции*, а между расходящимися – *угол дивергенции* (Рожков и др., 2016).

В обычных условиях наблюдения для рассматривания объекта нужно одновременно перенастраивать вергенцию и аккомодацию на одно и то же расстояние до объекта, поэтому данные системы связаны аккомодационно-вергентной связью. Рассогласовывая информацию, подаваемую на эти две системы, можно оценить степень устойчивости бинокулярного зрения. При этом система в различной степени устойчива к рассогласованиям, при которых плоскость аккомодации находится ближе или дальше плоскости вергенции: так называемые дивергентные и конвергентные резервы.

В условиях восприятия 3D-контента плоскость аккомодации всегда находится на экране, а вергенция осей зависит от положения виртуального объекта в пространстве, то есть от предъявляемой стереопары. Такая специфика 3D-технологий делает очевидной перспективность их использования для оценки фузионных резервов.

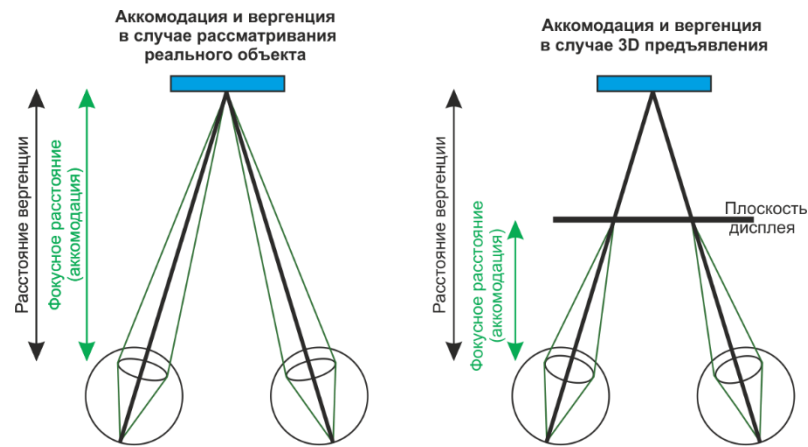


Рис. 1.1.7. Рассогласование аккомодации и конвергенции при наблюдении 3D контента (Грачева, Большаков, 2016).

Описанные особенности стереозрения дают общее представление о сложности зрительной системы в целом и бинокулярного зрения в частности. Очевидно, что регулярная оценка базовых параметров системы позволяет вовремя заметить отклонения и предотвратить развитие серьезных нарушений, что подчеркивает необходимость создания комплекса тестов для диагностики бинокулярных зрительных функций.

1.2. Методы оценки стереозрения

Несмотря на тот факт, что задача адекватного измерения показателей функционирования бинокулярных механизмов зрительной системы приобретает все большую актуальность, в настоящее время не существует общепризнанных универсальных методов точной оценки стереостроты зрения или фузионных резервов.

Стереοοстрота зрения

На протяжении прошлого века для измерения стереоостроты зрения предлагались различные виды тестовых стимулов, обсуждались их оптимальные размеры и пропорции, процедуры измерений и способы представления результатов (Westheimer, 2013). Вопрос о необходимости стандартизации измерений остроты стереозрения фактически не был поставлен как конкретная задача, хотя значение стереоостроты является важным диагностическим показателем, по которому можно на ранних стадиях распознать симптомы нарушений в зрительной системе и, следовательно, предотвратить их дальнейшее прогрессирование (Кропман, 1966; Schmidt, 1993; Walraven, 1975, Walraven, Janzen, 1993; Read, 2015). Сложившаяся ситуация – отсутствие единых измерительных процедур и нормативов – объясняется тем, что пороговые значения, характеризующие стереоостроту здорового человека, измеряются единицами угловых секунд. Реализация столь малых диспаратностей представляет значительные трудности для разработчиков тестов. Возможно, только в настоящее время созрела техническая база для решения этой задачи. Всеобщая компьютеризация и быстрый прогресс компьютерных технологий создают условия для разработки новых тест-объектов и широкого варьирования их параметров, быстрой апробации и корректировки тестовых процедур.

Общая классификация тестов для измерения стереоостроты (по условиям наблюдения и виду тестовых стимулов) дана на схеме рис. 1.2.1, а в табл. 1.2.1 приведены характеристики некоторых распространенных коммерческих тестов, упоминаемых в зарубежных публикациях.

Таблица 1.2.1. Характеристики распространенных коммерческих тестов

Название теста	Рабочие диспаратности, угл.с	Способ сепарации	Рабочие расстояния	Вид тестового объекта
Естественные условия наблюдения				
Аппарат Говарда-Долмана	Не имеет существенных ограничений	Сепарация не требуется	Для дали	Композиция из реальных объектов (три спицы)
Frisby Davis 2	4-200	Сепарация не требуется	Для дали	Композиция из реальных объектов (силуэты животных)
Frisby	7-600	Сепарация не требуется	Для близости и дали	Имитация СТС
Дихоптические условия наблюдения				
Lang-test 1	550, 600, 1200	Растровый	Для близости	СТС
Lang-test 2	200, 400, 600	Растровый	Для близости	СТС
Randot-cube	450-800	Растровый	Для близости	СТС
TNO	15-480	Анаглифный	Для близости	СТС
Stereo Fly Acuity (Titmus)	40-800	Поляризационный	Для близости	Монокулярно распознаваемые стимулы
Stereo Butterfly Test	40-800	Поляризационный	Для близости	СТС+монокулярно распознаваемые стимулы
Randot Stereo Smile 1	120-480	Поляризационный	Для близости	СТС
Randot Stereo Smile 2	60, 120, 240, 480	Поляризационный	Для близости	СТС
Randot Stereo Acuity	40-800, 20-400, 250	Поляризационный	Для близости	СТС+монокулярно распознаваемые стимулы
Randot E test	170-500	Поляризационный	Для близости	СТС
Randot Distance	60-100	Поляризационный	Для дали	СТС
Mentor II-SG B-VAT	15-240	Поляризационный	Для дали	Монокулярно распознаваемые стимулы
AO Veectographic Project-O-Chart Slide test	30-480	Поляризационный	Для дали	Монокулярно распознаваемые стимулы

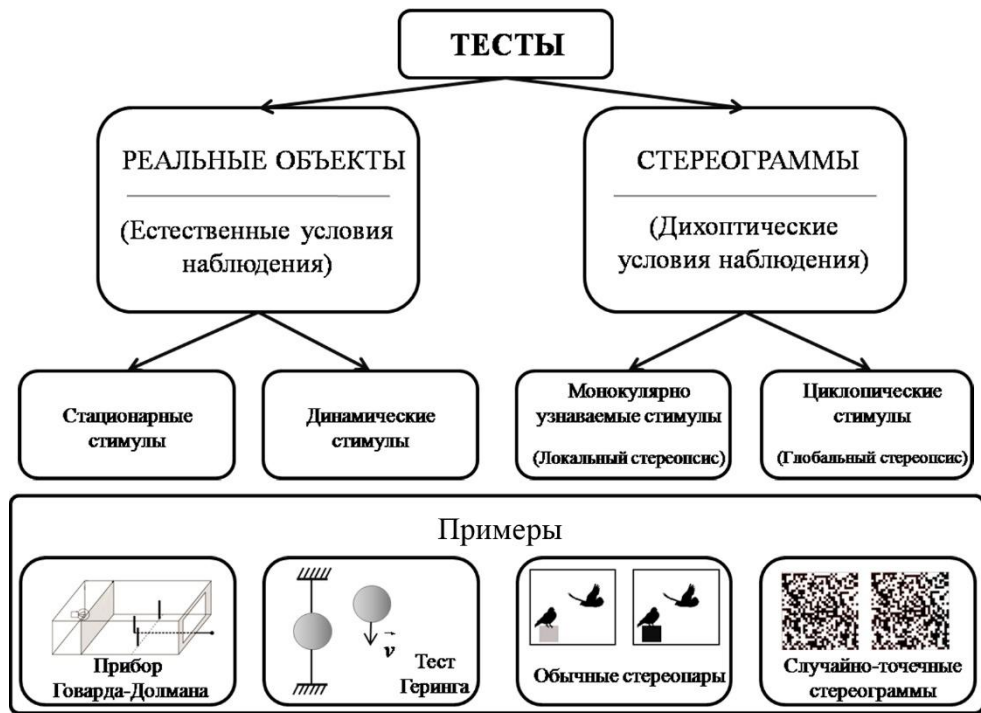


Рис. 1.2.1. Классификация тестов для измерения стереоостроты в зависимости от используемых тестовых стимулов и условий наблюдения.

Для количественной оценки глубинного зрения в естественных условиях наблюдения классическим остается **прибор Говарда-Долмана**. В приборе имеются три вертикальные спицы, исходно расположенные во фронтопараллельной плоскости. Центральную спицу исследователь смещает вперед (назад), затем демонстрирует конфигурацию испытуемому, а испытуемый должен уловить момент, когда эта спица начинает казаться ему расположенной ближе (дальше) двух боковых (неподвижных). Обычно испытуемый располагается на расстоянии 5 м от аппарата. Для исключения

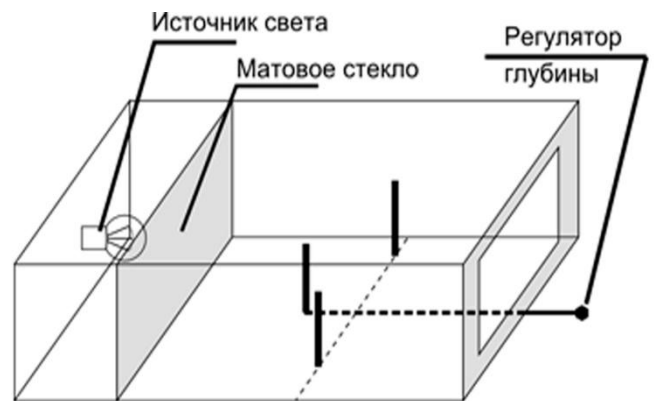


Рис. 1.2.2. Схематическое изображение конструкции прибора Говарда-Долмана. Источник света и матовое стекло создают диффузное освещение, устраняющее монокулярные признаки глубины. Крайние спицы всегда неподвижны, положение средней спицы может регулироваться.

влияния вторичных факторов на глубинное восприятие, прибор сконструирован так, чтобы испытуемый не видел концы спиц. Принципиальная схема прибора приведена на рис. 1.2.2. Концы спиц скрыты границами рамки, а способ освещения обеспечивает отсутствие теней. За порог принимают то минимальное смещение центральной спицы по глубине, которое обследуемый еще способен заметить.

Описанный принцип измерения впервые был использован Гельмгольцем в его экспериментальной работе (в литературе упоминается как “three needle experiment”). В аппаратном виде идея впервые была реализована Говардом в 1919 году. Прибор получил название аппарата Говарда-Долмана и применялся для измерения остроты стереозрения у летного состава. В дальнейшем идея Гельмгольца многократно использовалась разными авторами с некоторыми модификациями. В частности, аналогичный по принципу прибор (**FD2, Frisby Davis distance stereotest**, рис. 1.2.3), приспособленный для работы с детьми, описан в работе Адамса с соавторами (Adams et al., 2005). Вместо спиц в аппарате предъявляются четыре силуэтных изображения животных или четыре геометрические фигуры, любую из которых можно смещать по глубине.

Другой интересной реализацией идеи Гельмгольца является тест **Verhoeff Stereopter**. Он также представляет собой композицию из реальных объектов – трех прямоугольных предметов разной ширины. Изюминка теста заключается в возможности создать конфликт между монокулярными и бинокулярными признаками глубины. Если судить по первым, самый широкий прямоугольник всегда будет казаться ближе прочих, что может противоречить результатам

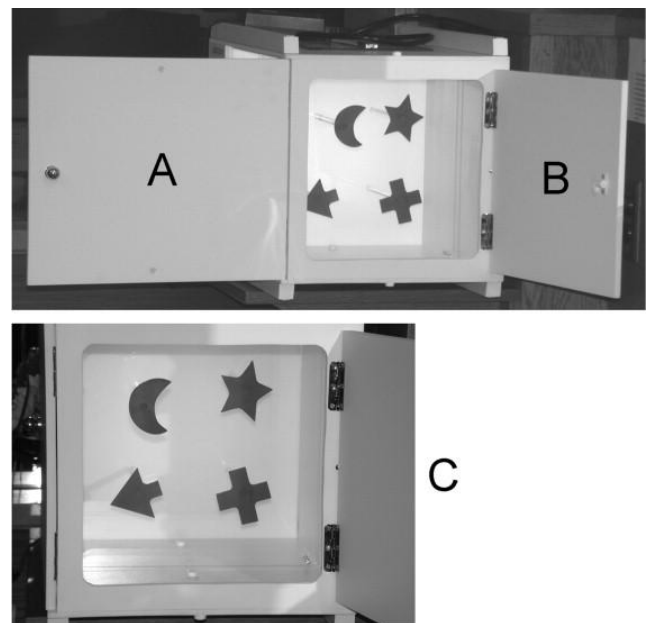


Рис. 1.2.3. Frisby Davis distance stereotest.

анализа диспаратностей, если установлено иное расположение объектов по глубине.

Еще один тест для оценки стереоостроты, основанный на идее Геринга, – ***Hering's dropping test***. В приборе рядом с шариком, подвешенным на нити, при проведении измерения падает еще один шарик – тестовый. Испытуемый смотрит на объекты через щель и должен определить относительное расположение шариков по глубине.

В монографии (Кропман, 1966) описан интересный метод, предложенный Монье. В своем приборе, названном им стереозидометром, как и в приборе Говарда-Долмана, автор использовал в качестве тестового стимула конфигурацию из трех спиц. Однако в этом аппарате объекты всегда были зафиксированы относительно друг друга. Средняя спица находилась на 25 мм дальше или ближе к испытуемому, чем две другие. Изначально спицы предлагается располагать горизонтально, тогда, из-за отсутствия вертикальных границ у видимых частей спиц, диспаратность становится неопределенной. При повороте всего тест-объекта во фронтопараллельной плоскости видимая диспаратность растет по синусоидальному закону, что позволяет определять пороговые значения стереоостроты, оценивая критический угол наклона спиц, при котором начинает восприниматься пространственная конфигурация объектов.

Как уже отмечалось, когда измерения проводятся в естественных условиях наблюдения, для оценки пороговых диспаратностей приходится принимать специальные меры, чтобы избежать влияния монокулярных признаков глубины. Более надежно их можно исключить в условиях предъявления стереопар, обеспечивающих раздельное наблюдение изображений, предназначенных левому и правому глазу (такие условия тестирования принято называть ***дихоптическими***, от лат. *dicha* – разделенный надвое, или ***гапლოსкопическими***, от греч. *haplos* – непарный).

Ниже приведена информация о некоторых применяемых в настоящее время коммерческих тестах, используемых как в клинической практике, так и в научных исследованиях.

Исторически первым появился в клинической практике *Титмус-тест* – *Titmus-test, Stereo Fly Acuity test* (рис. 1.2.4, а). Данный тест за рубежом считается стандартом для проверки восприятия глубины и представляет собой небольшой буклет, выполненный в технике поляроидных вектограмм. В стандартный комплект входят: тест «Муха» на наличие/отсутствие стереопсиса; градуальный тест из девяти стимулов с четырьмя кружками, расположенными крестообразно (диапазон диспаратностей от 800" до 40"); градуальный тест с изображениями животных (три ряда по пять фигур) для маленьких детей (диапазон диспаратностей от 400" до 100"); поляроидные стереоочки.

Первый тест предназначен для ориентировочного выявления наличия/отсутствия стереоскопических механизмов у ребенка: в норме при надевании стереоочков изображенная муха сильно выступает над поверхностью листа. Классическое задание, которое дается испытуемому – взяться пальцами за крыло. Если пальцы остановятся не над листом, а на плоскости изображения, делается вывод о наличии проблем со стереовосприятием. Второй и третий тесты позволяют с определенной точностью измерить пороги стереовосприятия по способности безошибочно указать выступающую из плоскости фигуру.

Stereo Butterfly Test (рис. 1.2.4, б) аналогичен Титмус-тесту, но первым изображением, оценивающим наличие стереопсиса, является не различимый монокулярно объект, а закодированное случайно-точечной стереограммой изображение бабочки.

Также в технологии поляроидной вектографии выполнены тесты *Randot Stereo Smile Test, Randot* (рис. 1.2.4, в) и *Randot-E* (рис. 1.2.4, з). Первый представляет собой набор таблиц со случайно-точечными стереограммами, на которых закодировано схематическое изображение улыбающегося лица диаметром 11 см. Этот тест разработан для детей от 6 месяцев до 5 лет. Диапазон измеряемых порогов – 120"-480". Второй тест (Randot) рассчитан на измерение порогов в широком диапазоне значений. Комплектация данного измерительного набора схожа с комплектацией Titmus-test и Stereo Butterfly Test. Общий диапазон измеряемых значений порога – от 500" до 20". Третий тест (Randot-E) был

разработан специально для детей 3-5 лет. В комплект теста входят стереоочки и три карточки со случайно-точечными стереограммами: демонстрационная карточка, карточка с закодированной буквой «Е» и карточка, на которой нет закодированного объекта. Пациент должен указать, на которой из демонстрируемых карточек он видит рельефное изображение буквы. При измерениях с расстояний 50, 100 и 150 см тест создает значения диспаратностей 504", 252" и 168", соответственно. Хотя эти уровни соответствуют достаточно высоким порогам, такие значения пригодны для скринингового обследования данной возрастной группы (Wang et al., 2011).

Более точным количественным тестом, который можно применять уже в раннем возрасте, является *тест TNO* (рис. 1.2.4, з). Данный тест выполнен в виде альбома с набором случайно-точечных стереограмм-анаглифов. Рядом с каждым тестовым изображением располагается рисунок, поясняющий форму закодированного объекта, а испытуемый должен правильно указать его расположение. Комплект TNO включает тест на наличие стереопсиса (диспаратности порядка 2000" с 40 см) и набор таблиц, позволяющих измерять пороги в диапазоне от 480" до 15".

В другой технологии – линзово-растровой, позволяющей избежать использования очков – выполнены тесты *Lang I* и *Lang II* (рис. 1.2.4, д). В обоих этих тестах используются случайно-точечные стереограммы. В первом тесте диспаратности изображений равны 1200", 600" и 550", во втором – 600", 400" и 200". Оба теста широко применяются за рубежом при скрининговом выявлении аномалий зрения у детей.

Еще одним тестом, использующим технологию линзового раstra, является *Randot Cube*. Тест реализован в форме куба, на четыре грани которого нанесены случайно-точечные стереограммы. Одна из граней пустая, три остальные кодируют разные объекты: круг, квадрат и букву "Е".



Рис. 1.2.4. Примеры коммерческих тестов для измерения стереоостроты.

a – Titmus-test (Stereo Fly Acuity Test), *б* – Stereo Butterfly Test, *в* – Randot Test, *г* – TNO Test, *д* – тесты Lang-I и Lang-II, *е* – Frisby Test, *ж* – Pass Test, *з* – Randot-E Test.

На совершенно другом принципе основан безочковый *Frisby test* (рис. 1.2.4, *e*), который имитирует случайно-точечные стереограммы. В комплект теста входят три пластины из прозрачного оргстекла, на одной стороне которых напечатано по четыре паттерна со случайной текстурой из мелких элементов. В центральной части одного из четырех паттернов имеется круглая область, которая напечатана на другой стороне пластины и должна восприниматься как расположенная на иной глубине. Смещение круга по отношению к фону определяется толщиной стекла. Комплект включает в себя пластины толщиной 6, 3 и 1.5 мм. При предъявлении теста с трех рекомендуемых расстояний можно получить диапазон диспаратностей от 600" до 7".

На сегодняшний день существует много работ по сравнению различных тестов, однако во всех работах существенно отличаются сразу несколько параметров: вид стимулов, расстояния предъявления, метод сепарации и др. (Simons, 1981; Hall, 1982; Leske, 2006; Momeni-Moghaddam, 2012; Vancleef et al., 2017). Компьютеризация тестовых процедур могла бы предоставить возможность прямого сравнения получаемых результатов при варьировании только одного из параметров.

Суммируя представленную информацию, следует отметить два важных для анализа получаемых результатов обстоятельства.

- Хотя все рассмотренные тесты разрабатывались для количественной оценки одних и тех же зрительных способностей, разные реализации сильно отличаются как в отношении вида и параметров тестовых стимулов, так и в отношении условий их предъявления.

- Тесты в виде приборов или альбомов с фиксированным набором стимулов предоставляют ограниченные возможности для варьирования параметров и масштабирования изображений в соответствии с расстоянием наблюдения, а также усложняют повторное тестирование или тестирование в большой группе испытуемых, так как обследуемые запоминают правильные ответы.

Первое обстоятельство затрудняет сопоставление результатов разных авторов, создание баз данных, обобщение полученной информации. Второе

обстоятельство мешает проведению систематического исследования количественной зависимости стереоостроты зрения от параметров тестовых стимулов и установлению закономерностей стереовосприятия. К тому же, в большинстве перечисленных диоптических тестов наименьшие значения измеряемых стереопорогов выше 20", однако у взрослых людей с хорошим стереозрением пороги, как правило, имеют значения порядка единиц угловых секунд (в среднем 5-10" в разных условиях (Кравков, 1950; Кропман, 1966; Невская, 1977; Westheimer, 1994), по другим данным медиана принимает значения от 12.4 до 37.2 (Bosten et al., 2015; Bohr, Read, 2013; Coutant, Westheimer, 1993; Zaroff et al., 2003)), и даже у значительного числа детей младшего школьного возраста стереопороги ниже 20".

Таким образом, очевидно, что как исследовательские лаборатории, так и медицинские учреждения нуждаются в новых тестах для оценки стереозрения, обеспечивающих возможность варьирования и масштабирования тестовых стимулов и позволяющих повысить точность измерений в несколько раз. Разработчики тестов все чаще обращаются к компьютерной технике – генерации тестовых стимулов на дисплеях (Рожкова, Васильева, 2010; Ee, Richards, 2002; Qiu et al., 2007; Vasilyeva, 2008; Kriegbaum-Stehberger et al., 2008; Kim et al., 2011; To et al., 2011; Rastegapour, 2011; Gadia et al., 2014). Что касается желательности варьирования и масштабирования тестовых изображений, то тут современная компьютерная техника предоставляет практически неограниченные (для рассматриваемой задачи) возможности. Однако попытки обеспечения высокой точности измерений наталкиваются на принципиальные трудности, связанные с дискретизацией изображений на экране монитора.

Фузионные резервы

Традиционно фузионные резервы измеряют при помощи призм возрастающей силы, устанавливаемых перед одним или обоими глазами, в условиях рассматривания некоторого центрального объекта. Отклоняя световые лучи, призмы вызывают конвергентные или дивергентные повороты глаз, но стимул к изменению аккомодации при этом отсутствует, так как тест-объект

находится на неизменном расстоянии. Увеличивая силу призм, отмечают моменты появления размытости образа (blur-point) и разрушения фузии (break point), а затем, уменьшая силу призм, – момент восстановления фузии (recovery point). Максимальное значение силы призм (или соответствующий угол отклонения лучей), при котором человек способен сохранять единый бинокулярный образ, принимают за меру фузионных резервов, причем конвергентные резервы принято называть положительными, а дивергентные – отрицательными. Поскольку фузионные резервы могут быть разными для разных расстояний наблюдения, их принято измерять для дали и для близи. Измерения для бесконечного расстояния традиционно проводят на синоптофоре – приборе, имеющем настроенные на бесконечность отдельные оптические каналы стимуляции для левого и правого глаз, угол между которыми можно менять в широких пределах, вызывая конвергенцию или дивергенцию зрительных осей.

Ориентировочно принимается, что средние значения положительных фузионных резервов для взрослых составляют 15° , а отрицательных – 5° (Сомов, 1989; Рожкова, Матвеев, 2007). Однако конкретные нормативы зависят от вида стимулов и процедуры измерения, так как при изменении параметров теста получаемые значения могут меняться в разы. Что касается зависимости фузионных резервов от возраста, долгое время считалось, что для всех детей школьного возраста они одинаковы. Однако более точные измерения с использованием компьютеризированных процедур показали, что на этапе от 7 до 17 лет фузионные резервы постепенно увеличиваются (рис. 1.2.5).

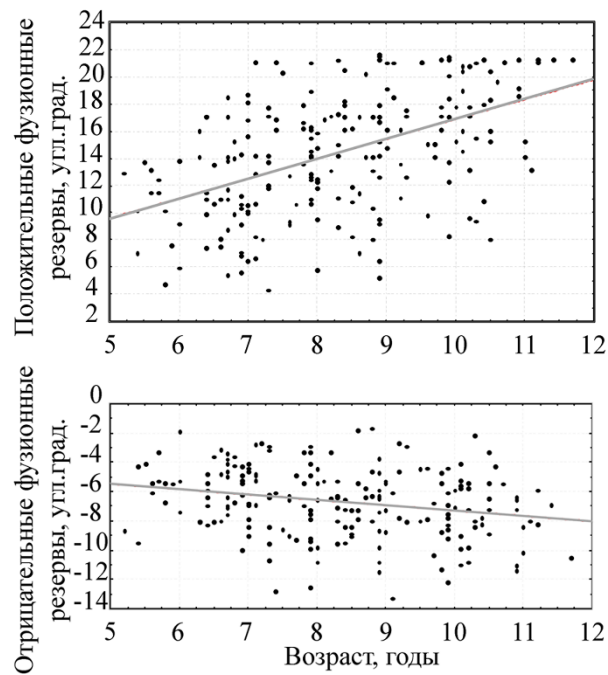


Рис. 1.2.5. Возрастная динамика фузионных резервов; из работы
(Васильева, Рожкова, 2009).

Реализация оценки фузионных резервов посредством компьютерных технологий позволит лучше контролировать стимульный материал, точнее оценивать показатели. Особенно привлекательной кажется возможность реализации объективного контроля ответов пользователя за счет динамически изменяющегося в ходе тестирования стимула.

1.3. Основные нарушения стереовосприятия и принципы его коррекции

В зрительной системе человека есть специальные бинокулярные механизмы анализа двух проекций видимой сцены, которые, однако, могут успешно работать только при достаточно хорошем качестве и согласованности изображений на сетчатках обоих глаз. Это требование должно обеспечиваться координированной деятельностью, по крайней мере, трёх систем: зрительной сенсорной, глазодвигательной и аккомодационной. Аномалии развития или нарушения в работе любой из этих систем могут привести к расстройствам бинокулярного зрения.

При расстройствах бинокулярного зрения традиционно назначают разнообразные тренировки, направленные на развитие или восстановление нарушенных функций путём создания надлежащих условий для результативной совместной обработки информации, поступающей в зрительные отделы мозга от левого и правого глаз. Функциональная, или неинвазивная, коррекция бинокулярного зрения в разных формах используется уже не первое столетие (Шаповалов и др., 2014; Рожкова и др., 2015).

Наиболее частые расстройства бинокулярного зрения – косоглазие (*strabismus*) и амблиопия (*amblyopia*). *Амблиопия* – это не поддающееся оптической коррекции ослабление зрения, связанное с дисфункциями центральных зрительных механизмов, при отсутствии явных аномалий органов зрения (Никулина и др., 1999; Хватова и др., 2005; Hess et al., 1993; Hess, 2001; Кащенко и др., 2001; Нероев и др., 2014; 2015; Маглакелидзе и др., 2015; Алексеенко, 2016; Маглакелидзе, Зуева, 2017). Другое название амблиопии – “*ленивый глаз*” – отражает тот факт, что заболевание обычно развивается как следствие пониженной активности, и, как правило, успешно излечивается путем специальных тренировок. Данное нарушение встречается и при нормальных позициях и движениях глаз, но часто сочетается с косоглазием, причём эти расстройства взаимозависимы: возникшее по какой-то причине косоглазие может приводить к амблиопии, и наоборот.

Амблиопию, связанную с косоглазием, в отечественной литературе называют *дисбинокулярной амблиопией*, а в зарубежной – *strabismic amblyopia*. Различают также следующие виды амблиопии: *рефракционную*, обусловленную низким качеством сетчаточных изображений из-за сильных нарушений рефракции; *анизометрическую*, возникающую из-за различий левого и правого изображений по размеру (в случае асимметрии оптики двух глаз); *обскурационную (депривационную)*, связанную с наличием преграды для нормального прохождения световых лучей к сетчатке – бельма на роговице, помутнения хрусталика, сужения глазной щели вследствие птоза и др.; *истерическую*, внезапно развивающуюся у людей с неустойчивой психикой при сильном испуге или в стрессовых ситуациях (Аветисов, 1986; Шамшинова, 2001; Кащенко и др., 2016).

Последние два десятилетия ознаменовались детальными исследованиями проявлений амблиопии разного вида на функциональном и морфологическом уровнях: психофизических аномалий, с одной стороны, и изменений в различных мозговых структурах, с другой (Hess, 2001; Hess, Baker, 1984; Hess et al., 1985). Эти исследования позволили установить определенную специфичность функциональных проявлений и морфологических изменений для амблиопии каждого вида, что указывает на необходимость проведения дифференциальной диагностики и индивидуализации функционального лечения в соответствии с уточненным диагнозом.

Результаты исследований дисбинокулярной амблиопии до 2000 г. были суммированы в обзоре Аспер с соавторами (Asper et al., 2000 a, b). Авторы подчеркивали, что амблиопия – это намного больше, чем снижение остроты зрения, это синдром, включающий ещё целый комплекс зрительных и глазодвигательных нарушений: снижение контрастной чувствительности, усиление краудинг-эффекта, ухудшение показателей аккомодации, пространственной локализации, внимания, временных характеристик. Подтверждения этого можно найти и в более поздних работах (Mirabella et al., 2011; O'Connor, 2011), авторы которых приводят данные о нарушениях различных

зрительных функций, присутствующих у пациентов с амблиопией, несмотря на восстановление остроты зрения до нормы. Аналогичной позиции придерживаются и авторы других обзорных работ по амблиопии (Hamm et al., 2014; Kanonidou, 2011).

Наличие *косоглазия*, если это не микрострабизм, обычно легко заметить по внешнему проявлению: оно выражается в систематическом отклонении (девиации) зрительной оси глаза от направления на рассматриваемый объект в условиях его бинокулярной фиксации. Поскольку большинство людей воспринимают косоглазие как косметический недостаток, оно неблагоприятно сказывается на психологическом состоянии пациента. Однако негативное влияние на внешность – не главное «зло» косоглазия, более существенными являются его физиологические проявления: недостаточное развитие, нарушения в работе и/или подавление (блокировка) монокулярных и/или бинокулярных зрительных механизмов.

Исходя из явно заметных признаков и характера их изменений во времени, различают следующие виды косоглазия: *постоянное* (девиация оси косящего глаза стабильна), *периодическое* (возникающее время от времени), *монолатеральное* (косит один из глаз), *альтернирующее* (попеременно косят оба глаза), *сходящееся* (ось косящего глаза отклоняется к носу), *расходящееся* (ось косящего глаза отклоняется к виску), *суправергирующее* (ось косящего глаза отклоняется кверху), *инфравергирующее* (ось косящего глаза отклоняется книзу).

По происхождению косоглазие подразделяют на два принципиально различных клинических вида – *содружественное* и, более редкое, – *паралитическое*. При содружественном косоглазии аномалии фиксации объекта, на который направлено внимание, проявляются только в условиях бинокулярного наблюдения. Глазодвигательные функции каждого глаза в отдельности обычно близки к норме, и оба глаза (фиксирующий-ведущий и косящий) имеют примерно одинаковые пределы поворотов в соответствующих направлениях. При содружественном косоглазии отклонение косящего глаза от нормальной позиции объясняется не патологией глазных мышц или нарушением их иннервации, а

расстройствами аппарата управления их координированными движениями. Паралитическое косоглазие возникает при парезах и параличах глазодвигательных мышц, что связано с поражением ядер, стволов или окончаний глазодвигательного, блокового и отводящего нервов. Угол отклонения косящего глаза при этом виде косоглазия обычно непостоянен и увеличивается при необходимости смещения взора в направлении, требующем большего участия пораженной мышцы. Дефект глазодвигательной мышцы нередко провоцирует компенсаторные повороты головы.

Причиной содружественного косоглазия могут послужить любые асимметрии, аномалии развития и заболевания, приводящие к неравноправию каналов обработки зрительной информации, поступающей от левого и правого глаз, или к дисбалансу в работе нервного аппарата управления их согласованными движениями. Врожденные и приобретенные различия в оптических свойствах двух глаз, несимметричное крепление мышц к глазным яблокам, односторонние поражения глазных сред вследствие инфекционной болезни, патологии мозговых сосудов – под влиянием таких разнообразных факторов может нарушаться развитие или функционирование тех или иных отделов зрительной сенсорной и окуломоторной систем, обеспечивающих полноценное бинокулярное зрение.

В отсутствие выраженной асимметрии, но при сильных аномалиях рефракции возможно возникновение *аккомодационного* косоглазия. Так, если в случае сильной гиперметропии (дальнозоркости) не использовать надлежащую оптическую коррекцию рефракции, у детей может развиваться сходящееся косоглазие. Безуспешное напряжение аккомодационного аппарата при желании сфокусировать близкий объект на сетчатках глаз автоматически создаст предпосылки не только для перенапряжения аккомодационной системы, но и для чрезмерной конвергенции зрительных осей и может привести к сходящемуся косоглазию. В лечении этого вида косоглазия важно обеспечение полной оптической коррекции, а нередко – и гиперкоррекции. Применение гиперкоррекции хорошо зарекомендовало себя и при постоперационном лечении косоглазия (Рычкова, Рожкова, 2009).

Эффективность лечения содружественного косоглазия существенно зависит от возраста, в котором оно возникло, и срока его существования. Весьма трудно поддается лечению *первичное косоглазие* – дефект, который появляется вследствие неправильного развития бинокулярных механизмов в самом раннем возрасте во время критического периода их формирования. *Вторичное косоглазие*, связанное с нарушением уже сформированных нормальных бинокулярных механизмов в результате травм, перенесенных заболеваний, перегрузок и стрессов, обычно успешно устраняется методами функциональной коррекции.

Методика комплексного функционального лечения косоглазия включает в себя несколько этапов: оптическую коррекцию, плеоптическое, ортоптическое и диплоптическое лечение, тренировки для развития стереозрения на основе бинокулярной диспаратности и увеличения фузионных резервов (Аветисов, Кащенко, 1993; Дубовская и др., 2002; Кащенко и др., 2014, а, б).

Независимо от этиологии косоглазия, оно всегда вызывает глубокие функциональные перестройки в механизмах координации движений глаз и формирования видимых образов, поэтому устранение девиации косящего глаза должно быть неразрывно связано с коррекцией соответствующих мозговых механизмов. Если упор делается на хирургические методы устранения девиации, следует отчётливо осознавать, что после операции пациент фактически получает новую глазодвигательную систему. Оперированного человека следует специально обучать, как ею пользоваться, учить выполнению нужных функций в щадящих условиях. Поскольку это делается далеко не всегда, не удивительно, что в значительном проценте случаев после операции снова появляется косоглазие или развивается сильное доминирование одного глаза при нормальном положении обоих глаз.

Следует учитывать, что у пациентов с косоглазием мозговые механизмы формирования бинокулярных образов и координации движений глаз всегда нарушены в той или иной степени, а не просто временно «выключены». Таким образом, без восстановления мозговых механизмов посредством специальных

упражнений, т. е. без функциональной реабилитации, добиться полного успеха при лечении косоглазия практически невозможно. Более того, во многих случаях косоглазия удастся обойтись *только* функциональным лечением, не прибегая к оперативному вмешательству. Когда у пациентов не выявляется ни существенных аномалий мышечного аппарата глаз, ни патологических изменений в мозге, а в монокулярных условиях зрения не отмечается каких-либо затруднений в фиксации рассматриваемого объекта и слежении за ним любым глазом в любом направлении, прогнозы на успех безоперационного лечения вполне оптимистичны. Если же хирургическая операция неизбежна, функциональное лечение должно проводиться как до неё, так и после. Задача предоперационного лечения состоит в том, чтобы путём специальной адресной зрительной стимуляции в искусственных условиях восстановить деградировавшие мозговые механизмы в максимально возможной степени, подготовив базу для их нормальной работы в естественных условиях после операции. Послеоперационные функциональные тренировки необходимы для того, чтобы добиться чёткой автоматической работы восстанавливаемых бинокулярных механизмов, укрепить их сначала в благоприятных условиях функционирования, а затем – в неблагоприятных, испытывая на прочность путем нормированного введения трудностей (рассогласования двух сетчаточных изображений по контрасту, разобщения аккомодации и конвергенции и другое) (Рычкова, Рожкова, 2009; Кононова, Кононов, 2010; Leguire et al., 1990; Рожкова, Кононов, 2005).

Одним из наиболее широко применяемых методов лечения амблиопии является полное или частичное исключение ведущего глаза из работы. Современные производители медицинской аппаратуры предлагают множество различных альтернатив классической непрозрачной повязке или заклейке ведущего глаза (например, окклюдирующие контактные линзы или жидкокристаллические окклюдирующие очки “Amblyz Glasses” фирмы XPAND). Тем не менее у этой методики есть немало недостатков.

Некоторые исследователи считают, что лечение амблиопии в том виде, в котором оно распространено сейчас (окклюзия или пенализация) (Тимошенко, Штилерман, 2013), плохо переносится детьми, дает скромные результаты и оказывает негативное психологическое воздействие, так как пациент все время чувствует себя нездоровым и неполноценным (Бойчук, 1990; 1992; Webber, 2005, 2007). Немаловажно и то, что применение окклюзии делает детей практически слабовидящими в важный период их развития, и это не может не сказываться на качестве их жизни.

В недавней работе Ли с соавторами (Li et al., 2014) сравнивали результаты лечения амблиопии у двух групп детей, в одной из которых дополнительно к общим методам применялась окклюзия. Был сделан вывод, что окклюзия не улучшает результаты. В другой работе (Kulp et al., 2014) авторы напрямую выражают мнение, что окклюзия ведущего глаза по ряду признаков имеет больше недостатков, чем преимуществ, и не имеет права на существование.

Компьютерные модификации методов функциональной коррекции лишены ряда недостатков классической окклюзии и могут перевести лечение амблиопии на совершенно иной уровень. В этом отношении особый интерес представляют современные 3D-технологии. Согласно имеющимся данным (Black et al., 2012; Li et al., 2013; Hess et al., 2010; Hess, Thompson, 2013), лечение амблиопии при неполной окклюзии с использованием современных 3D-технологий дает гораздо лучшие результаты, нежели полная окклюзия. В работе (Li et al., 2013) авторы применили для функционального лечения игровой принцип – игру в тетрис, – реализованный с использованием очков виртуальной реальности. Испытуемые (молодые взрослые) были разделены на две группы, каждая группа состояла из девяти человек. В первой группе тренировки были одноэтапными и только дихоптическими: ведущему глазу предъявлялось статичное окружение (т.е. та часть мозаики, к которой нужно было пристраивать новые детали) с уменьшенным контрастом, а амблиопичному глазу предъявлялись как окружение, так и падающие объекты, за которыми нужно было внимательно следить. У второй группы было два этапа тренировок: на первом этапе проводились

монокулярные упражнения – только для амблиопичного глаза с окклюзией ведущего, а на втором этапе проводился курс дихоптических тренировок. Продолжительность каждого этапа составляла две недели. Результаты показали значительное превосходство дихоптических тренировок над монокулярными. Как видно из рис. 1.3.1, улучшение показателей зрения в результате тренировок с полной окклюзией в работе Ли с соавторами было довольно незначительным (что исследователи объясняют возрастом пациентов: как правило, для взрослой аудитории лечение полной окклюзией гораздо менее эффективно, чем для детей, поскольку ведущий глаз оказывает у взрослых более стойкое подавляющее влияние), тогда как дихоптические тренировки с вовлечением в работу обоих глаз были более результативны.

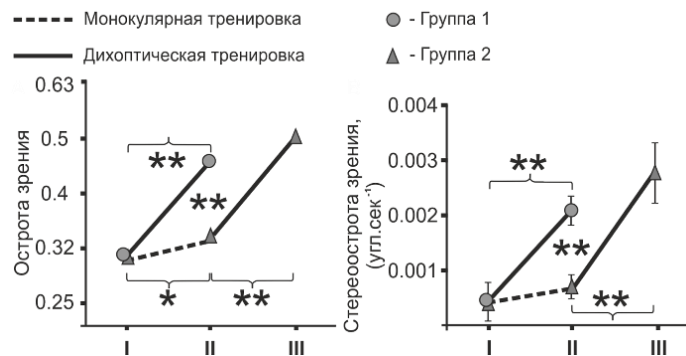


Рис. 1.3.1. Сравнение динамики улучшений зрительных функций при монокулярной (пунктирные линии) и дихоптической (сплошные линии) тренировке (из работы: Li et al., 2013)

Многие авторы придерживаются мнения, что дисбинокулярная амблиопия значительно отличается от других видов амблиопии (Hess et al, 1991, 1983). На кошках были получены и морфологические доказательства различия изменений (Алексеев и др., 2012; Алексеев, Шкорбатова, 2014; 2015; 2016; Топорова и др., 2015). В одной из недавно вышедших статей (Levi et al., 2015) авторы провели обзор доступных на сегодняшний день публикаций, посвященных оценке эффективности различных методов функционального лечения амблиопии, таких как вышеописанная статья (Li et al., 2014). Авторы постарались проанализировать полученные результаты в зависимости от того, какого рода амблиопия была у испытуемых в группах: дисбинокулярная или не дисбинокулярная.

Также, авторы подразделили все использованные для лечения методы на несколько типов:

1. Монокулярное воздействие

- 1.1.Классическая окклюзия (неинтерактивная задача, например, просмотр видео)
- 1.2.Монокулярное обучение восприятию специфических стимулов – perceptual learning (интерактивная, но однообразная и узкоспецифичная задача)
- 1.3.Монокулярная стимуляция видеоиграми (интерактивная монокулярная стимуляция)

2. Дихоптическое воздействие

- 2.1.Дихоптическое обучение восприятию специфических стимулов – perceptual learning
- 2.2.Дихоптическая стимуляция видеоиграми (интерактивная стимуляция обоих глаз, более интенсивно стимулируется амблиопичный глаз)

3. Стереоскопическое воздействие (подразумевало использование монокулярных признаков объекта и согласующихся с ними бинокулярных признаков – диспаратности).

При разделении испытуемых на группы с амблиопией различного генеза авторы получили данные, дающие основания полагать, что эффект того или иного вида тренировок зависит от того, какая амблиопия была у пациента (рис. 1.3.2).

Цитируемые авторы показали, что, как в группе с анизометропической амблиопией, так и в группе с дисбинокулярной амблиопией, наибольший эффект дало использование стереоскопических тренировок. При этом монокулярные тренировки в сравнении с дихоптическими дали больший эффект в анизометропической группе, но меньший эффект – в группе с дисбинокулярными нарушениями. Авторы высказывают мнение, что это хорошо согласуется с природой нарушения: у пациентов с дисбинокулярной амблиопией изначально не было недостатка в монокулярной стимуляции, однако отсутствовали стимулы для фузирования единого образа; у пациентов с анизометропическими нарушениями, наоборот, положение глаз позволяет всегда иметь достаточно стимула для

фузирования, но при этом недостатки оптики подавленного глаза не дают ему достаточно информации для тренировки мозговых механизмов анализа изображения.



Рис. 1.3.2. Данные об успешности лечения пациентов с рефракционной и дисбинокулярной амблиопией при использовании монокулярных, дихоптических и стереоскопических тренировок. Данные суммированы из разных статей (график взят из статьи: Levi et al., 2015).

Авторы подчеркивают, что, очевидно, в основе лечебного эффекта функциональных тренировок лежит изменение привычного баланса нейронального возбуждения, за счет уменьшения части возбуждения для ведущего глаза или усиления возбуждения для подавляемого. Изменение баланса внешних факторов вынуждает зрительную систему искать новые состояния равновесия в сложившихся условиях, за счет чего в работу могут включаться те механизмы, которые до этого недостаточно функционировали.

Для получения положительного эффекта от коррекционных процедур необходимо применение различных способов воздействия на сенсорные и моторные механизмы зрения с рациональной комбинацией и чередованием этих способов в процессе лечения. 3D-технологии позволяют реализовать широкий набор различных методик, в том числе и сложных комбинаций силы сигнала для левого или правого зрительного канала, длительности предъявления,

пространственного распределения видимых одному или другому глазу частей зрительной сцены и много другое. Однако явно ощущается необходимость проведения сравнительных оценок различных методов функциональных тренировок в зависимости от типа и генеза нарушения, метода сепарации, общей длительности воздействия и других параметров стимуляции.

В настоящее время методика функциональных тренировок на базе дихоптической стимуляции набирает популярность (Татаринов, Кащенко, 1993; Levi, 2005; Powers, 2006; Powers et al, 2009; Waddingham et al., 2011; Herbison et al., 2013). Локально подобные технологии развиваются довольно давно (Белозеров, 2001; Елхов и др., 2001). Еще в 90-х годах в ИППИ РАН был разработан компьютеризированный комплекс для лечения различных бинокулярных расстройств «Академик» (Рожкова и др., 1996; 1998). Комплекс также позволял использовать в тренировках преимущества дихоптических тренировок, но был реализован на базе анаглифной технологии сепарации (о технологиях сепарации см. главу 2). К сожалению, сравнительных испытаний эффективности технологии классической окклюзии и дихоптических тренировок для комплекса «Академик» не проводилось.

Суммируя произошедшие за последние двадцать лет изменения во взглядах на происхождение и сущность бинокулярных расстройств и на возможности функционального лечения, необходимо отметить такие практически важные моменты:

- следует считать установленным, что амблиопию можно лечить в любом возрасте, а не до 6-7 лет, как это считалось раньше;
- поскольку в значительном проценте случаев правильное функциональное лечение делает хирургическую операцию по поводу косоглазия ненужной, функциональное лечение следует совершенствовать и делать разнообразнее;
- при определённых видах косоглазия, например, рефракционном, оперировать категорически не рекомендуется, достаточно функционального лечения, хотя оно может быть довольно длительным;

- в тех случаях, когда операции избежать не удастся, для успешного восстановления бинокулярного зрения необходимо проводить функциональное лечение как до, так и после операции – для более точного определения вида и необходимой степени хирургического вмешательства, выявления собственных ресурсов восстановления нарушенных функций и их оптимальной реализации;

- при выборе методов функционального лечения следует обращать внимание на генез нарушения: пациенты с анизометропическими нарушениями нуждаются в большем количестве монокулярных тренировок, дисбинокулярные нарушения почти не поддаются лечению монокулярными воздействиями – вместо этого рекомендуется использовать дихоптическую или стереостимуляцию.

Глава 2. Методы исследования. Современная технологическая база для оценки и коррекции стереозрения и методические подходы, использованные в работе

2.1. Методы создания тестовых стереопар и сепарации изображений

Со времен изобретения стереоскопов стало очевидно, что широкие возможности в изучении бинокулярного зрения представляет предъявление стимульного материала каждому глазу отдельно, т.е. возможность строго контролировать различия изображений, попадающих на сетчатки правого и левого глаз. Технологии разделения изображений стереопары принято называть технологиями *сепарации*, технологиями *дихоптического* или *гангლოსкопического* *предъявления* стимулов.

Перед началом диссертационного исследования было необходимо проанализировать существующие современные методы создания стереопар.

Основным параметром, описывающим качество сепарации, является уровень *перекрестных помех*, за показатель которого принимают процент попадания изображения, предназначенного одному зрительному каналу (глазу) в другой.

В данном разделе будут рассмотрены следующие методы создания стереоизображений:

- 1) Оптико-механический метод
- 2) Шлемы виртуальной реальности (как одна из ветвей развития оптико-механического метода)
- 3) Растровый метод (лентикулярно-линзовый и параллакс-барьерный)
- 4) Цветовой анаглифный метод
- 5) Цветовой спектральный метод
- 6) Временной (другие названия: эклипсный, затворный) метод
- 7) Поляризационный (с использованием линейной или круговой поляризации) метод
- 8) Хромостереоскопический метод

Раздел завершается небольшим сравнением методов, обзором результатов сравнения различных исследователей и заключительными выводами.

Одним из первых, использованных на практике, видимо, можно считать *оптико-механический способ сепарации* изображений. Данный способ использовался и продолжает использоваться в различных стереоскопах и часто подразумевает включение в систему линз или зеркал. Способ требует специального оборудования, однако имеет, как правило, нулевой уровень перекрестных помех. Эта технология предъявления используется, к примеру, в исследованиях, оценивающих влияние уровня перекрестной помехи на качество стереоотображения и восприятия стереообраза, так как такие системы легко позволяют очень точно контролировать изображения стереопары. В практическом применении для создания качественного стереоизображения долгое время такие системы были непопулярны, так как являются довольно громоздкими – кроме небольших по размеру стереоскопов.

Оптико-механическая ветвь методов создания стереоизображений нашла свое развитие в виде *шлемов виртуальной реальности* (VR). Такие системы представляют собой соединение классических стереоскопов и современных дисплеев (Большаков, Грачева, 2016). VR-шлемы переживают очередной пик популярности, однако и сейчас у них есть ряд недостатков в воспроизведении изображений: недостаточная при столь близком расположении экрана к глазам разрешающая способность дисплея, не полное устранение задержки при перестройке стереопары согласованно с движениями головы пользователя, различные абберрации используемых в системах линз и связанное с ними снижение качества изображения и другие (Грачева, Большаков, 2016). На сегодняшний день данные системы кажутся перспективными как для развлекательной индустрии, так и для экспериментальной деятельности, и для использования в функциональной коррекции нарушенного зрения. Тем не менее, уровень вызываемого ими дискомфорта накладывает определенные ограничения на его использование (особенно в лечебной практике) (Хиллис и др., 2006).

В некоторой степени к оптико-механическим системам, но всё-таки выделенным в отдельный класс, можно отнести автостереоскопические системы: растровые, линзово-растровые, параллакс-барьерные. Первое растровое стереоизображение было создано в 1692 году французским живописцем Буа-Клэр (Bois-Clair), считающимся изобретателем растрового метода создания стереоизображений (Рожкова и др., 2016). Пространственного эффекта автор достигал, чередуя на полотне вертикальные полосы изображений, соответствующих левому и правому ракурсу, и используя специальную решетку из вертикальных пластин, закрепленных под прямым углом к поверхности полотна. Позднее такие механические растры использовались в различных системах, в том числе и в первом безочковом стереокинозале в кинотеатре «Москва» с 1941 года (Рожков, Овсянникова, 2003; Рожков, 2006; Майоров, 2011; 2016).

Растровый способ создания стереоизображения используется также в сочетании с использованием длинных лентичулярных линз – *лентичулярно-растровый метод сепарации*. Наложённые поверх специальным образом закодированного изображения линзы создают оптическую систему для адресации изображения каждому глазу (рис. 2.2.1) (Dodgson, 2006).

Еще одним вариантом современной реализации растрового метода является *параллакс-барьерный растровый способ сепарации*. Параллакс-барьерные растры представляют собой реализованный на современных дисплеях принцип щелевого растра: на экране имеется верхний слой ЖК-ячеек, затемняющихся под напряжением и создающим щелевой растр высокого разрешения. Такие системы бывают двух видов: *активный* параллакс-барьер и *пассивный*. Пассивный параллакс-барьер создает стабильные фокальные зоны, аналогичные классической растровой технологии. Активный параллакс-барьер получает обратную связь о положении наблюдателя (камера распознает положение глаз зрителя относительно экрана) и перестраивает растр и закодированное под ним изображение.

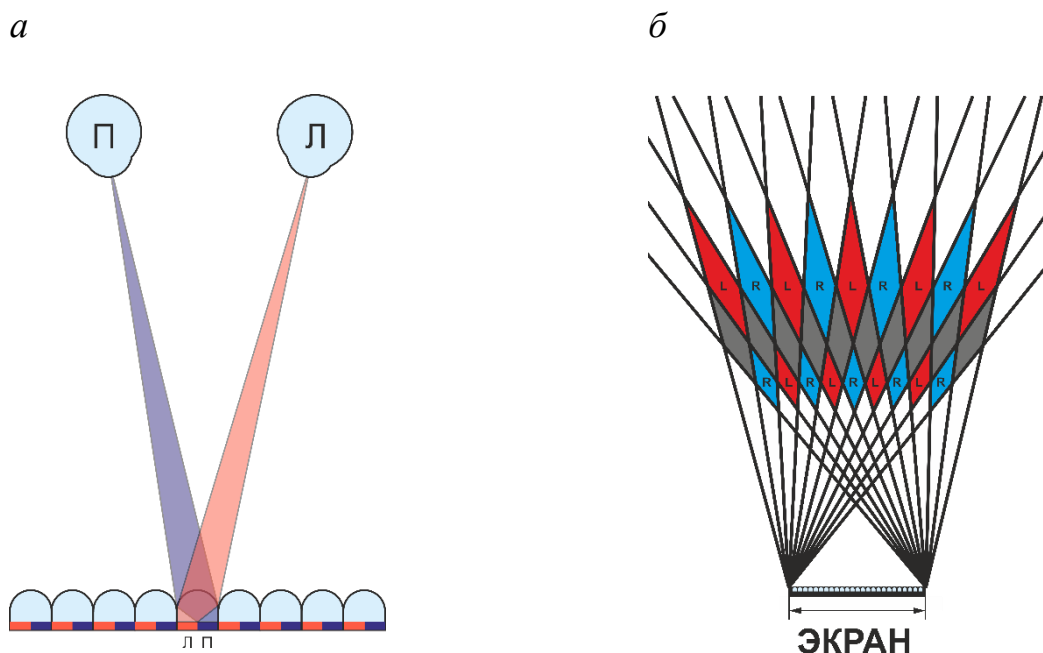


Рис. 2.1.1. *а* – Принцип работы лентичулярного линзового растра. Под каждой линзой закодировано некоторое число изображений (на рисунке – два, для левого и для правого глаза). Линза увеличивает одно из изображений и адресует в определенную зону пространства, называемую фокальной зоной. При правильном положении глаз – каждый глаз в фокальной зоне с нужным изображением – зритель может воспринимать стереобраз. *б* – Особенности растрового метода сепарации. Зоны наличия и отсутствия сепарации в случае двухракурсного варианта автостереоскопии. Очевидно, что одним из недостатков такого способа создания изображений является необходимость точного расположения глаз наблюдателя в правильных фокальных зонах.

Другой метод сепарации, *цветовой анаглифный*, подразумевает генерацию изображений стереопары в дополнительных (или в близких к дополнительным) цветах и использовании соответствующих светофильтров. Данный метод легко реализуем, так как требует только очков со специальными фильтрами, достаточно дешев и доступен в исполнении. Технология имеет ряд недостатков: трудно контролируемый и, как правило, высокий уровень перекрестных помех; возникновение бинокулярной конкуренции из-за различий по цвету и часто по яркости изображений для левого и правого глаз; бедность цветовой гаммы

воспринимаемого образа. К тому же, после длительного использования очков с цветными светофильтрами на короткое время нарушается цветовосприятие. Несмотря на перечисленные недостатки, технология не теряет популярности и достаточно широко используется в лечебных и тренировочных программах.

По принципу, схожему с принципом цветовой анаглифной сепарации, реализована *цветовая спектрозональная технология* (рис. 2.1.2). Метод базируется на использовании сложных гребенчатых фильтров как для проецирования стереопары, так и для ее рассматривания. Каждый фильтр вырезает три зоны спектра – в красной, зеленой и синей области, при этом в фильтрах для левого и правого зрительных каналов эти зоны смещены относительно друг друга. Сейчас данный способ применяется только с проекционной техникой предъявления (то есть в основном используется в кинозалах). К тому же соответствующие очковые фильтры достаточно хрупкие. Преимуществами данной технологии является то, что она не требует специализированного покрытия экрана (в отличие от поляризационного метода), не чувствительна к наклону головы и имеет сниженный по сравнению с временным методом уровень перекрестных помех. Основным недостатком данной системы является низкий КПД по свету: выше, чем у простых анаглифов, но ниже, чем у всех остальных существующих технологий сепарации. Технология была разработана немецкой компанией Infitec и используется в аппаратуре компании Dolby 3D.

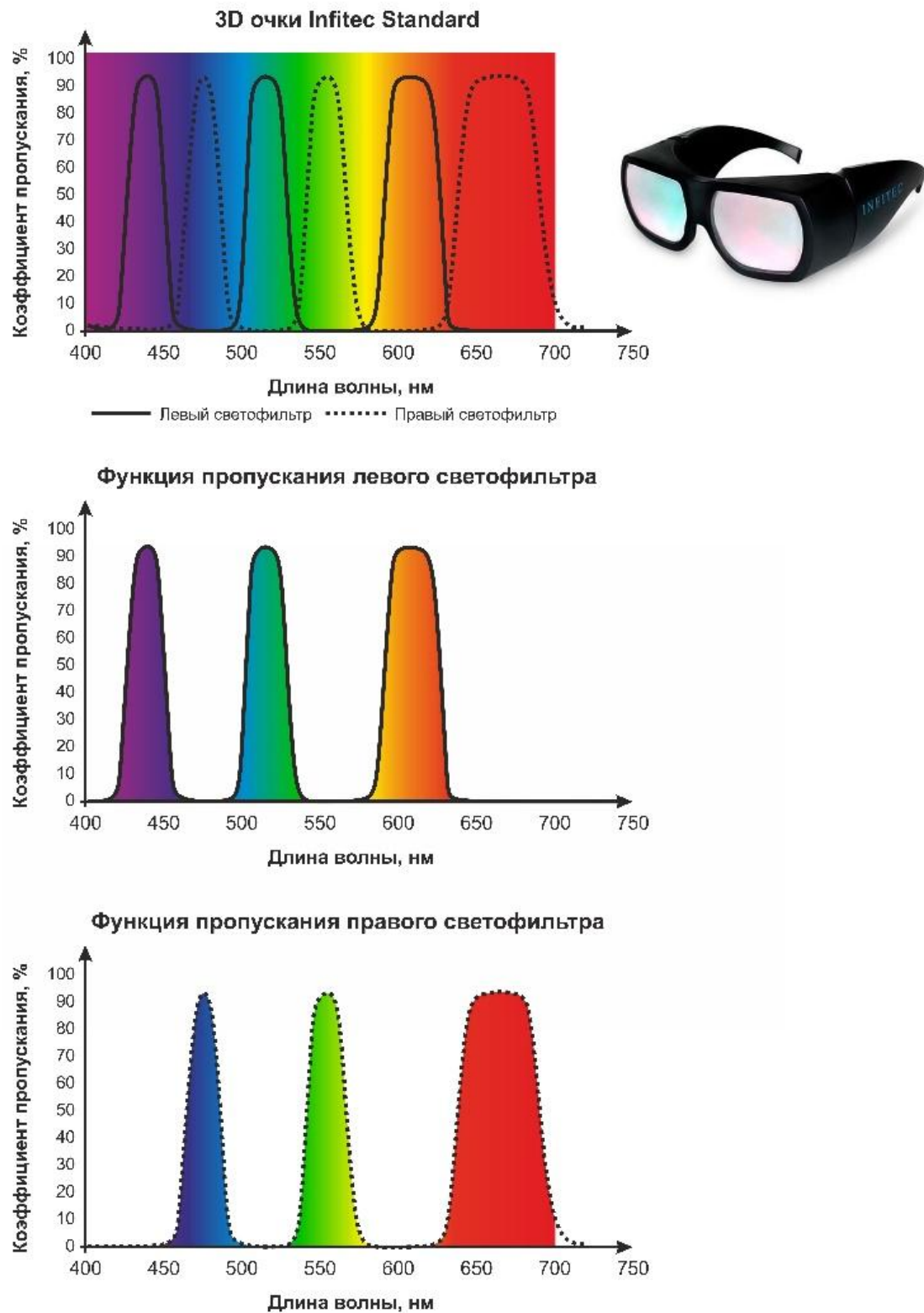


Рис. 2.1.2. Иллюстрация принципа работы цветовой спектрональной технологии сепарации.

Временная (затворная, эклипсная) сепарация (рис. 2.1.3) является одной из самых популярных технологий. Она подразумевает использование специальных очков, создаваемых, как правило, с использованием жидких кристаллов, попеременно пропускающих изображение то в правый, то в левый глаз. Очки синхронизируются с изображением на экране (обычно для этого используются электромагнитные импульсы в инфракрасной области), на котором изображения для левого и правого глаз также предъявляются попеременно.

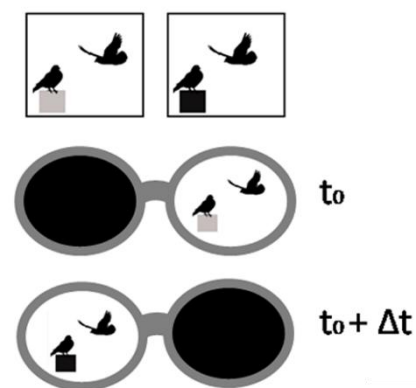


Рис. 2.1.3. Иллюстрация принципа работы временной технологии сепарации.

Сегодня эта технология широко используется в кинотеатрах, так как не требует специализированного покрытия экрана (в отличие от поляризационной). При непроекционном использовании (с мониторами) эта технология может иметь несколько недостатков. Во-первых, некоторые виды используемых в помещениях осветительных приборов (ламп) имеют собственную частоту мельканий, в связи с чем могут возникать биения, выражающиеся как заметные, более низкочастотные мелькания освещения. Во-вторых, при некоторых вариантах реализации метода дополнительными источниками перекрестных помех оказываются поляризационные свойства экранов и очков. Часть производителей используют для 3D телевизоров LCD дисплеи, верхнее покрытие которых содержит фильтр для линейной поляризации света. При этом самая распространенная на сегодня технология создания затворных очков (их также называют активными очками, в англоязычной литературе – shutter glasses, active glasses) предполагает использование двух линейных поляризаторов (поляризующих свет фильтров), плоскости поляризации которых взаимно ортогональны. Между фильтрами располагается жидкокристаллический слой,

поворачивающий плоскость поляризации света на угол 90° . При подаче на жидкокристаллический слой напряжения, он теряет способность менять направление поляризации – свет, поляризованный первым линейным фильтром, не проходит через второй, перпендикулярно поляризующий фильтр. Однако использование линейных фильтров в этой схеме окклюзии в сочетании с LCD дисплеями, также использующими линейные фильтры, приводит к существенной зависимости качества изображения от угла наклона очков (то есть угла наклона головы, если очки уже надеты на пользователя).

При оценке качества подачи стереоизображения через очковые фильтры можно предположить, что сегодня производителями затворных 3D технологий используются слегка различающиеся комбинации жидкокристаллических слоев и жидких кристаллов, однако многие дисплеи тем не менее остаются чувствительны к наклону головы: либо падает яркость изображения, либо повышается уровень перекрестных помех.

Еще одним широко распространенным методом сепарации изображений является *поляризационный* метод (рис. 2.1.4) – базирующийся на использовании поляризационных фильтров. Изначально для сепарации использовались линейно поляризующие фильтры с взаимно ортогональными направлениями для левого и правого глаза. Однако уровень перекрестных помех при использовании линейной поляризации имеет существенную зависимость от угла наклона головы (тот же недостаток линейных поляризаторов рассматривается в части, описывающей затворную сепарацию). Усовершенствованием этого метода является метод, основанный на использовании очковых фильтров с круговой поляризацией. В таких системах контент для каждого зрительного канала поляризован либо по часовой, либо против часовой стрелки, и в таком случае наклон головы не влияет на уровень перекрестных помех. При предъявлении посредством поляризационной технологии в кинотеатрах или больших просмотровых залах требуется установка специального не меняющего поляризацию света экрана (например, посеребренного). Для использования в домашних условиях производятся мониторы и телевизоры с построчной поляризацией пикселей

(над каждой строкой пикселей монитора установлен соответствующий фильтр). Недостатком такого подхода для мониторов является сниженное разрешение по вертикали вдвое, так как каждый глаз видит только четные или только нечетные пиксели. Также, фильтры устанавливаются на некотором расстоянии от формирующих изображение пикселей, поэтому при изменении высоты точки наблюдения может появляться перекрестная помеха. Угол восприятия корректной стереокартины в современных мониторах довольно узок (порядка 13 градусов по вертикали, согласно документации к одному из таких мониторов), что требует контролировать высоту головы наблюдающего.

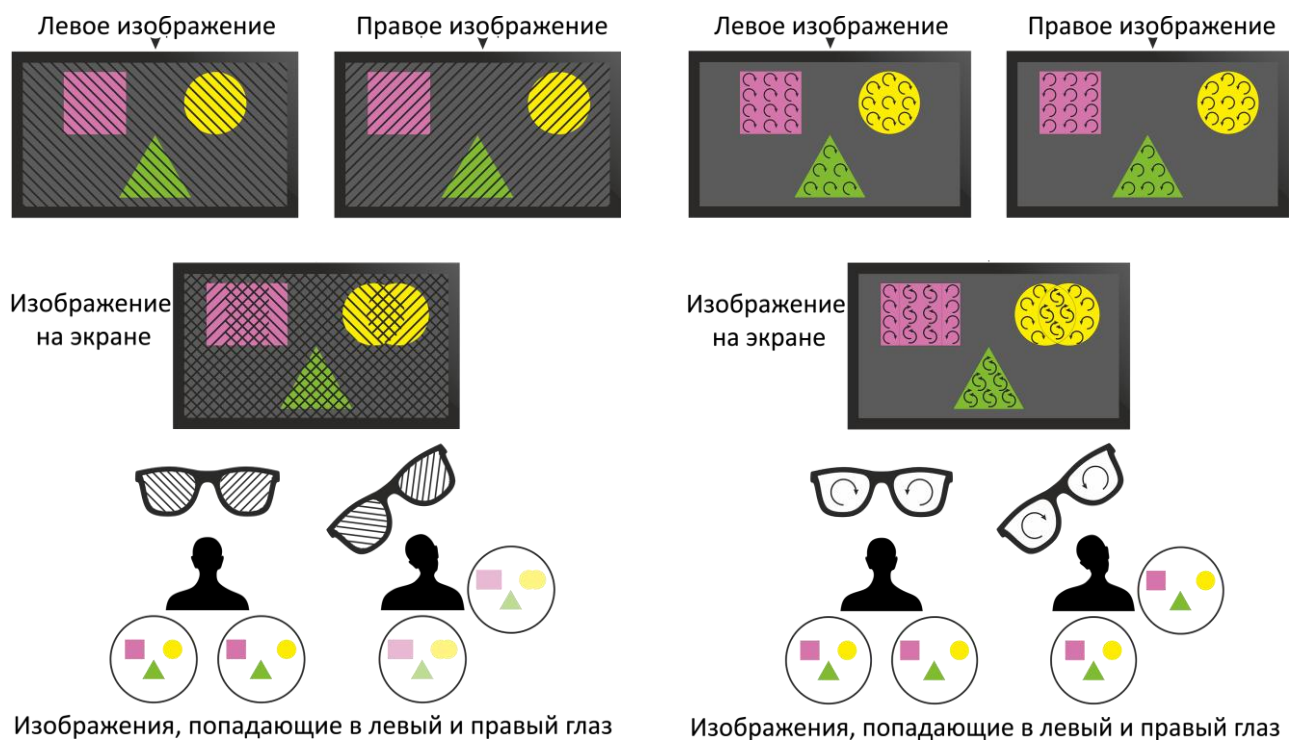


Рис. 2.1.4. Иллюстрация принципа работы поляризационной технологии сепарации и особенности линейной и круговой поляризации при наклоне головы.

Особняком стоит гораздо менее распространенная технология создания стереоизображений – *хромостереоскопическая*. Данный метод базируется на различных коэффициентах преломления света с разными длинами волн. Эффект кажущегося различия в расположении разноокрашенных объектов по глубине часто проявляется в повседневной жизни и всегда привлекал внимание специалистов по восприятию. У разных людей в зависимости от условий эта иллюзия может быть выражена в различной степени. Как показывают

исследования, данный эффект имеет многокомпонентную природу, поэтому является трудно предсказуемым (Рожкова, Грачева, 2014; Howard, Rogers, 2012). Однако добавление пересиливающий естественный хромостереоскопический эффект оптики (призм) дает однозначное искажение проекций объектов разного цвета на сетчатках. Проведенный обзор механизмов естественного хромостереопсиса (Рожкова, Грачева, 2014) и оценка искажений пространственного восприятия у людей, использующих коррекционную оптику (Рычкова и др., 2014), показали, что, несмотря на индивидуальные вариации, данная методика создания тестовых стереопар достаточно перспективна. Существуют специально предназначенные для создания хромостереоскопического изображения очки с тонкими пленками ChromaDepth. В связи со спецификой требуемого для таких стереоизображений контента (Winn et al., 1995), данная технология имеет существенные ограничения применимости. Однако простота технологической реализуемости и дешевизна делают ее перспективной в процедурах массового скринингового тестирования стереозрения. Также, была показана перспективность использования данной технологии не только в диагностике бинокулярного зрения, но и аккомодационной функции (Gracheva et al., 2015).

Обсуждение и замечания

На сегодняшний день важно учитывать смешение различных технологий в реализации 3D показа в проекционных системах. Почти для любой технологии сепарации разработаны системы, позволяющие предъявлять стереопару при наличии только одного проектора, чередуя кадры, что создает высокочастотные мелькания в каждом отдельном монокулярном канале. На принципе поочередного предъявления изображений изначально был основан только временной метод. При этом накопленные результаты нескольких исследований, включающих данные о субъективных оценках пользователями комфортности систем сепарации, показывают, что системы попеременного предъявления создают больший дискомфорт в сравнении с другими методами. Связано ли это с самими

мельканиями (хоть и не различимыми наблюдателем) или с какими-либо другими особенностями – пока говорить трудно.

Интересная работа по сравнению технологий была проведена Морита и Андо (Morita, Ando, 2012). В работе оценивалась комфортность просмотра стереофильма (сепарация при помощи временного метода), обычного 2D фильма, и того же 2D фильма, но просматриваемого во включенных очках для временной сепарации (то есть пользователи смотрели обычный фильм, но очки всё время эксперимента продолжали поочередно мелькать). По результатам исследования стало очевидно, что существенный дискомфорт создавали как раз мелькающие с высокой частотой очки: даже при отсутствии необходимости оценки и фузирования диспаратностей в каждом кадре и при отсутствии перекрестных помех испытуемые всё равно ощущали зрительную нагрузку. Исследование дает основание полагать, что современная тенденция производителей техники для стереопоказа, ведущая к попеременному предъявлению кадров при любой используемой технологии сепарации, может негативно сказаться на комфортности восприятия стереоконтента и на падении популярности данного способа предъявления.

В нашей лаборатории (ИППИ РАН) проводились работы по сравнению двух аналогичных коммерческих устройств, использующих различную технологию сепарации: временную и поляризационную. Результаты нашей работы, как и работы Морита и Андо, не выявили значимых изменений физиологических показателей или снижения работоспособности испытуемых (оценивались показатели рефракции, КЧСМ, острота зрения, зрительная работоспособность (программа «Кодинг»), избирательность зрительного внимания (тест Мюнстерберга), исследование степени концентрации и устойчивости внимания (корректирующая проба или тест Бурдона), скорость зрительного поиска (программа «Цветок»)). Были обнаружены незначительные колебания показателей, определенной тенденции выявлено не было. Однако субъективные оценки (оценка по 10-балльной шкале и подробное анкетирование) показали преимущество устройства с поляризационной сепарацией. Аналогичные выводы

не только о меньшей комфортности временного метода, но и относительно корректного дизайна подобных экспериментов были сделаны и авторами Морита и Андо: зрительная система достаточно устойчива, чтобы не снижать показателей от короткого напряжения, однако дискомфорт от такой нагрузки накапливается и может быть выявлен в субъективных оценках (SSQ тест в случае Морита и Андо и оценка по 10-балльной шкале и анкетирование в наших исследованиях).

На сегодняшний день методы сепарации продолжают развиваться и можно встретить довольно большое разнообразие технологий. Все они имеют преимущества и недостатки. Приведем сравнительную таблицу, примерно отображающую различия стереотехнологий. В данной таблице используется простое цветовое кодирование, описывающее благоприятные (зеленый), неблагоприятные (красный) или нейтральные (желтый) свойства метода сепарации.

В данной работе будут рассмотрены несколько методов создания стереоизображений: анаглифный, как один из самых распространенных и дешевых; поляризационный круговой, так как это один из методов, вызывающих минимальный дискомфорт, и доступен для домашнего использования; растровый, также имеющий минимальный уровень возможности возникновения дискомфорта, доступный на рынке и, что также немаловажно, не требующий использования стереочков.

Остальные методы не рассматривались в рамках дальнейшей экспериментальной работы по следующим причинам. Спектральная технология не представлена на рынке в формате, пригодном для домашнего использования. Затворный метод характеризуется слишком высоким уровнем возникающего дискомфорта с неустановленной причиной. Линейная поляризационная технология во многом проигрывает круговой, в связи с чем также не представлена на рынке в виде устройств домашнего использования. Шлемы виртуальной реальности слишком часто вызывают сильный дискомфорт, к тому же изолированный от экспериментатора экран иногда затрудняет контроль проведения тестирования или оценки, особенно у детей.

*Если монитор поддерживает частоту от 120Гц

2.2. Аппаратура, использованная при проведении работы по оценке и коррекции состояния бинокулярных функций

Учитывая проанализированные выше достоинства и недостатки различных методов сепарации, а также требования к тестовым процедурам для оценки состояния бинокулярной системы и стереовосприятия человека, в данной работе использовались следующие технические средства:

1) Для точного измерения порогов и оценки зрительных функций у пациентов со стереослепотой (глава 3) и для оценки фузионных резервов (глава 4) для предъявления стимулов применяли монитор LG Flatron D2342P-PN, позволяющий предъявлять стимулы с использованием как поляризационной, так и цветовой анаглифной сепарации, и соответствующие стереочки. Это позволяло оценить эффективность использования различных методов сепарации в тестовых и тренировочных процедурах.

2) Для скрининговой оценки стереоостроты (глава 3) были разработаны безочковые линзово-растровые тесты «Бино», не требующие использования стереоскопических очков.

3) Для коррекционной работы с детьми, имеющими нарушения бинокулярных зрительных функций, использовался 3D телевизор LG 32LF620U.

Использование разных 3D-мониторов и их смена связаны с изменяющейся в ходе работы ситуацией на рынке данной продукции. Возможности обоих использованных в работе мониторов были сопоставимы между собой.

На различных этапах работы в экспериментах принимали участие разные группы испытуемых: школьники, студенты, научные сотрудники без ранее выявленных нарушений бинокулярного зрения; учащиеся школы-интерната для детей с нарушениями зрения; пациенты, проходящие лечебные процедуры по поводу амблиопии в кабинете охраны зрения.

Глава 3. Разработка и апробация собственных программ и тестов для точной и скрининговой оценки стереоостроты зрения

3.1. Программа для точной оценки стереозрения на основе субпиксельных диспаратностей

3.1.1. Описание программы

В ходе выполнения диссертационного исследования была разработана собственная программа для точной оценки стереоостроты зрения с использованием субпиксельных диспаратностей.

Так как стереопороги человека нередко составляют единицы угловых секунд, при компьютерной имитации измерительной процедуры требовалось обеспечить генерацию стереопар с такими же малыми значениями диспаратностей. Компьютерная реализация подразумевает имитацию стереоскопического предъявления тестов, при котором восприятие глубины обеспечивается введением относительного смещения по горизонтали сопряженных точек левого и правого изображений стереопары. При использовании компьютерной техники нужно учитывать, что минимальное смещение точек – в один пиксель – не на всех мониторах может обеспечить требуемую точность измерений. Например, при размере пикселя в 0.27 мм относительный сдвиг левого и правого изображений стереопары в один пиксель на мониторе, наблюдаемом с расстояния 6 м, создает смещение виртуального объекта по глубине, соответствующее 4.6 угловым секундам. Несмотря на постоянно уменьшающиеся размеры пикселей современных устройств, не все методы сепарации легко масштабируются. Чтобы обойти это ограничение, в тестовых программах используют имитацию сдвигов на расстояние меньше пикселя для создания субпиксельных диспаратностей. Один из принципов создания субпиксельных диспаратностей для изображений с градуальными переходами яркости иллюстрируется рисунком 3.1.2. Любой монитор производит двойную дискретизацию изображения – по пространственным и по яркостным параметрам – и если дискретизация по яркости достаточно тонкая, то

изображения на экране границ, теоретически сдвинутых на долю пикселя, окажутся заметно различимыми.

Введение субпиксельных диспаратностей позволяет существенно повысить точность оценок стереоостроты, что особенно важно при измерениях на близких расстояниях. Описаны и другие приемы получения субпиксельных диспаратностей. Например, в работе Харверта с соавторами, которые работали с классическими стимулами из трех полос, субпиксельные диспаратности получали, смещая по горизонтали часть дискретов левого и правого изображений на один пиксель в разные стороны (Harwerth et al., 2003). Авторы использовали тестовые вертикальные линии шириной $4'$ и высотой 3.5° ; межстимульный интервал равнялся 1° . В случае таких стимулов для получения диспаратности в $2''$, в каждом канале смещали $1/20$ часть пикселей изображения тестовой линии.

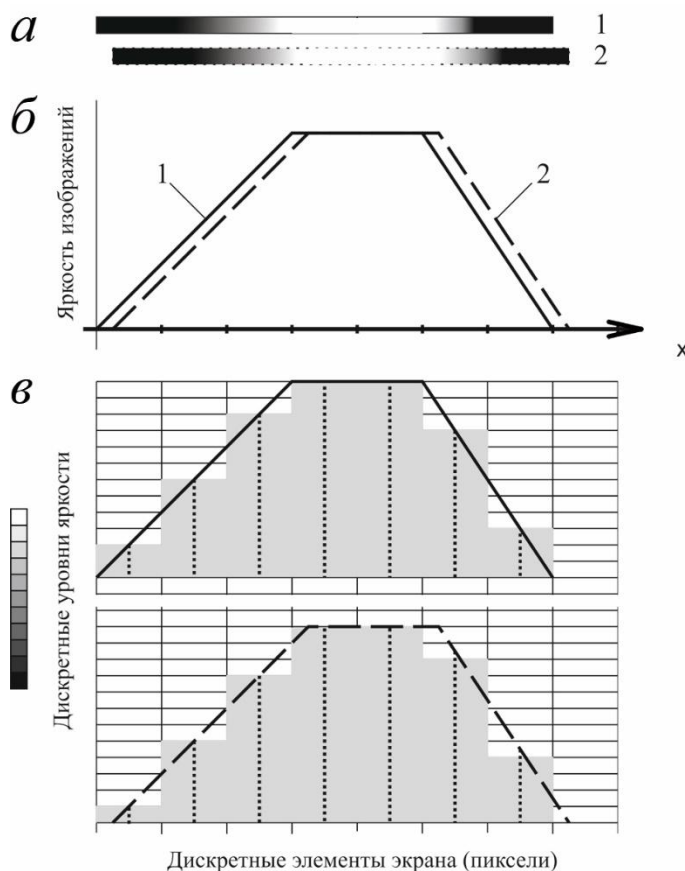


Рис. 3.1.1. Схема, поясняющая формирование субпиксельных диспаратностей.

а – распределение яркости в исходных изображениях с малым сдвигом; *б* – график изменения уровня яркости в этих изображениях по оси абсцисс; *в* – схематическое отображение двойной дискретизации исходного сигнала на дисплее: по уровню яркости и по пространственной координате.

На оси абсцисс отмечены границы пикселей. Каждому пикселю выставляется конкретное значение яркостной переменной. Нижний график соответствует стимулу с субпиксельным сдвигом. Как видно из схемы, уровни яркости на двух графиках имеют разные значения на некоторых отрезках оси абсцисс, что формирует у наблюдателя ощущение небольшого – субпиксельного – пространственного сдвига.

Разработанная при выполнении диссертационного исследования программа «Стереопорог» обеспечивает возможность реализации тестовых процедур с использованием цветового и поляризационного методов сепарации изображений. Программа автоматически масштабирует стимулы для работы на различных расстояниях. В разработанной при выполнении диссертационного исследования программе «Стереопорог» в качестве тестовых стимулов предусмотрены элементы Габора и синусоидальные решетки варьируемой пространственной частоты. Такие стимулы позволяют использовать для создания субпиксельных диспаратностей фазовые сдвиги паттерна, что и было реализовано алгоритмически.

Диспаратности, превышающие размер пикселя, получают, смещая на целое число пикселей по горизонтали все значения яркостей в решетке.

Периодические стимулы позволяют также проводить оценку зависимости показателей от пространственной частоты стимула.

Среди коммерческих тестов, в которых используются субпиксельные смещения, можно отметить отечественный продукт – компьютерную программу «Стереопсис», выпускаемую фирмой «Астроинформ-СПЕ», и зарубежный тест, описанный в работе Баха с соавторами (Bach et al., 2001). Оба теста обеспечивают возможность измерения пороговых диспаратностей величиной до 1".

Предъявление стимулов в программе производится с адаптивным шагом изменения диспаратности по лестничному алгоритму нахождения порогов («staircase procedure», режим 3 шага вниз/ 1 вверх, учитывая, что для порогов стереоостроты чем ниже значение, тем лучшим считается показатель; шаг изменяется вдвое). Как показывают исследования, такие алгоритмы дают качественную оценку порогов, сравнимую с методом определения психометрической функции (Vancleef, 2017). За начальный уровень в наших

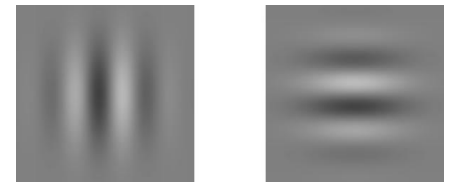


Рис. 3.1.2. Пример тестового стимула из использованной в работе программы «Стереопорог».

экспериментах было принято значение в 60 угл. сек (по результату анализа литературы предполагалось, что это значение должно нормально восприниматься большинством испытуемых). Значение в 60 угл. сек было установлено в программе по умолчанию, однако разработанная программа позволяет указывать начальное значение диспаратности индивидуально для каждого измерения.

Длительность предъявления стимула в программе не ограничена (стимул предъявляется на экране, пока испытуемый не даст ответ). Существуют различные данные о влиянии длительности предъявления на оцениваемые пороги, однако согласно данным Ляховецкого и Власкампа с соавторами (Ляховецкий, 2004; Vlaskamp et al., 2011) длительность предъявления, после достижения определенного порога, незначительно влияет на чувствительность стереозрения.

В программе также предусмотрен режим предварительного тестирования для грубой скрининговой оценки стереопорога или для определения начального значения диспаратности при проведении подробного тестирования. Режим предварительного (скринингового) тестирования использовался только для рекогносцировочного исследования восприятия стереоизображений при искусственном изменении стереопорогов (раздел 3.3.1). В экспериментах, описанных в разделе 3.1, этот режим не использовался.

3.1.2. Результаты апробации программы для оценки стереоостроты зрения

В экспериментальной части работы с программой «Стереопорог» решались следующие задачи:

- сравнение функциональности использования больших многопериодических паттернов (синусоидальных решеток) и паттернов меньшей площади (элементов Габора);
- оценка влияния метода сепарации на величину получаемых порогов стереоостроты;
- апробация функциональности программы, удобства использования в экспериментальной оценке стереоостроты;
- оценка различий показателей стереоостроты зрения в зависимости от пространственной частоты паттерна.

Как отмечалось выше, при компьютеризации тестов для оценки стереоостроты зрения обычно возникает задача создания субпиксельных диспаратностей, которые гораздо легче реализовать, используя паттерны с плавным переходом контраста. В описываемых в литературе программах используются, как правило, синусоидальные решетки (стимулы большой площади). Существует представление о том, что паттерны большей площади дают возможность суммации сигнала, за счёт чего показатели стереоостроты могут получаться лучшими, чем при использовании элементов синусоидальной решетки меньшей площади (например, элементов Габора) (Бондарко и др., 1999). При практическом использовании периодических паттернов относительно большой площади возникает также проблема правильного определения корреспондирующих точек: из-за схожести элементов возникает «эффект обоев», в основе которого лежит фузирование соседних периодов стереопары, что нарушает процесс тестирования и существенно искажает показатели.

Изначально в программе «Стереопорог» было предусмотрено только использование стимулов в виде синусоидальных решеток, занимающих весь экран по ширине. Однако при практическом использовании выявлялись

существенные ошибки в измерениях, вызванные описанным выше эффектом неоднозначного фузирования периодических паттернов. При этом чем выше были используемые пространственные частоты, тем сильнее был наблюдаемый эффект. Важно отметить, что использованные стимулы занимали весь экран, что составляло 5° по горизонтали с расстояния 6 м. Область такой ширины выходит за границы фовеа (2.5°), что, по-видимому, вынуждает зрительную систему фузировать стимул поэлементно, не опираясь, например, на границы экрана. Субъективное описание формирования образа показывает, что зачастую даже видимые четко области «расслаивались» по глубине, то есть фовеально воспринимаемые части стимула фузировались не так, как предполагалось при кодировании стереопары, а со сдвигом осей глаз на соседние периоды. Использование более низких частот (1 цикл/град) позволяло уменьшить проявление этих феноменов «расслоения», однако не всегда устраняло их полностью.

Длительное тестирование на периодических гомогенных паттернах большой площади не только вызывает проблемы корректной корреспонденции элементов, но и дискомфортно из-за отсутствия однозначной точки фиксации взора (возникновение подобного зрительного дискомфорта при наблюдении гомогенных паттернов подробно описано в монографиях (Филин, 2001; 2006)).

В связи с этим в программе был разработан дополнительный режим с использованием элементов Габора (то есть элементов меньшей площади) и проведено дополнительное тестирование программы для сравнения эффективности использования двух видов тестовых стимулов. Новая версия программы «Стереопорог» позволяет генерировать стимулы в очень широком диапазоне частот, однако длительность и утомительность процедуры, а также возможное влияние обучения восприятию данных стимулов на показатели стереоостроты, не позволяли проводить эксперимент на многих частотах. Для оценки стереоостроты посредством синусоидальных решеток были выбраны пять пространственных частот (1, 2, 4, 8, 12 цикл/град). Использование элементов Габора были выбраны три пространственные частоты (крайние значения из пяти

частот, фигурировавших при оценке стереоостроты посредством синусоидальных решеток, были исключены).

Апробацию программы и сравнение двух методов сепарации проводили в два этапа с разными тестовыми стимулами: синусоидальными решетками (серия I) и элементами Габора (серия II). Перед началом обеих экспериментальных серий у всех испытуемых проводили проверку состояния оптики глаз и, при необходимости, обеспечивали полную оптическую коррекцию рефракции. Для предъявления тестовых изображений был использован монитор LG Flatron D2342P-PN с построчной поляризацией пикселей, позволяющий реализовывать как поляризационное, так и цветное разделение изображений стереопары. Все эксперименты проводились с расстояния 6 м от экрана.

В **серии I** в качестве тестовых стимулов использовались две вертикальные синусоидальные решетки размером 5° по горизонтали и 1.25° по вертикали (по ширине равные ширине экрана), расположенные одна над другой. Одна из решеток (верхняя или нижняя, выбранная по случайному закону) имела нулевой экранный параллакс, параллакс другой решетки варьировали по величине и, при нормальном стереозрении, эта решетка воспринималась выступающей из экрана. Испытуемый должен был указать выступающую решетку, и, после ответа испытуемого, параллакс меняли с адаптивным шагом. Наименьший воспринимаемый параллакс принимали за пороговое значение. Схематическая иллюстрация тестового стимула серии I представлена на рис. 3.1.2.1.

Стимулы в виде синусоидальных решеток были выбраны, поскольку они используются в коммерческой программе «Стереопсис», основанной на цветовом анаглифном методе сепарации. В отличие от программы «Стереопсис», наша программа «Стереопорог» предусматривала возможность использования и цветового анаглифного, и поляризационного методов сепарации.

В серии I принимали участие 10 испытуемых от 22 до 47 лет. Для каждого испытуемого проводились измерения на решетках с пространственными частотами 1, 2, 4, 8 и 12 циклов на градус, пространственная частота выбиралась в квазислучайном порядке. Схема процедуры представлена на рис. 3.1.2.2.

Стимулы

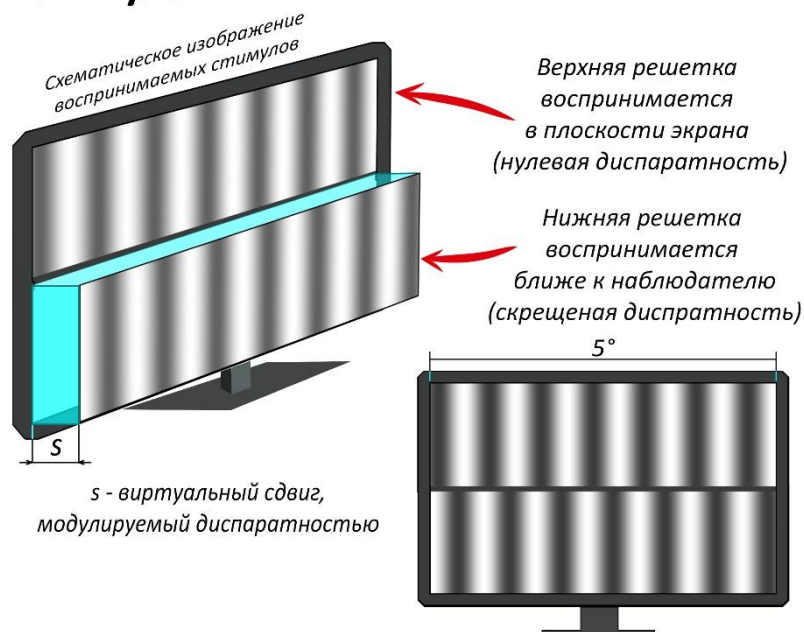


Рис. 3.1.2.1. Схематическое изображение вида тестового стимула и воспринимаемой в стереочках картины.

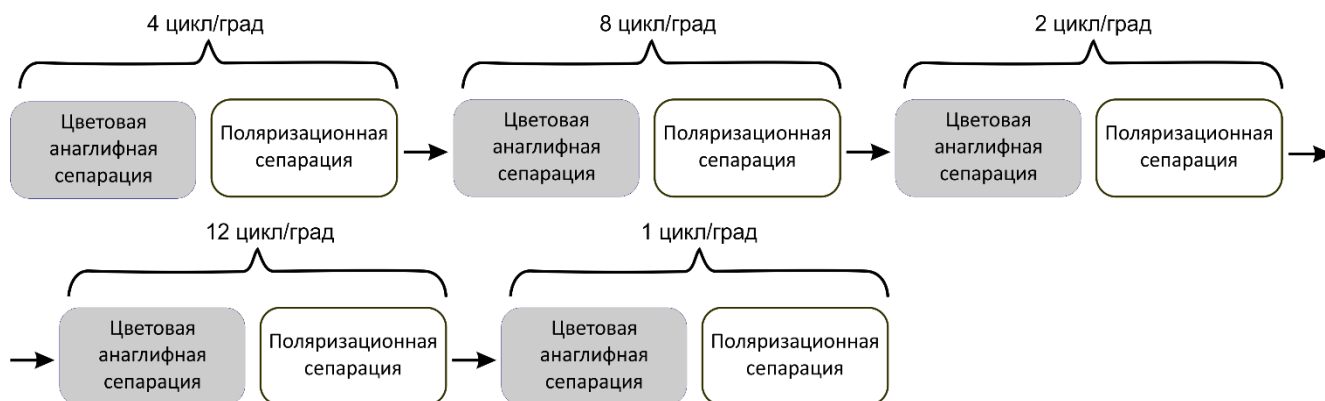


Рис. 3.1.2.2. Схема порядка тестирования в серии I.

Во **серии II** каждая стимульная конфигурация представляла собой четыре элемента Габора (фрагменты решеток в гауссовом окне) с вертикальной ориентацией решеток, а угловой размер всей конфигурации из четырех элементов как по вертикали, так и по горизонтали составлял 2.6° , что примерно соответствует размеру фовеальной зоны сетчатки (зоны наилучшего видения). Два элемента из четырёх имели нулевой параллакс, а у двух других параллакс был отрицательным и варьировал по величине, благодаря чему они воспринимались выступающими из экрана в большей или меньшей степени. Испытуемый получал инструкцию указывать два выступающих стимула; на основе его ответов производилось изменение параллакса с адаптивным шагом. То наименьшее

значение параллакса, при котором испытуемый с заданной вероятностью давал правильный ответ, принималось за стереопорог. Схематическая иллюстрация тестового стимула серии II представлена на рис. 3.1.2.3. Схематическая иллюстрация стимулов с разными пространственными частотами представлена на рис. 3.1.2.4.

В серии II принимали участие 12 испытуемых от 22 до 47 лет. Протокол исследования включал измерения на трёх пространственных частотах: 2, 4, 8 цикл/град. На каждой пространственной частоте измерения проводились сначала в последовательности анаглифная сепарация – поляризационная сепарация, затем в обратной последовательности (рис. 3.1.2.5). Испытуемый должен был указать два выступающих объекта из четырех. Данная конфигурация из четырех элементов Габора дает шесть вариантов ответа, что снижает вероятность угадывания (не 50%, как в случае конфигурации из двух синусоидальных решеток, а около 17%).

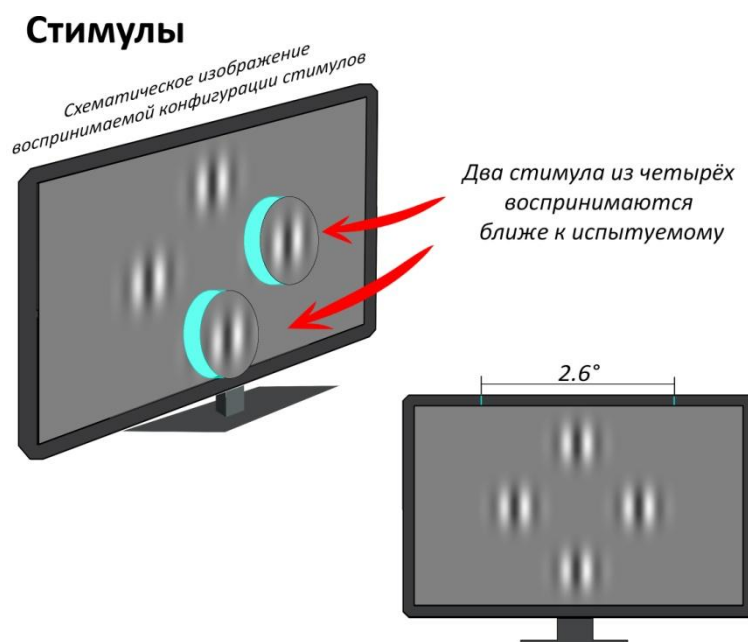


Рис. 3.1.2.3. Схематическое изображение вида тестового стимула и воспринимаемой в стереочках картины.

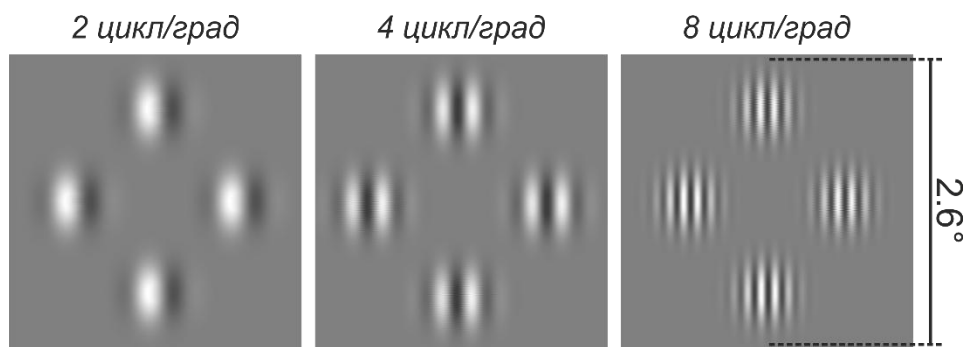


Рис. 3.1.2.4. Вид стимульной конфигурации из серии II (элементы Габора) для трёх пространственных частот.

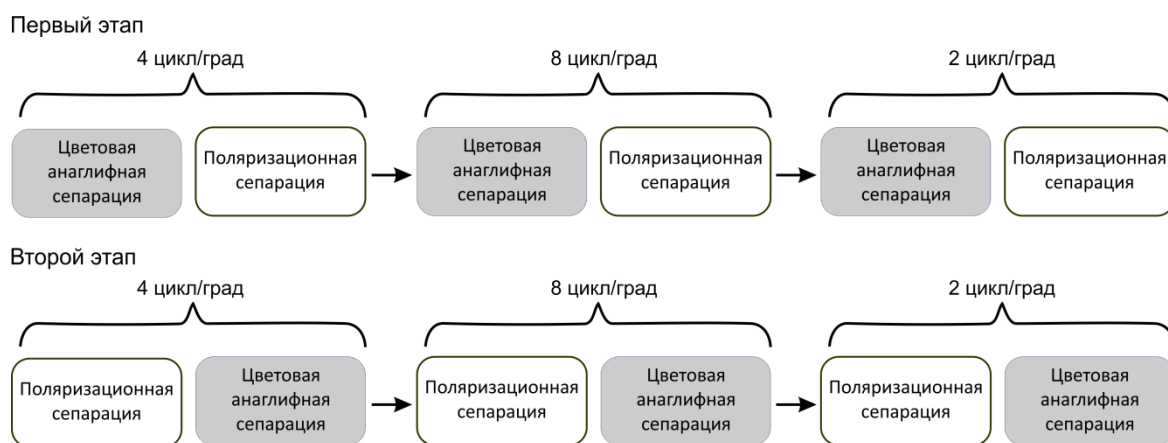


Рис. 3.1.2.5. Схема порядка тестирования в серии II.

Результаты

Измерения серии I показали, что в большинстве случаев поляризационный метод сепарации дает лучшие значения стереоостроты, чем цветовой анаглифный. Использование стимулов вида синусоидальных решеток порой создавало трудности для корректного фузирования: так как паттерн имеет много похожих элементов, возникали трудности однозначной корреспонденции и иногда испытуемыми фузировались соседние периоды решетки, что существенно искажало результаты. Такая ситуация была особенно характерна для высоких частот, где у многих испытуемых были получены повышенные пороги, а для части испытуемых вообще оказалось невозможным получить пороговые значения.

Результаты серии I

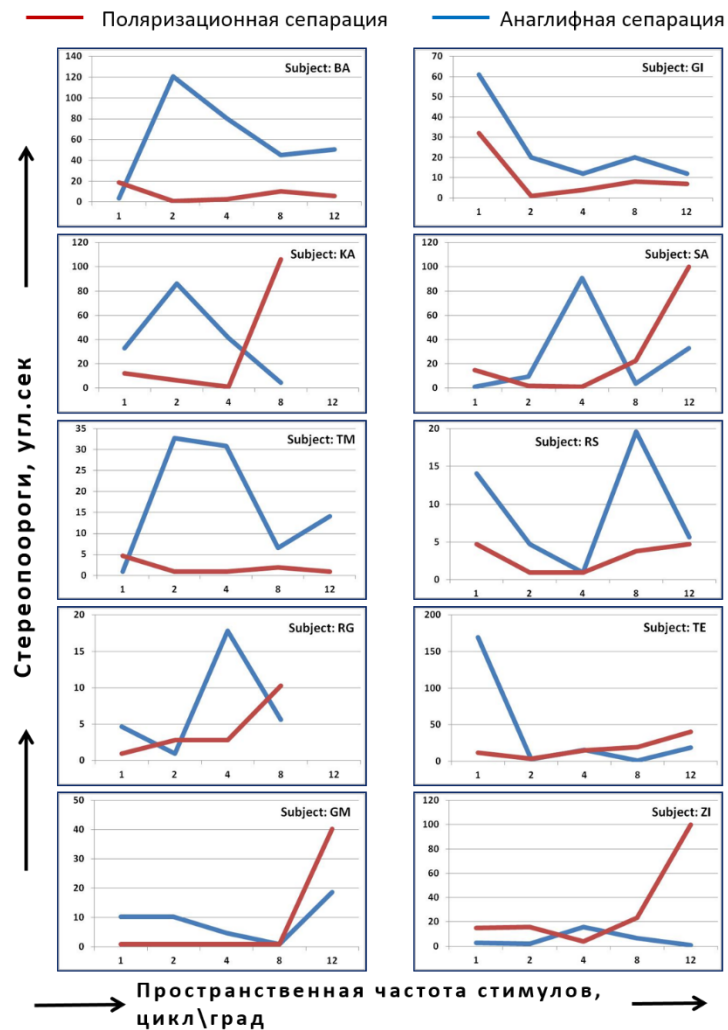


Рис. 3.1.2.6. Серия I. Индивидуальные данные оценки стереопорогов.

В серии II было обнаружено, что при использовании поляризационной сепарации получаемые значения стереопорогов иногда оказываются в два-три раза ниже (что в случае стереопорогов означает лучший результат) по сравнению с данными, получаемыми при использовании цветовой анаглифной сепарации. Смена порядка тестирования с использованием этих двух методов сепарации (для оценки эффекта обучения) не оказывала решающего влияния на соотношение результатов. Отметим, что на высоких пространственных частотах тестирование посредством элементов Габора оказалось более удобным, чем тестирование синусоидальными решетками: процедура была более понятна испытуемым и занимала меньше времени. При этом, в отличие от тестирования посредством синусоидальных решеток, в случае элементов Габора проблема однозначной

корреспонденции гомогенных периодических паттернов не была такой выраженной. На рис. 3.1.2.7 представлены средние данные серии II. Индивидуальные данные серии представлены на рис 3.1.2.8.

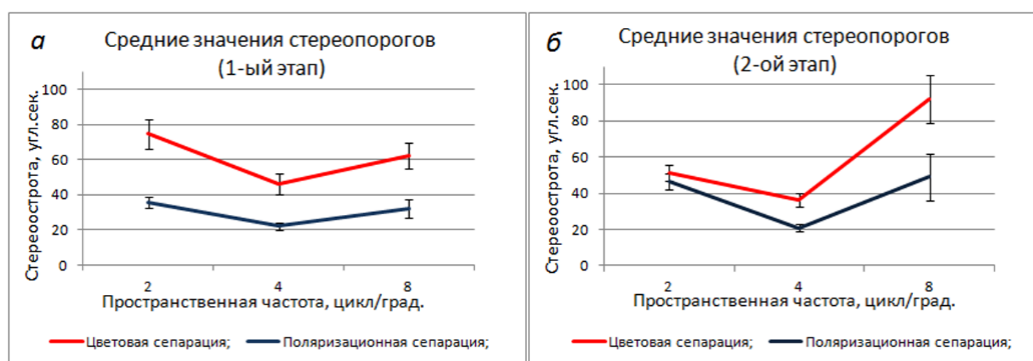


Рис. 3.1.2.7. Серия II. Средние значения стереопорогов. Порядок тестирования первого этапа: сначала анаглифная сепарация, потом – поляризационная (на каждой пространственной частоте); второго этапа: сначала поляризационная сепарация, потом – анаглифная (на каждой пространственной частоте).

Рис. 3.1.2.7 с результатами серии II показывает, что эффект обучения не был настолько сильным, чтобы нивелировать различия средних порогов, полученных при использовании разных методов сепарации: стереопороги, полученные при использовании цветовой сепарации в среднем на всех частотах оказались выше стереопорогов, полученных при использовании поляризационной сепарации.

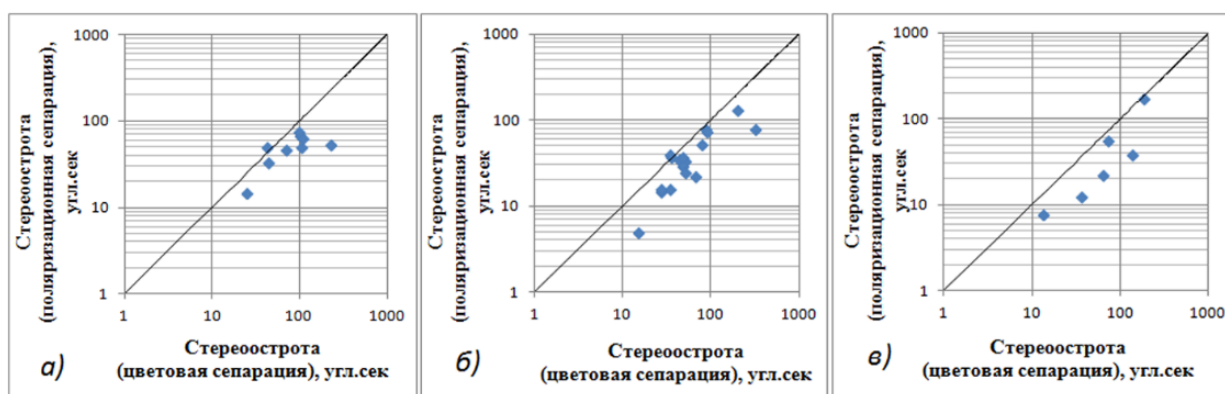


Рис. 3.1.2.8. Серия II. Соотношения между значениями стереопорогов, полученными для разных испытуемых при двух методах сепарации для частот 2 цикл/град (а), 4 цикл/град (б), 8 цикл/град (в). Диагональные прямые соответствуют равным значениям стереопорогов, полученных при использовании цветового и поляризационного методов сепарации. Как видно, большинство точек лежит ниже контрольных прямых, что указывает на меньшие значения

стереопорогов (большие значения стереоостроты зрения), получаемые при использовании поляризационного метода сепарации.

Проведение апробации программы на стимулах вида синусоидальных решеток не показало зависимости значения стереопорога от пространственной частоты стимула. Результаты работ по исследованию зависимости стереоостроты зрения от пространственной частоты стимулов в виде синусоидальных решеток не вполне согласуются между собой (Белозёров, 2003; Васильева и др., 2010; Васильева, 2010; Legge, Gu, 1989; Schor, Wood, 1983; Schor, 1987; Harwerth, Fredenburg, 2003; Lee et al., 2004), что, на наш взгляд, может быть связано с некорректным фузированием стимулов испытуемыми. Оценка зависимости стереоостроты зрения от пространственной частоты при использовании стимулов вида элементов Габора показала, что в среднем по группе наилучшие значения были получены для пространственной частоты в 4 цикл/град. Анализируя протоколы проведения экспериментов и субъективные оценки воспринимаемых пространственных образов испытуемыми, можно предположить, что особенно важное место в данном процессе занимает корректная настройка аккомодационной системы. К примеру, при проведении тестирования на неоптимальных частотах испытуемые часто говорили о восприятии пространственной конфигурации стимулов лишь после случайной фокусировки на других, более удобных аккомодационных стимулах (например, рамках экрана). Принимая это во внимание, кажется логичным получение наилучшего результата именно для частот в 4 цикл/град: данный результат согласуется с показателями наилучшей частотно-контрастной чувствительности (Шелепин и др., 1985; Рожкова, Токарева, 2001; Hess, Baker, 1984) и с работами, указывающими данный диапазон как оптимальный для настройки аккомодационной зрительной системы (Рожкова, 2007; Mathews, Kruger, 1993; Walsh, Charman, 1988; Ward, 1987; Owens, 1980).

Выводы

Экспериментальная работа с программой «Стереопорог» показала, что использование элементов Габора для оценки остроты стереозрения более

эффективно, так как существенно снижает вероятность возникновения эффектов, связанных с неоднозначностью корреспонденции периодов гомогенного синусоидального паттерна.

Использование различных пространственных частот показало, что частота 4 цикл/град оказалась наиболее подходящей для проведения для проведения измерений: в среднем именно на этой частоте у испытуемых наблюдались наилучшие значения порогов и реже возникали артефакты неоднозначной корреспонденции.

При прочих равных условиях используемый метод сепарации оказывал существенное влияние на результаты измерения остроты стереозрения. Средние пороги при использовании анаглифной сепарации в этапе 1 были 46 угл.сек, в этапе 2 – 37 угл. сек, в то время как средние пороги при использовании поляризационной сепарации в этапе 1 были 22 угл.сек, в этапе 2 – 21 угл.сек, то есть значительно лучше, чем при анаглифной сепарации.

3.2. Скрининговые тесты для оценки стереозрения

3.2.1. Описание растровых тестов

В ходе данной работы был разработан вариант печатных скрининговых растровых стереотестов для быстрой оценки состояния бинокулярных функций. Данный тест представляет собой небольшую таблицу формата А5 (тест «Бино-1») или А4 (тест «Бино-2») с закодированными на ней стереообразами.

Для реализации данного теста была выбрана растровая технология сепарации изображений. Большинство современных методов создания стереоизображений требуют использования стереочков, что не всегда удобно при работе с младшей возрастной группой пациентов и с теми обследуемыми, которые уже носят корректирующую оптику (дети часто отказываются надевать 3D-очки или отвлекаются на них, вместо выполнения основной задачи, а пациенты с коррекционной оптикой чувствуют дискомфорт от надевания нескольких пар очков, что также не способствует концентрации внимания). Растровый метод сепарации не требует вспомогательных средств для предъявления стереоизображения, т.к. необходимая оптическая система нанесена в виде пластикового покрытия непосредственно на поверхность тестовых изображений.

В качестве стимула в нашем варианте теста были выбраны случайно-точечные стереограммы: стимулы, в которых закодированный объект не воспринимается монокулярно, но может быть сформирован в результате постобработки бинокулярными отделами мозга путем сравнения сетчаточных изображений в обоих глазах. Данные стимулы могут быть распознаны только при корректной работе высоких уровней бинокулярной зрительной системы – механизмов глобального стереопсиса (Westheimer, McKee, 1980; McKee, 1983; Bach et al., 2001; Momeni-Moghaddam et al., 2012; Westheimer, 2013). При этом для формирования пространственного образа необходимо поступление в мозг достаточно точной монокулярной информации от обеих сетчаток, что дает возможность проводить более быстрое скрининговое обследование сразу нескольких крупных модулей передачи и обработки зрительной информации. При

комбинации со стандартными процедурами обследования (оценка остроты зрения, рефрактометрия) тест может давать информацию о работе более глубоких и сложных механизмов.

Тест включает в себя набор стимулов с разными уровнями бинокулярных параллаксов (таблица 3.2.1.1).

Таблица 3.2.1.1. Значения диспаратностей закодированных объектов в зависимости от расстояния наблюдения для теста «Бино-1», угл.мин.			
Номер, указанный рядом с изображением	Расстояние наблюдения		
	30 см	50 см	100 см
1	4	2	1
2	8	5	2
3	12	7	3
4	15	9	5
5	19	12	6
6	23	14	7
7	27	16	8
8	31	19	9
9	35	21	10
10	38	23	12
11	42	25	13
12	46	28	14

Первый вариант печатного теста (тест «Бино-1») представлен на рис. 3.2.1.1 и рис. 3.2.1.2. В этом варианте тест представляет собой две таблицы формата А5, первая таблица содержит крупный объект с надпороговым параллаксом для первичной оценки стереозрения. Вторая таблица содержит 12 элементов с различными закодированными фигурами и различными уровнями параллакса (от 2 до 28 угл. мин при расстоянии наблюдения 50 см) для градуальной оценки стереоостроты зрения. Данные параллаксы не являются пороговыми для средней выборки пациентов с нормальным зрением, так как точная оценка остроты стереозрения не входит в задачи, поставленные при разработке теста. Однако в работе (Кащенко и др., 2014) значения порогов стереосоостроты у пациентов с косоглазием попадали в этот диапазон (по данным авторов острота стереозрения их группы из 40 пациентов с косоглазием была 28.3 ± 4.8 угл. мин), что говорит о

том, что такие значения диспаратностей могут быть использованы при оценке эффективности проведения лечебных и коррекционно-тренировочных процедур.

Все стимулы в данном тесте имели почти одинаковую текстуру (с одинаковыми размерами и плотностью составляющих элементов).

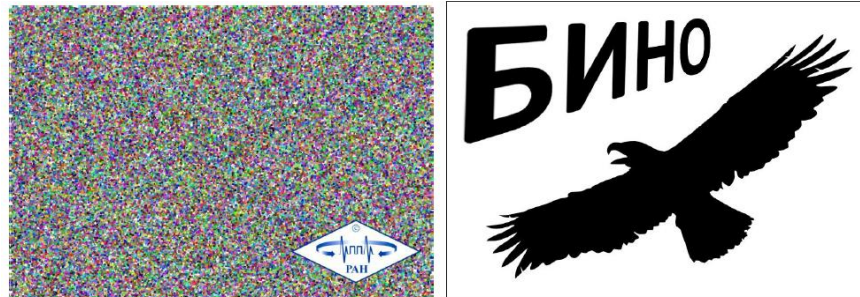


Рис. 3.2.1.1. Внешний вид первого листа теста Бино-1 и закодированных на нем объектов.

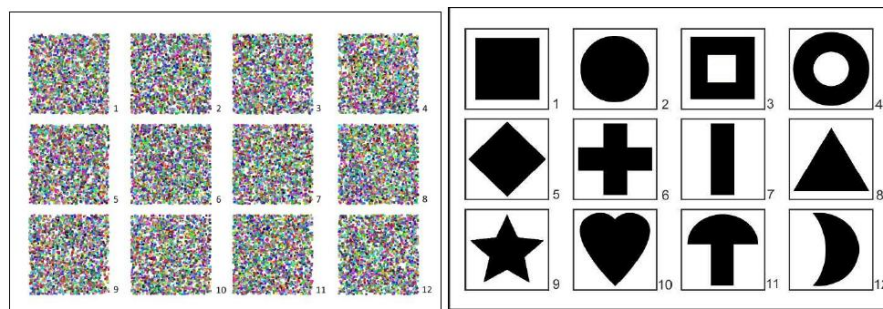


Рис. 3.2.1.2. Внешний вид второго листа теста Бино-1 и закодированных на нем объектов.

Второй вариант скринингового теста (тест «Бино-2») представлен на рис. 3.2.1.3. Диапазон диспаратностей в данном варианте теста – также от 2 до 28 угловых минут для расстояния наблюдения 50 см. В данном варианте теста были добавлены элементы с разными текстурами (с различными размерами зерна). Тест сделан с учетом недостатков предыдущей версии таблиц: (1) добавлена внешняя форма объекта, позволяющая пациентам, не способным увидеть закодированное изображение, не чувствовать психологического дискомфорта при проведении скрининга большой группы детей в одном помещении: на вопрос о форме объекта он всегда может отвечать, называя внешнюю форму стимульного поля; (2) для удобства работы врача (или проводящего тестирование сотрудника) сделаны подсказки вверху поля, указывающие формы объектов, закодированных в разных частях таблицы с сохранением порядка их расположения.

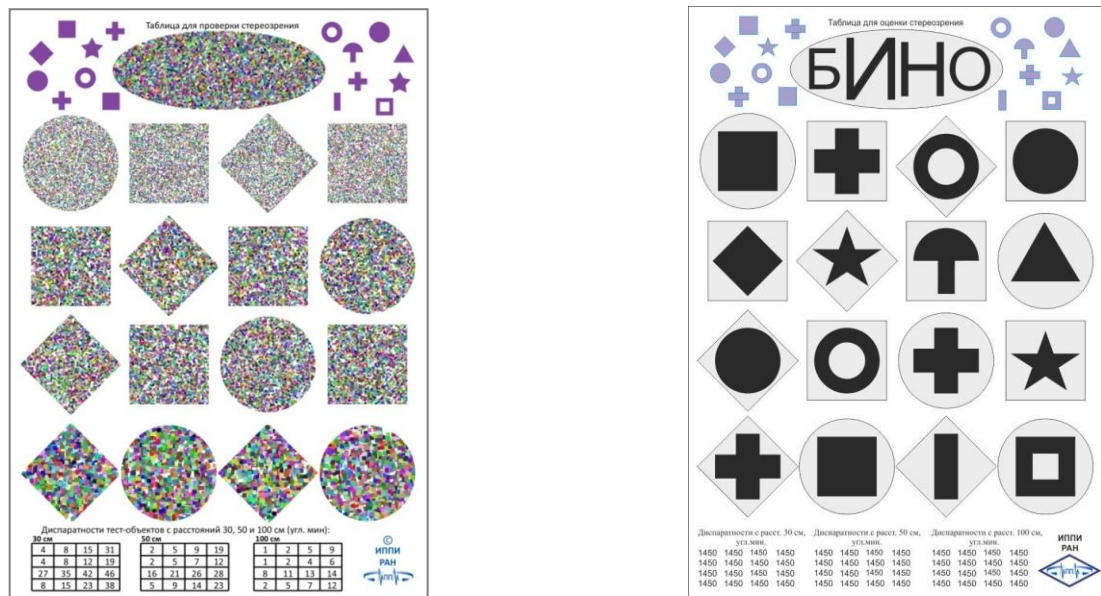


Рис. 3.2.1.3. Растровый тест «Бино-2» и закодированные в нем изображения.

При повороте теста на 90° стереоизображения на тестах не воспринимаются, что можно использовать как своего рода метод пустых проб для уточнения результата скринингового тестирования. В дальнейшем планируется ввести в тест пустые пробы с антикоррелированным или частично коррелированными случайно-точечными стереограммами (Ляховецкий, 2004).

3.2.3. Результаты апробации табличных тестов

Для оценки перспективности использования разработанных тестов была проведена их апробация и сравнение с другими общепринятыми тестами для определения качества бинокулярного зрения, такими как широко применяемый четырехточечный тест (другие названия – цветотест, тест Ворса), тест Баголини, Титмус-тест и растровый тест Ланга.

Апробация проводилась в пять этапов. Целью этапа 1 было определение условной нормы, тестирование проводилось на испытуемых без зрительных аномалий. Целью этапа 2 было сравнение результатов, полученных на испытуемых с нормальным зрением и пациентах с аметропией, но без нарушений бинокулярного восприятия. Этот этап был необходим для оценки селективности теста к небинокулярным нарушениям. Этап 3 проводили для оценки чувствительности теста к бинокулярным нарушениям, в частности к косоглазию. В ходе этапа 4 было проведено сравнение «Бино-теста» с основным аналогом –

тестом Ланга. Этап 5 заключался в повторении этапов 2 и 3 на большей группе смешанных испытуемых.

1) Этап 1

На первом этапе апробации целью было определить уровень условной нормы для скрининговых обследований при помощи «Бино-теста».

Бинокулярное зрение по «Бино-тесту» оценивали в группе с условно хорошим бинокулярным зрением: у всех испытуемых был установлен устойчивый бинокулярный характер зрения по тесту Баголини и по четырехточечному цветотесту. Испытуемые: 157 человек, 8-18 лет (медиана – 14).

По результатам данного исследования предполагалось установить, какие показатели по нашему табличному «Бино-тесту» могут иметь испытуемые, у которых не выявлено аномалий бинокулярного зрения по тестам, широко применяемым в отечественной офтальмологической практике.

Тестирование по «Бино-тесту» проводилось на двух расстояниях: 30 и 100 см, так что помимо прочих параметров, изменялось и угловое значение диспаратности (одинаковый линейный параллакс на стереопаре дает разные угловые диспаратности: меньшие на больших расстояниях).

Все испытуемые данной группы были способны видеть случайно-точечные стимулы «Бино-теста». Из-за особенностей технологии изготовления растровых тестов, изображения с самыми малыми диспаратностями довольно сильно зашумлены, что делает их трудно различимыми для многих испытуемых. В ходе тестирования именно два наименьших уровня распознавались испытуемыми хуже всего (см. табл. 3.2.3.1). Учитывая, что на разных расстояниях данные стимулы задавали разную диспаратность, однако оставались самыми трудно распознаваемыми, скорее всего, эта сложность вызвана именно зашумленностью.

Таблица 3.2.3.1. Результаты апробации «Бино-теста», этап 1 (157 испытуемых).

Расстояние тестирования	Число испытуемых, прошедших весь тест	Число испытуемых, прошедших весь тест, кроме стимула № 1	Число испытуемых, прошедших весь тест, кроме стимулов № 1 и № 2
30 см	43	106	157
100 см	17	45	140

В принципе, различие восприятия тестовых стимулов на разных расстояниях может быть связано с изменением угловой диспаратности закодированных объектов (на большем расстоянии угловая диспаратность меньше, следовательно, задача распознавания объекта труднее) или с изменением общего углового размера стимулов и составляющих их элементов (т.е. влияние может оказывать острота зрения). На восприятие стереоскопических объектов может также влиять разница аккомодационной нагрузки на расстоянии 1 м и 30 см.

Из полученных данных видно, что распознавание стимулов № 1 и № 2 дает неоднозначную картину у испытуемых с устойчивым бинокулярным характером зрения по другим тестам. Таким образом, критерием нормы по «Бино-тесту» следует считать успешное восприятие стереообъектов, начиная с № 3. Уровнем условной нормы можно считать успешное восприятие стимулов с № 3 по № 12, некорректные ответы на зашумленные стимулы № 1 и № 2 допускаются и не засчитываются.

Как скрининговый инструмент, «Бино-тест» дополняет тесты Баголини и четырехточечный цветотест, предоставляя возможность оценивать функционирование механизмов стереоскопического восприятия, чего вышеуказанные тесты не позволяют делать.

Этап 2

На втором этапе тестирование проводилось в двух группах: группе эметропов (без нарушений рефракции, всего 24 пациента, 14-15 лет, средний возраст – 14.2) и аметропов (16 миопов, 2 гиперметропа и 4 пациента с миопическим астигматизмом; всего 22 пациента, 14-15 лет, средний возраст – 14.2). У всех испытуемых по результатам теста Баголини и четырехточечного теста был установлен устойчивый бинокулярный характер зрения.

На данном этапе проверялась адекватность разработанных тестов задачам скрининга в группах пациентов без зрительных нарушений и пациентов с аметропией. У всех пациентов проводилась оценка рефракции, оценка остроты

зрения для дали и оценка бинокулярных зрительных функций для расстояний 30 см и 1 м. Результаты представлены в таблице 3.2.3.3.

Таблица 3.2.3.3. Результаты апробации «Бино-теста», этап 2

Испытуемые	Число испытуемых, успешно прошедших тест			
	Расстояние наблюдения – 30 см		Расстояние наблюдения – 100 см	
	Уровень – 4 угл.мин	Уровень – 8 угл.мин	Уровень – 1 угл.мин	Уровень – 2 угл.мин
Группа эмметропов (N = 24)	21	24	10	23
Группа аметропов (N = 22)	19	22	0	14

При расстоянии наблюдения 30 см обе группы показали близкие результаты. Однако прохождение теста на расстоянии 100 см оказалось более сложным для пациентов с аметропией (по большей части миопов), несмотря на то, что в группе с аметропией все тесты проводились с оптимальной оптической коррекцией (в группе эмметропов – без коррекции). Средняя монокулярная острота зрения для расстояния 4 м в группе эмметропов составляла 1.1, в группе с аметропией (в условиях оптической коррекции) – 1.0.

Результаты данного этапа показывают, что, несмотря на отсутствие в обеих группах выявленных бинокулярных нарушений по тестам Баголини и четырехточечному, устойчивость бинокулярного восприятия у пациентов с аметропией может быть снижена.

2) Этап 3

На третьем этапе апробацию тестов проводили только для расстояния 30 см, в группах с различной рефракцией (смешанные аметропы и эмметропы), но подразделенных на группу с условно «хорошим» (20 пациентов) и с условно «плохим» (20 пациентов) бинокулярным зрением (пациенты, имевшие в анамнезе косоглазие).

В группе с нарушенным бинокулярным зрением 11 человек не смогли увидеть ни одного закодированного тест-объекта. Остальные 9 человек видели только часть объектов, причем более вероятным было восприятие объектов с номерами от 9 до 12 (диспаратности – 35, 38, 42 и 46 угл. мин).

В группе с нормальным бинокулярным зрением у испытуемых возникали трудности только со стимулами № 1 и № 2 (условная норма по результату этапа 1). Тринадцать испытуемых из двадцати смогли увидеть весь диапазон значений. Результаты теста в обеих группах отображены на рис. 3.2.3.1.

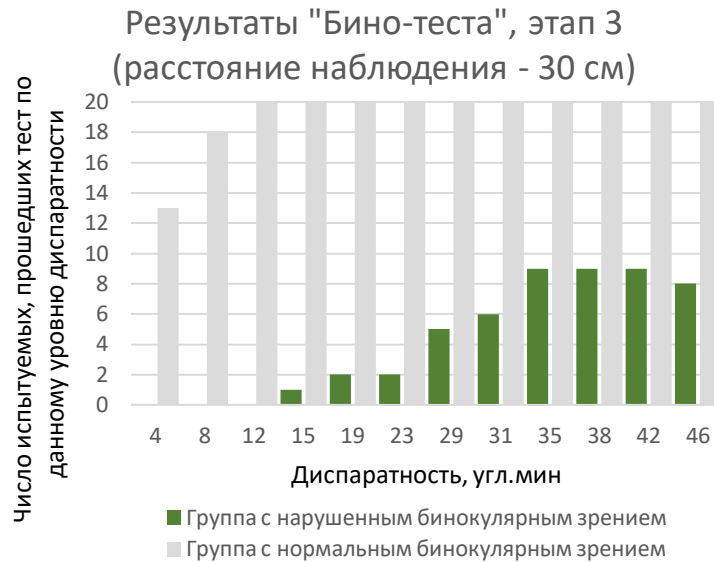


Рис. 3.2.3.1. Результаты апробации «Бино-теста», этап 3.

По результатам данного этапа апробации можно сказать, что тест показал высокую чувствительность к бинокулярным нарушениям, в частности, косоглазию.

3) Этап 4

Целью четвертого этапа было провести сравнение разработанного «Бино-теста» с основным аналогом – тестом Ланга.

Тест Ланга представляет собой печатные таблицы, выполненные в растровой технологии, как и «Бино-тест». В отличие от «Бино-теста», в тесте Ланга закодированы всего три объекта, т. е. есть всего три уровня диспаратности. К тому же, малое количество объектов упрощает запоминание правильного ответа и повышает вероятность некорректной оценки (если пациент заинтересован в том, чтобы показать лучший результат). Также, из-за особенностей кодирования изображения с подгонкой под параметры раstra, объекты в тесте Ланга монокулярно различимы – видимы как слегка размытая область текстуры. Еще одним отличием предлагаемого «Бино-теста» является многоцветная палитра, в то время как тесты Ланга – монохромны. Яркие многоцветные текстуры помогают

привлекать внимание испытуемых младшего возраста, что положительно сказывается на точности оценки, снижает длительность и утомительность процедуры.

Сравнительная апробация проводилась на группе из 17 человек. Всем испытуемым проводили оценку рефракции, остроты зрения для дали, угла косоглазия. У двенадцати испытуемых косоглазие отсутствовало, у остальных пяти угол косоглазия был скомпенсирован операционно и/или призмами.

Помимо теста Ланга и «Бино-теста» (с расстояния 30 см) в ходе сравнительной апробации был также использован широко применяемый за рубежом Титмус-тест (описание теста можно найти в разделе 1.1). В качестве базовых тестов применялись также четырехточечный цветотест и тест Баголини.

У всех 12 пациентов без косоглазия оценка бинокулярными тестами дала одинаковый результат: характер зрения по четырехточечному тесту – бинокулярный, характер зрения по тесту Баголини – бинокулярный, тесты Титмус и Ланг – правильно узнавались все объекты. При оценке по «Бино-тесту» четверо испытуемых не видели стимул № 1 (самая малая диспаратность), что, как показал этап 1, допустимо в рамках нормы; остальные испытуемые видели все объекты.

Из пяти испытуемых с косоглазием характер зрения по цветотесту у четверых был монокулярный, у одного – одновременный; по тесту Баголини – у всех пятерых монокулярный; Титмус-тест, тест Ланга и «Бино-тест» по всем уровням диспаратности дали отрицательные результаты.

Анализ данных сравнительной апробации показал, что «Бино-тест» сопоставим по качеству оценки бинокулярных функций с основным аналогом – тестом Ланга. При сравнении с остальными тестами несогласующихся данных получено не было.

1) Этап 5

На пятом этапе апробация проводилась на большой группе испытуемых (135 человек), которые были подразделены на три группы пациентов: 1) без зрительных нарушений (эмметропы, 59 человек); 2) с аметропией без косоглазия

(45 человек); 3) с аметропией и косоглазием (31 человек). У пациентов с косоглазием угол был скомпенсирован призмами и/или операционно.

У всех испытуемых оценивали монокулярную остроту зрения, характер зрения по четырехточечному цветотесту и бинокулярное зрение по «Био-тесту» (с расстояния 30 см).

Обе группы без бинокулярных нарушений, группы аметропов и эметропов, прошли «Био-тест» по уровню условной нормы, хотя группа аметропов справилась с задачей хуже (результаты представлены на рис. 3.2.3.2). Это согласуется с данными этапа 2 и говорит о некоторой чувствительности «Био-теста» к различным зрительным нарушениям, вносящим вклад в бинокулярную интеграцию изображений.

В группе с косоглазием никто из испытуемых не смог увидеть ни одного стимула «Био-теста». По результатам оценки характера зрения у пяти испытуемых была обнаружена ортофория (бинокулярный характер зрения), согласно «Био-тесту» стереоскопическое зрение у пациентов отсутствовало. Это подтверждает сделанное ранее заключение о том, что комплект для тестирования бинокулярного зрения должен включать различные тесты, оценивающие разные механизмы стереовосприятия.

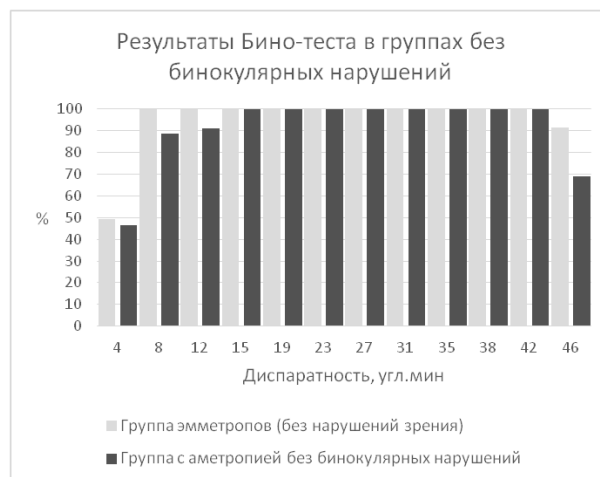


Рис. 3.2.3.2. Результаты апробации «Био-теста», этап 5.

Показанная на третьем этапе высокая чувствительность «Био-теста» к таким нарушениям, как косоглазие, подтвердилась на этом этапе на выборке большего объема. Дополнительно подтвердились результаты этапа 2, что

бинокулярное восприятие может ухудшаться при различных аметропиях (результаты группы с аметропией хуже результатов группы эметропов).

Заключение

В нашей апробации некоторая зависимость результатов теста от расстояния наблюдалась во всех группах, в том числе и среди эметропов. В работах по исследованию зависимости остроты стереозрения от расстояния наблюдения утверждается, что в большом диапазоне расстояний пороговые диспаратности постоянны, и лишь при малых расстояниях (менее 50 см) несколько увеличиваются (Корнюшина и др., 2012; 2013; Sloan, 1951; Ogle, 1958; Brown et al., 1965). Это согласуется с профессиональными нормативами по остроте глубинного зрения для дали и близи, установленными отечественными специалистами: для дали – 4.4", а для близи – 10.8" (Колосова, 1981; Сомов, 1989; Шамшинова, Волков, 1999). Однако есть и иная точка зрения – что при учете всех методических погрешностей для близи и дали должны получаться и получаются одинаковые результаты (Yildirim, 1998; Wong et al., 2002). Наши тестирования проводились не для дали, а для средних расстояний, однако показали нетипичную зависимость от расстояния, возможно, связанную со спецификой использованного метода сепарации. Это следует учитывать при проведении оценки стереозрения при помощи растровых тестов.

Проведенная апробация показала, что разработанные варианты растровых табличных тестов вполне сравнимы по диагностическим возможностям с распространенными тестами для оценки бинокулярных зрительных функций и, не уступая отечественным и зарубежным аналогам, имеют ряд значительных преимуществ. «Бино-тест» обладает многоцветной гаммой и удобным дизайном, что упрощает и ускоряет процесс проведения тестирования. Кроме того, тест содержит 12 или 16 стимулов (в зависимости от модификации теста) с разными значениями диспаратности, что позволяет проводить градуальную оценку нарушений и усложняет запоминание правильного ответа. Предложенные оригинальные тесты дают возможность проведения быстрых скрининговых

обследований для выявления нарушений механизмов бинокулярного стереозрения.

Полученные результаты демонстрируют перспективность включения новых разработанных тестов в комплект для полифункционального тестирования бинокулярного зрения.

3.3. Оценка соответствия между лабораторными тестами и диапазонами стереостроты, обеспечивающими приемлемое качество пространственного восприятия

3.3.1. Рекогносцировочное исследование восприятия стереоизображений при искусственном изменении стереопорогов

На сегодняшний день в офтальмологической практике существует широко употребляемый термин «стереослепота». Пороги, при которых пациент признается стереослепым, определены не точно и варьируют в зависимости от применяемых тестов и от предпочтений исследователей. Наиболее часто встречающимся в литературе критерием стереослепоты являются пороговые значения диспаратности в 60 угл.сек.

Представленные нами в главах 3.1. и 3.2. исследования показали, что люди, способные адекватно воспринимать стереоконтент, зачастую обладают гораздо более высокими стереопорогами. В связи с этим в рамках работы были проведены дополнительные рекогносцировочные эксперименты по восприятию стереоизображений испытуемыми с искусственно повышаемыми стереопорогами.

Методика

Экспериментальное исследование включало 2 этапа: измерение остроты стереозрения (1) и измерение видимого расстояния от экрана до виртуальных стереообъектов (2) в зависимости от силы расфокусирующих линз, приставляемых к левому глазу испытуемого.

Испытуемые. В экспериментах принимали участие четверо молодых испытуемых с нормальными показателями остроты зрения и стереозрения. Испытуемые могли работать в наших экспериментах без оптической коррекции. Отклонения сферического компонента рефракции от нуля у них не превышали 1.0 дптр, а значит, учитывая молодой возраст, испытуемые могли легко компенсировать недостатки оптики аккомодационными усилиями. Значения цилиндрического компонента у этих испытуемых были в пределах физиологической нормы (± 0.5 дптр).

Для сравнения были протестированы двое испытуемых старше 65 лет со стереослепотой. У испытуемого 5 была миопия с различными показателями рефракции двух глаз, а у испытуемого 6 – выраженная гиперметропия. Испытуемый 6 был стереослепым по всем имеющимся в наличии тестам и имел диагноз амблиопия. У испытуемого 5 показатели стереозрения соответствовали вышеупомянутому критерию стереослепоты (60 углю сек) в тех условиях, в которых и проводился эксперимент.

Экспериментальная установка. Для предъявления испытуемым стереоизображений использовали поляризационный 3D монитор LG Flatron D2342P-PN и соответствующие стереоочки. Оценку стереоостроты зрения проводили по скрининговому режиму программы «Стереопорог» для трех расстояний наблюдения: 0.5; 1.0 и 4.0 м. Стимулами служили случайно-точечные стереограммы, кодирующие геометрические фигуры, которые испытуемый должен был опознать. На экране одновременно предъявляли 10 стереограмм с различными диспаратностями. За значение стереопорога принимали минимальную диспаратность, позволяющую испытуемому видеть тестовую фигуру. Диапазоны диспаратностей для указанных выше расстояний составляли 4-37; 2-18 и 0,5-4,6 угл. мин. В каждом диапазоне было десять значений (по числу стереограмм).

Оценку пространственного восприятия испытуемыми виртуальных стереообъектов производили при помощи установки, схема которой приведена на рис. 3.3.1.1. Установка содержала монитор и шкалу с ползунком, установленную перпендикулярно экрану.

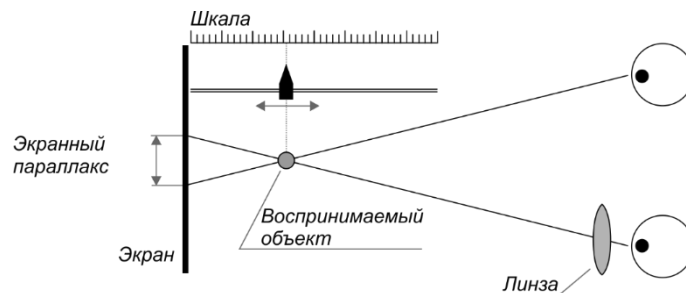


Рис. 3.3.1.1. Схема экспериментальной установки.

Испытуемому предъявляли стоп-кадры из стереофильмов и выделяли объект, видимое расстояние до которого нужно было указать, устанавливая ползунок на том же расстоянии от экрана.

Известно, что острота стереозрения падает по мере увеличения степени размывания одной из частей стереопары (Ляховецкий, 2004; Goodwin, Romano, 1985; Krumina et al., 2004). В ходе каждого измерения на обоих этапах производили постепенное искусственное ухудшение остроты зрения левого глаза испытуемого путем приставления положительных и отрицательных линз из очкового набора (с шагом 0.5 дптр), что приводило к расфокусировке одного сетчаточного изображения и, соответственно, – к повышению стереопорогов (снижению остроты стереозрения).

Результаты и обсуждение

На рис. 3.3.1.2. в левом столбце приведены зависимости измеренной остроты стереозрения от силы расфокусирующих линз, полученные для расстояний наблюдения 50, 100, 400 см у всех испытуемых с нормальным стереозрением. Как видно из графика, у всех испытуемых увеличение силы линз приводило к быстрому возрастанию стереопорогов. В наших условиях эксперимента при использовании описанных тестовых изображений исходные пороги оказались равными 0.5 угл. мин для испытуемых 1, 3 и 4, и 0.9 угл.мин для испытуемого 2.

При расстояниях наблюдения 100 и 50 см диспаратности стимулов скринингового теста слишком высоки для точной оценки стереопорогов, которую удавалось проводить только после приставления линзы достаточной силы, и на соответствующих кривых (оранжевые сплошные и зеленые пунктирные линии левого столбца) отсутствуют центральные части. Кроме того, верхнее значение порога, измеряемое при помощи использованного теста, также было ограничено, поэтому кривые для разных расстояний заканчиваются на разных уровнях.

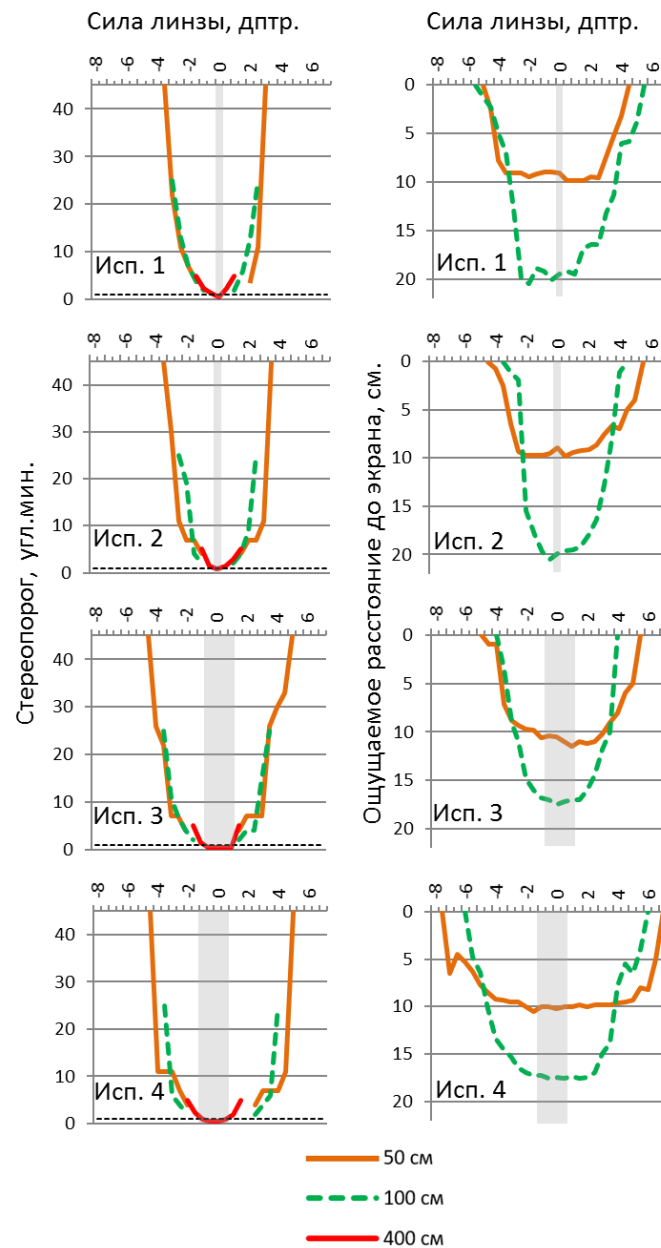


Рис. 3.3.1.2. Зависимости стереоостроты зрения (левый столбец) и воспринимаемого расстояния до стереобъекта (правый столбец) от силы расфокусирующих линз и расстояния наблюдения (50, 100 и 400 см). Серыми прямоугольниками на каждом графике выделены области, соответствующие стереопорогам менее 60 угл.сек.

Полученные для разных расстояний кривые достаточно хорошо совмещались друг с другом, что позволяет легко интерполировать общий вид зависимости стереопорога от силы расфокусирующей линзы. Анализируя графики и числовые данные по порогам, можно заключить, что индивидуальные зависимости порогов от силы расфокусирующих линз заметно варьируют, но для

повышения порогов в 5 раз достаточно было приставить линзу силой от $\pm 0,5$ до $\pm 1,5$ дптр.

В правом столбце на рис. 3.3.1.2. показаны результаты, полученные на втором этапе эксперимента – кривые зависимости воспринимаемого положения виртуального стереобъекта от силы расфокусирующих линз. Воспринимаемое расстояние измерялось от плоскости экрана до видимого образа объекта. Экранный параллакс объекта был такой величины, что при расстоянии наблюдения 50 см стереобраз должен был формироваться на расстоянии около 10 см от экрана, а при расстоянии наблюдения 100 см – на расстоянии около 20 см. Как видно на графиках, результаты оценки расстояния всеми четырьмя испытуемыми были близки к этим значениям в довольно широких пределах варьирования силы линз. За пределами этого диапазона объект постепенно приближался к плоскости экрана и в конце концов ощущение выхода объекта из экрана терялось.

Самый широкий диапазон устойчивости пространственного восприятия был у испытуемого 4: видимая позиция объекта сохранялась почти неизменной в интервале от $-3,5$ до $+3$ дптр при расстоянии наблюдения 100 см и от -5 до $+5$ дптр при расстоянии 50 см. В условиях приставления линз ± 5 дптр стереопороги испытуемого 4 превосходили 40 угл. мин, т.е. определенно попадали в «зону стереослепоты» по критериям большинства используемых тестов. Таким образом, получается, что воспринимаемая позиция стереобъекта практически не меняется и ощущение глубины сохраняется даже при условной стереослепоте (в данном случае искусственной).

По существу, у остальных трех испытуемых наблюдалась аналогичная ситуация: диапазон устойчивости воспринимаемой позиции стереобраза у них был уже, но и стереопороги возрастали быстрее с увеличением силы линзы, т.е. наблюдалось своего рода масштабирование обеих зависимостей.

В случае зрителей, острота стереозрения которых снижена не искусственным путем, а по естественным причинам, ситуация, по всей видимости, осложняется тем, что бинокулярные мозговые механизмы,

определяющие сдвиг левого и правого изображений, могут быть нарушенными или «ленивыми» из-за нетренированности. У наших испытуемых с естественной стереослепотой это проявлялось в неустойчивости стереоэффектов и их зависимости от общей организации сцены, изображенной на кинокадре: в одних ситуациях стереоэффект был достаточно сильным и воспроизводимым (хотя и хуже, чем у испытуемых с нормальным стереозрением), в других ситуациях, казалось бы аналогичных, стереоэффект практически отсутствовал. Испытуемый с более сильной патологией, имеющий диагноз амблиопия, отмечал, что при просмотре стереофильмов он обычно хорошо видит объекты, выходящие из экрана (отрицательный параллакс), и чувствует общее усиление ощущения погруженности в пространство сцены. Таким образом, ни амблиопия, ни «стереослепота» не исключают некоторых специфических пространственных впечатлений от стереофильмов.

Заключение

- Снижение остроты стереозрения, численно характеризующееся повышением стереопорогов, безусловно, снижает качество наблюдаемых при просмотре стереофильмов пространственных сцен, однако определенная возможность адекватно воспринимать стереоэффекты сохраняется в достаточно широком диапазоне повышенных порогов.

- Хотя люди со сниженной остротой стереозрения не видят малых различий в глубине, они могут ощущать преимущества стереофильмов перед обычными фильмами в смысле получения более глубоких пространственных впечатлений и в определенных условиях могут успешно наблюдать сильные стереоэффекты, даже если им поставлен диагноз «стереослепота» и амблиопия.

- До тех пор, пока не будет разработана более точная диагностика и более чёткая классификация нарушений стереовосприятия, термин «стереослепота» следует употреблять с оговорками, указывая использованный критерий.

3.3.2. Обсуждение точной и скрининговой оценки стереоостроты зрения

Рассмотренные в главе 1 литературные данные показывают, что в некоторых условиях стереопороги могут быть равны 5-10 угловым секундам. Полученные нами данные, описанные в разделе 3.1, также подтверждают, что порог стереоостроты зрения может достигать единиц угловых секунд.

Как литературные данные, так и наши эксперименты дают основания утверждать, что значения стереопорогов у одних и тех же испытуемых могут существенно зависеть от условий измерения, вида стимулов и др., и показатели, полученные на разных стимулах, сравнивать можно лишь с большими ограничениями. Как показали наши эксперименты, даже при одинаковых параметрах стимула важно учитывать также выбранный метод сепарации. Сопоставлять данные, полученные при идентичных параметрах стимула, но при разных использованных методах сепарации, представляется некорректным.

В разделе 3.3.1 описан проведенный эксперимент по оценке качества восприятия стереоконтента при завышенных порогах стереоостроты. Как показали результаты эксперимента, восприятие пространственного расположения объектов, закодированного в стереопаре, сохраняется при довольно широком диапазоне стереопорогов, далеко выходящем за порог в 60 угл. сек., хотя именно эта цифра считается диагностической границей стереослепоты. Это говорит о том, что адекватное восприятие пространственной сцены – как искусственно созданной стереопарой, так и естественной, – возможно и при высоких стереопорогах у наблюдателя. Как правило, в реальной жизни редко возникают задачи, требующие точного различения очень малых смещений объектов по глубине, к тому же обычно для распознавания пространственной конфигурации используются в равной степени и бинокулярные, и монокулярные признаки.

В разделе 3.3.1 показано, что тесты со значениями диспаратностей от 3 угл.мин диагностируют бинокулярные нарушения достаточно надежно, результаты таких тестов согласуются с общепринятыми диагностическими тестами (четырёхточечным тестом, тестом Баголини, тестом Ланга, Титмус-тестом). В то же время, тестирование по уровню 60 угл.сек не отражает общей

картины восприятия пространственных сцен. Для оценки адекватности восприятия пространства в естественных условиях точность теста до единиц угловых секунд кажется избыточной.

Важно ввести подразделение тестов для оценки стереостроты на точные и скрининговые. Точные тесты должны обеспечивать возможность оценки стерепорогов с шагом до 1 угл.сек. Проведение теста с такой точностью, как правило, является длительной процедурой, требует от испытуемого усидчивости и желания сотрудничать. Такие тесты необходимы для проведения лабораторных исследований, для подробного изучения бинокулярных зрительных функций, а также для приема на работу, подразумевающую взаимодействие с мелкими деталями и требующую хорошего стереозрения. Скрининговые тесты могут быть реализованы в форме быстро выполняемых заданий, оценивающих стереозрение для ежедневных потребностей по сравнительно высоким уровням порогов, и должны быть введены в широкую офтальмологическую практику для ранней диагностики бинокулярных зрительных нарушений.

Сам термин «стереослепота», применяемый сейчас в офтальмологической практике в случаях, когда пациент не способен видеть тестовые стимулы с диспаратностью в 60 угл.сек, употребляется некорректно и требует пересмотра.

Глава 4. Апробация программы для оценки фузионных резервов

4.1. Описание программы для оценки фузионных резервов

В рамках данной работы была апробирована разработанная в ИППИ РАН интерактивная компьютерная программа «Фузия» для оценки фузионных резервов, позволяющая использовать при измерениях цветовой анаглифный или поляризационный методы сепарации. Программа предусматривала возможность оценивать дивергентные и конвергентные фузионные резервы стимулами различного размера и типа (монокулярно различимыми или чисто бинокулярными: случайно-точечными стереограммами – СТС).

В режиме СТС был реализован метод верификации ответа пациента: при постепенном изменении положения зрительных осей, с определенной частотой менялся вид закодированного в стереограмме стимула. Так как закодированный в СТС объект невозможно различить монокулярно, для восприятия изображений требуется корректная фузия. В конце тестирования – когда фузия становится невозможной и стереобраз пропадает – пациент должен указать, какой стереообъект он видел последним. Так как стимул мог быть различим только в случае успешного фузирования изображений, после момента распада бинокулярного образа пациент уже не способен понять, какая конфигурация закодирована в стереограмме и не сможет дать правильный ответ в конце теста. Таким образом, динамическое генерирование закодированного объекта выполняет роль своеобразного детектора лжи. При других методах тестирования большой проблемой является субъективность ответа. Оценка фузионных резервов при помощи меняющихся СТС позволяет сделать тестирование более объективным.

Компьютеризация методов оценки фузионных резервов позволяет в широком диапазоне варьировать параметры стимула, регистрировать ответы в базу данных и отслеживать динамику изменений. Используемая программа предлагает возможность варьировать скорость разведения левого и правого изображения стереограммы, размеры стереограммы, размеры зерна стереограммы и другие условия проведения процедуры.

4.2. Результаты апробации программы для оценки фузионных резервов с применением анаглифного и поляризационного методов сепарации

Задачей экспериментальной части работы с программой «Фузия» была оценка влияния метода сепарации на показатели фузионных резервов.

При помощи компьютерной тестовой программы, рассчитанной на применение цветового анаглифного и поляризационного методов сепарации, оценивали фузионные резервы у взрослых испытуемых (преимущественно студентов). Тестирование проводили на 3D мониторе LG Flatron D2342P-PN. Измерение фузионных резервов проводили для близи с расстояния 50 см от монитора, как при обычной процедуре измерений с использованием призм. У 22 испытуемых были оценены и дивергентные, и конвергентные резервы. У пяти испытуемых не удалось получить полный комплект данных: у четырёх были измерены только дивергентные резервы, у одного – только конвергентные.

Испытуемым сначала оценивали дивергентные и конвергентные резервы (в случайном порядке) при помощи одного метода сепарации, затем (для основной группы из 22 человек) дивергентные и конвергентные резервы (в случайном порядке) при помощи второго метода сепарации. Метод сепарации и измеряемые резервы (дивергентные или конвергентные) выбирались случайно. Не менее чем через час после первого курса измерений проводился ретест (повторное измерение параметров) со сменой порядка используемых методов сепарации.

В качестве стимулов были выбраны случайно-точечные стереограммы (СТС). При каждом тестировании мы старались сделать стимуляцию максимально идентичной, за исключением метода сепарации: размер тестового стимула, размер зерна тестового стимула, скорость разведения левого и правого изображений стереопары и скорость смены закодированного изображения были одинаковы.

Фузионные резервы являются сложным для оценки показателем, так как существенно зависят от различных параметров стимуляции (от размера и контраста стимула, от наличия или отсутствия монокулярно распознаваемых контуров, от заданного исследователем критерия окончания теста – blur point, break point (см. главу 1)), а также от самого испытуемого (от его

мотивированности, от степени зрительной и общей усталости и др). Также важно, что фузионные резервы являются показателем, для оценки которого нужны усилия по предотвращению диплопии. При проведении таких измерений необходимо также учитывать обучаемость испытуемого и тренируемость фузионных резервов: после нескольких регулярно повторяемых измерений получаемые значения показателей повышаются, так как испытуемый обучается удержанию фузии в ходе тестирования. Соответственно, при повторных измерениях фузионных резервов трудно ожидать абсолютно одинаковых результатов.

Результаты

Согласно полученным данным, метод сепарации существенно сказывается на получаемых показателях. Как конвергентные, так и дивергентные резервы у одной и той же группы испытуемых были лучше при применении поляризационного метода сепарации. Данные по оценке средних значений представлены в таблицах.

Таблица 4.2.1. Конвергентные фузионные резервы, средние значения, градусы (N=23)

	Анаглиф	Поляроид	
Тест	21±1.8	31±2.0	p=0.000
Ретест	25±1.8	32±1.3	p=0.000
	p=0.008	p=0.579	

Таблица 4.2.2. Дивергентные фузионные резервы, средние значения, градусы (N=26)

	Анаглиф	Поляроид	
Тест	6±0.8	9±0.7	p=0.016
Ретест	7±0.8	9±0.7	p=0.000
	p=0.510	p=0.564	

Достоверности оценивались по t-тесту для парных выборок. Достоверное различие значений при ретесте и тесте было показано при оценке конвергентных резервов с использованием анаглифного метода сепарации. В остальных

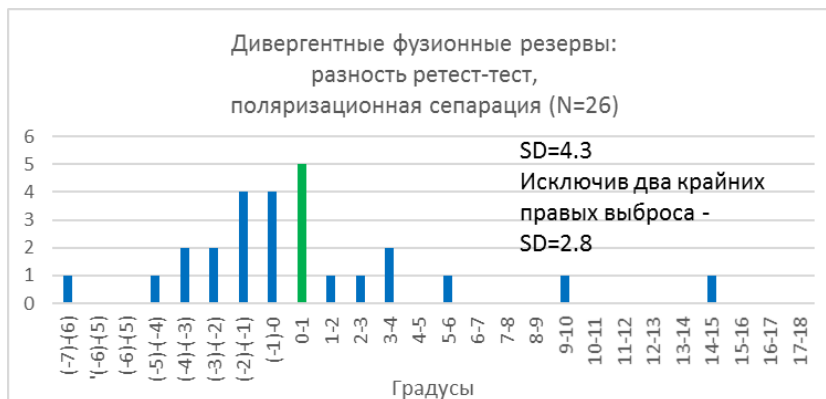
измерениях достоверных различий при сранении ретеста и теста показано не было.



Медиана = (-0.3)



Медиана = 1.7



Медиана = (-0.5)



Медиана = 0.2

Рис. 4.2.1. Гистограммы разностей значений, полученных при ретесте и тесте.

Разность, равная нулю, означает полную повторяемость результата.

Анализ результатов

Оценка повторяемости результатов оценки дивергентных фузионных резервов не выявила значимых преимуществ какого-либо из методов сепарации, оба метода показали себя одинаково надежными. Анализ ретест-тест разностей конвергентных фузионных резервов показал небольшое преимущество поляризационной технологии. При этом важно учитывать, что, как правило, абсолютное значение дивергентных фузионных резервов значительно меньше, чем конвергентных.

Выраженное различие было установлено для абсолютной величины получаемых значений: как для дивергентных, так и для конвергентных резервов показатели, полученные при использовании поляризационного метода сепарации, были значительно лучше показателей, полученных при использовании анаглифного метода. Учитывая, что все параметры стимуляции были идентичны, можно предположить, что использование поляризационного метода комфортнее для поддержания устойчивой фузии. Возможно, что возникающая при использовании анаглифного метода сепарации бинокулярная конкуренция по цвету негативно влияет на устойчивость фузирования. Если данное предположение корректно, то кажется логичным рекомендовать не использовать цветовой анаглифный метод сепарации, так как возникающая бинокулярная конкуренция по цвету – нестабильный процесс и непредсказуемо сказывается на фузировании и получаемых показателях.

Из полученных данных очевидно, что даже при полностью идентичных параметрах стимуляции показатели фузионных резервов, полученные при помощи разных методов стимуляции, нельзя сопоставлять. Очевидно, что разные методы сепарации оценивают разные фузионные резервы: устойчивость фузии в условиях бинокулярной конкуренции по цвету (в случае цветовой анаглифной стимуляции) и устойчивость фузии в отсутствии бинокулярной конкуренции по цвету (при поляризационной сепарации)

Глава 5. Разработка и апробация программ для коррекции бинокулярных функций

5.1. Описание программ для коррекции бинокулярных функций

В данной главе рассмотрены результаты оценки возможностей современных средств сепарации изображений для коррекции нарушенных бинокулярных функций, т.е. неинвазивного функционального лечения. При функциональном лечении бинокулярных расстройств средства сепарации могут использоваться для контролируемого предъявления изображений правому и левому глазу, позволяя имитировать классические приемы окклюзии или пенализации. При этом виртуальная окклюзия дает возможность варьировать пространственную и интерокулярную видимость тестовых стимулов. Принцип создания виртуальной окклюзии описан в первом параграфе данного раздела.

В работе использовались два коррекционно-тренировочных программных комплекса, которые подробно будут описаны во втором и третьем параграфах данного раздела:

- Комплекс программ для коррекции бинокулярных функций СКАБ
- Программный комплекс «Поиск» из комплекта программ «3D-бис»

1) Принцип виртуальной окклюзии

Одним из традиционных приемов для коррекции нарушенных бинокулярных функций является принцип окклюзии – использование непрозрачной повязки или заклейки для одного из глаз, то есть исключение его из зрительного акта.

Современные 3D-технологии позволяют отдельно предъявлять изображения левому и правому глазу, строго регулируя предъявляемый контент. Посредством такого контролируемого предъявления можно имитировать классическую окклюзию, при этом схемы окклюзии могут быть более гибкими и разнообразными: не полностью отключать изображение для ведущего глаза, а делать его менее контрастным; предъявлять часть изображений одному глазу, а часть – другому. Виртуальная окклюзия позволяет не полностью выключать глаз из зрительного акта, так как окружающее пространство видно пациенту. Однако

выполнение зрительной задачи (как правило, реализованной в игровой форме) усложняется дозированным предъявлением контента левому и правому глазу.

Для **амблиопичного** глаза:

Высокий контраст.

Видимость (непрозрачность) - 100%

Для **лучшего** глаза:

Сниженный контраст.

Видимость (непрозрачность) < 100%



Рис. 5.1.2. Схема виртуально окклюзии, использованная в программе «Поиск».

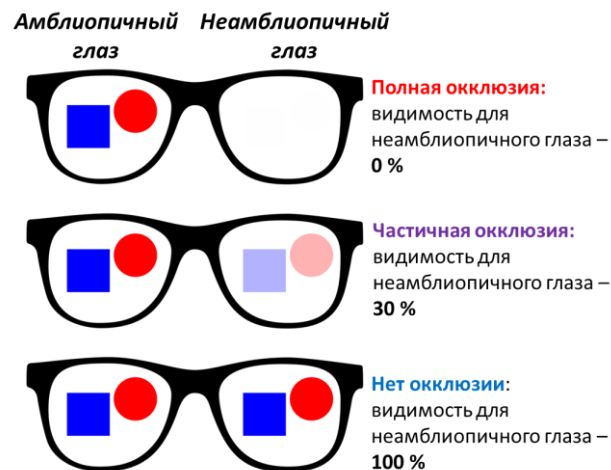


Рис. 5.1.1. Схематичное изображение принципа виртуальной окклюзии: видимость и содержание предъявляемых изображений можно строго регулировать, демонстрируя их как с разной прозрачностью, так и с поэлементным отбором.

Известно, что стандартные процедуры ортоптики с механическим разделением полей зрения, в отсутствие условий для бификсации «обучают» пациента не естественному бинокулярному зрению, а искусственному, гаплоскопическому (Аветисов, Кащенко, 1993; Кащенко и др., 2014, в). Режим постепенного введения стимулов для обоих глаз, реализованный в программе «Поиск», позволяет формировать нормальное бинокулярное зрение.

2) Комплекс программ для коррекции бинокулярных функций СКАБ

Апробированный в рамках данного диссертационного исследования комплекс СКАБ, разработанный в рамках выполнения проекта ФЦП RFMEFI60414X0076, состоит из отдельных модулей, предназначенных для тренировки различных зрительных функций. В данной работе будут представлены результаты испытаний следующих модулей:

- 1) Многопараметрическая стимуляция глаза;
- 2) Развитие остроты зрения;
- 3) Формирование центральной фиксации взора;
- 4) Развитие совмещения изображений;
- 5) Развитие проксимальной аккомодации.

Данный комплекс программ использует иерархический принцип усложнения зрительных задач от модуля к модулю. В модулях 3 и 4 используется виртуальная окклюзия при помощи цветовой анаглифной сепарации изображений.

Модуль многопараметрической стимуляции глаза использует крупные контрастные разноцветные сменяющиеся стимулы и дает простую, не требующую точного совмещения зрительную задачу: стирание всего изображения с экрана. Зрительная задача модуля позволяет справляться с ней даже пациентам с сильно сниженной остротой зрения, для которых на сегодняшний день на рынке представлено недостаточным количество компьютеризированных тренировочных средств.

В *модуле развития остроты зрения* пациенту предлагается более сложная зрительная задача: сопоставление объектов с эталоном, при этом от пациента требуется точно указать мышью на идентичный эталону объект. Стимулы в данном модуле остаются высококонтрастными и разноцветными.

В *модуле формирования центральной фиксации взора* также используется зрительная задача сопоставления объектов с эталоном. Все объекты предъявляются попеременно то одному, то другому глазу пациента. Смена работающего глаза происходит с низкой частотой (около 0.25 Гц). Таким образом тренировка мотивирует пациента фиксировать стимульные объекты обоими глазами, не отводить косящий глаз в сторону. Используется анаглифная сепарация

изображений.

Модуль развития совмещения изображений, как и предыдущие два модуля, использует игровую схему сравнения объекта с эталоном. При этом в данном модуле эталон предъявляется полностью обоим глазам, а остальные объекты состоят из частей, предъявляемых только левому, только правому, обоим глазам. Для правильного выполнения задачи пациенту необходимо корректно совмещать изображения для левого и правого глаза. Данный модуль следует рекомендовать тем пациентам, у которых угол косоглазия мал или отсутствует, для закрепления центральной фиксации.

В *модуле развития проксимальной аккомодации* (использовался только во втором этапе апробации комплекса СКАБ) были задействованы несколько дисплеев, расположенных на разных расстояниях от глаз пациента. Различные зрительные задачи предъявлялись попеременно на разноудаленных дисплеях, стимулируя пациента менять расстояние фокусировки, и тем самым тренируя аккомодационную систему.

Во всех модулях данного программного комплекса использовались классические игровые схемы, мотивирующие пациентов отвечать на задания быстрее и точнее; автоматическая регистрация результатов позволяла оценивать прогресс в каждой тренировке.

3) Программный комплекс «Поиск» из комплекта программ «3D-бис»

Реализованная в рамках данной работы интерактивная программа «Поиск» основана на зрительной задаче сравнения объектов с эталоном и выбора идентичного объекта. Наборы стимульных объектов различны по сложности, что обеспечивает возможность выбирать оптимальные изображения для разных возрастных групп и для различных зрительных нарушений (например, более крупные и контрастные для пациентов с существенно сниженной остротой зрения).

Программа дает возможность работать как с классической окклюзией, так и с виртуальной. Виртуальная окклюзия реализована при помощи поляризационной сепарации.

При использовании режима виртуальной окклюзии тренируемому глазу видно всё стимульное поле с максимальным контрастом; видимость стимульного поля для второго глаза можно регулировать по нескольким уровням: 0% (изображение вообще не видно лучшему глазу), 25%, 50%, 75% видимости (непрозрачности).

Как и в программном комплексе СКАБ, игровая схема программы «Поиск» мотивирует пациентов отвечать на задания быстрее и точнее, все результаты пациентов регистрируются в базе данных.

5.2. Результаты апробации модулей программного комплекса СКАБ с цветовой сепарацией изображений стереопары

Описание комплекса СКАБ приведено в разделе 5.1.

Апробация комплекса СКАБ проводилась в два этапа. В ходе выполнения апробации по первому этапу все модули программного комплекса апробировались отдельно, изменения показателей зрительных функций оценивались для каждого упражнения. В ходе апробации по второму этапу иерархически усложняющиеся модули были объединены в серию, и оценка изменений показателей зрительных функций проводилась по итогу прохождения курса тренировок по блоку упражнений.

Первый этап апробации

Первичная диагностика была проведена для 140 пациентов, из них для каждого тестируемого модуля были отобраны группы численностью 11, 13, 21 и 22 пациента.

Все пациенты четырёх групп прошли расширенную диагностику зрительных функций, которая включала следующие процедуры:

- офтальмоскопия с широким зрачком (диагностика состояния сетчатки и зрительного нерва)
- оценка сферической рефракции и астигматизма при помощи авторефрактометра
- оценка характера зрения
- исследование гетерофории (cover test)
- оценка остроты зрения для близи с коррекцией
- оценка остроты зрения для дали с коррекцией
- оценка остроты зрения для близи без коррекции
- оценка остроты зрения для дали без коррекции
- измерение резерва аккомодации

В каждой группе пациенты прошли полный курс лечебных тренировок из 10 сеансов по 10 минут под контролем врача-офтальмолога. По окончании курса

лечебных тренингов все пациенты повторно прошли процедуру расширенной диагностики.

1) *Модуль многопараметрической стимуляции глаза*

Испытуемые: 21 пациент с различными нарушениями зрительных функций.

Таблица 5.2.1. Модуль многопараметрической стимуляции глаза:
измеренные значения основных параметров зрительных функций до и после курса лечебных тренингов

Показатель	Ед. изм.	Измеренное значение		
		До курса лечебных тренингов	После курса лечебных тренингов	Разность
Резерв относительной аккомодации	Дптр	2.58 ±0.16	4.13 ±0.2	1.55
Острота зрения для дали с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0,5 ±0.04	0.61 ±0.05	0.11
Острота зрения для дали без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.22 ±0.04	0.25 ±0.05	0.03
Острота зрения для близи с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.52 ±0,04	0.66 0.05±	0.14
Острота зрения для близи без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.21 ±0.04	0.24 ±0.05	0.03

Наименьшие улучшения выявлялись при оценке остроты зрения без коррекции (средняя прибавка на 0.03 как для дали, так и для близи), что объяснимо, так как в отсутствии необходимой коррекции показатели остроты зрения оказываются сниженными из-за целого ряда таких недостатков оптики глаз, которые невозможно исправить путем тренировок. В то же время было зарегистрировано достоверное улучшение остроты зрения с коррекцией для дали (0.11), и еще большее для близи (0.14). Улучшение остроты зрения для близи, очевидно, связано также с улучшением аккомодационной функции (среднее

увеличение резерва аккомодации – 1.55 дптр).

2) Модуль развития остроты зрения

Испытуемые: 22 пациента с различными нарушениями функций зрения.

Таблица 5.2.2. Модуль развития остроты зрения: измеренные значения основных показателей зрительных функций до и после курса лечебных тренировок

Показатель	Ед. изм.	Измеренное значение			
		До курса лечебных тренировок	В середине курса лечебных тренировок	После курса лечебных тренировок	Разность (до и после курса)
Резерв относительной аккомодации	Дптр	2.55 ±0.09	3.19±0.17	3.80 ±0.10	1.36
Острота зрения для дали с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.45 ±0.04	0.49 ±0.05	0.57 ±0.04	0.12
Острота зрения для дали без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.22 ±0.03	0.26 ±0.04	0.27 ±0.03	0.05
Острота зрения для близи с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.47 ±0,28	-	0.60 ±0.04	0.13
Острота зрения для близи без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.22 ±0.03	-	0.27 ±0.03	0.04

По всем пяти показателям зрения наблюдались улучшения. Аналогично модулю многопараметрической стимуляции глаза, при работе с модулем развития остроты зрения улучшения показателей остроты зрения без коррекции были меньше, чем с коррекцией, хотя, в сравнении с первым модулем, и оказались несколько выше (0.04 для близи и 0.05 для дали).

3) Модуль формирования центральной фиксации взора

Испытуемые: 13 пациентов с различными нарушениями зрения, в том

числе с нарушениями бинокулярного зрения на фоне косоглазия или гетерофории.

Таблица 5.2.3. Модуль формирования центральной фиксации взора: измеренные значения основных показателей зрительных функций до и после курса лечебных тренингов

Показатель	Ед. изм.	Значение
Характер зрения	Сумма баллов по группе (прибавка в конце курса)*	12 (5 - для близи, 7 - для дали)
	Число испытуемых с положительной динамикой	8
	Число испытуемых с отрицательной динамикой	0
Угол косоглазия	Суммарное уменьшение абс. значения угла по группе	3
	Число испытуемых с положительной динамикой	1
	Число испытуемых с отрицательной динамикой	0
Кавер-тест	Суммарное уменьшение модуля угла по группе	13
	Число испытуемых с положительной динамикой	3 (у двоих пациентов угол стал равен нулю)
	Число испытуемых с отрицательной динамикой	0
Острота зрения для близи (без коррекции)	Число испытуемых с положительной динамикой	3
	Среднее улучшение**	0.12
Острота зрения для дали (без коррекции)	Число испытуемых с положительной динамикой	5

	Среднее улучшение**	0.07
Острота зрения для близи (с коррекцией)	Число испытуемых с положительной динамикой	10
	Среднее улучшение**	0.11
Острота зрения для дали (с коррекцией)	Число испытуемых с положительной динамикой	12
	Среднее улучшение**	0.08
Резерв аккомодации	Число испытуемых с положительной динамикой	10
	Среднее улучшение, дптр**	1

* Для удобства анализа и представления результатов, характер зрения считался по системе баллов: 1 – монокулярный, 2 – одновременный, 3 – бинокулярный неустойчивый, 4 – бинокулярный устойчивый, причём баллы для дали и близи суммировались.

** Среднее улучшение по остроте зрения и аккомодации вычислялось только по тем пациентам, у которых было зарегистрировано улучшение. Поскольку у части пациентов уже на предыдущих этапах была достигнута достаточно высокая острота зрения, она практически не менялась в ходе тренировок по данному модулю, имеющему другое назначение.

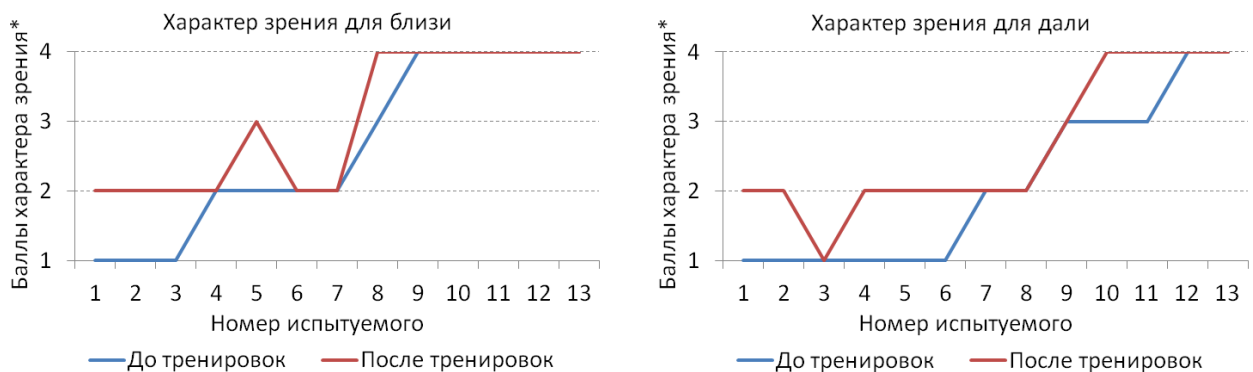


Рис. 5.2.1. Индивидуальная динамика характера зрения*. Пациенты представлены номерами 1-13. У большинства пациентов наблюдаются улучшения показателей хотя бы на одном из расстояний. У части пациентов зрение было изначально бинокулярным, соответственно, прироста показателей в

данных случаях наблюдаться не могло.

В связи с тем, что данный модуль в первую очередь направлен на улучшение совместной работы двух глаз, особое внимание было обращено на бинокулярные показатели.

В результате работы с данным модулем характер зрения улучшился у восьми пациентов; у четырех пациентов изменения были как для близи, так и для дали. Уменьшение абсолютного значения угла косоглазия и гетерофории также говорят об эффективности модуля: у двух пациентов углы гетерофории до тренировки были 5° и -5° ; к концу тренировочного курса гетерофории у обоих пациентов не было. Уменьшение угла косоглазия было зарегистрировано только у одного пациента, но заметное – на 3° .

Важно иметь в виду, что пациенты проходили различные виды лечения и ранее, и, тем не менее, нарушения бинокулярных функций у них по-прежнему сохранялись. Также нужно учитывать, что изменение угла косоглазия меньшее, чем на 1° , достаточно трудно зарегистрировать.

4) Модуль развития совмещения изображений

Испытуемые: 11 пациентов с различными нарушениями зрения. Для работы с данным модулем отбирались пациенты с нарушениями бинокулярного зрения на фоне небольшого (до 10°) угла косоглазии или гетерофории.

Таблица 5.2.4. Модуль развития совмещения изображений: измеренные значения основных параметров зрительных функций до и после курса лечебных тренировок.

Показатель	Единицы измерения	Значение
Характер зрения	Сумма баллов по группе (прибавка в конце курса)*	11 (6 - для близи, 5 - для дали)
	Число испытуемых с положительной динамикой	8
	Число испытуемых с	0

	отрицательной динамикой	
Угол косоглазия	Суммарное уменьшение модуля угла по группе	0
	Число испытуемых с положительной динамикой	0
	Число испытуемых с отрицательной динамикой	0
Кавер-тест	Суммарное уменьшение модуля угла по группе	7
	Число испытуемых с положительной динамикой	2 (у одного пациента угол уменьшился в два раза)
	Число испытуемых с отрицательной динамикой	0
Острота зрения для близи (без коррекции)	Число испытуемых с положительной динамикой	5
	Среднее улучшение**	0.03
Острота зрения для дали (без коррекции)	Число испытуемых с положительной динамикой	1
	Среднее улучшение**	0.01
Острота зрения для близи (с коррекцией)	Число испытуемых с положительной динамикой	7
	Среднее улучшение**	0.05
Острота зрения для дали (с коррекцией)	Число испытуемых с положительной динамикой	4
	Среднее улучшение**	0.02
Резерв аккомодации	Число испытуемых с положительной динамикой	5
	Среднее улучшение, дптр**	0.5

* Для удобства анализа и представления результатов, характер зрения считался по системе баллов: 1 – монокулярный, 2 – одновременный, 3 – бинокулярный неустойчивый, 4 – бинокулярный устойчивый.

** Среднее улучшение по остроте зрения и аккомодации вычислялось

только по тем пациентам, у которых было зарегистрировано улучшение.

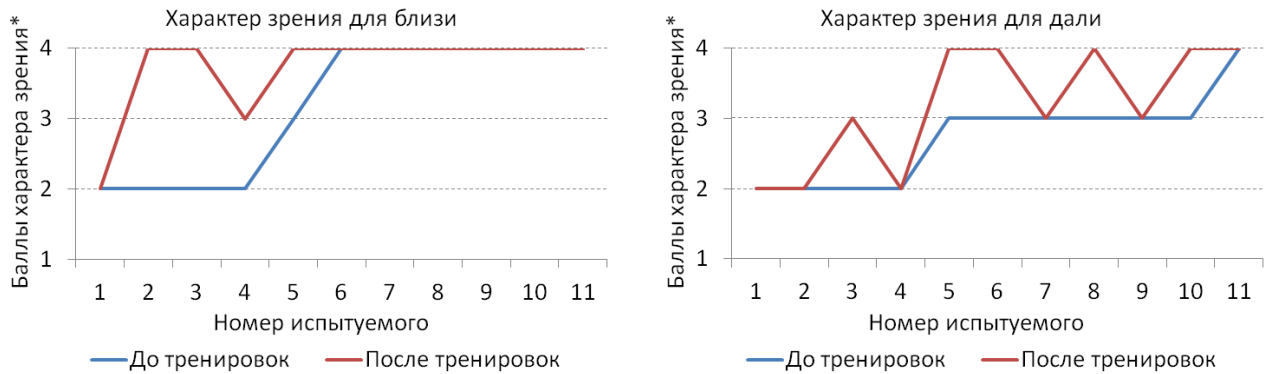


Рис. 5.2.2. Индивидуальная динамика характера зрения*. Пациенты представлены номерами 1-11. У большинства пациентов наблюдаются улучшения показателей хотя бы на одном из расстояний. У части пациентов зрение было изначально бинокулярным, соответственно, прирост показателей в данных случаях наблюдаться не мог.

При работе с данным модулем характер зрения улучшился у 8 пациентов (индивидуальная вариабельность представлена на диаграммах). Уменьшения абсолютного значения угла косоглазия зарегистрировано не было (изначально угол косоглазия был явным только у двоих пациентов в выборке), уменьшение угла гетерофории было достигнуто у двоих пациентов, при этом у одного из пациентов угол уменьшился в два раза (-10° до тренировки и -5° – после).

Заключение по первому этапу апробации

По результатам оценки эффективности модуля многопараметрической стимуляции глаза были получены существенные улучшения по показателям остроты зрения (улучшение остроты зрения для близи с коррекцией на 0.14, для дали с коррекцией – на 0.11) и резерва аккомодации (увеличение на 1.55 дптр).

При тренировках по модулю развития остроты зрения были зарегистрированы средние улучшения по тем же показателям: острота зрения для близи с коррекцией – 0.13, острота зрения для дали с коррекцией – 0.12, резерв аккомодации – 1.36 дптр.

При тренировках по модулю формирования центральной фиксации взора наибольший прогресс был зарегистрирован в состоянии характера зрения: у большинства испытуемых он стал ближе к бинокулярному устойчивому, что

считается медицинской нормой. У части испытуемых были зарегистрированы существенные уменьшения углов гетерофории и косоглазия. Всё это говорит об улучшении способности бинокулярной фиксации.

В результате испытаний модуля совмещения изображений были получены существенные результаты по улучшению характера зрения у испытуемых и по уменьшению угла гетерофории.

Второй этап апробации

На данном этапе тренировки зрительной системы проводились в условиях комбинирования различных видов стимуляции зрительных функций, т.е. в серии тренировок использовались различные модули.

По сокращенной схеме первичной диагностики было обследовано 152 пациента, из которых для участия в апробации было отобрано 42 пациента с различными нарушениями бинокулярных зрительных функций.

Все пациенты апробационной группы прошли расширенную диагностику зрительных функций, которая включала следующие процедуры:

- офтальмоскопия с широким зрачком (диагностика состояния сетчатки и зрительного нерва)
- оценка сферической рефракции и астигматизма при помощи авторефрактометра
- оценка характера зрения
- исследование гетерофории (cover test)
- оценка остроты зрения для близи с оптической коррекцией и без коррекции
- оценка остроты зрения для дали с оптической коррекцией и без коррекции
- измерение резерва аккомодации

Пациенты апробационной группы прошли курс лечебных тренингов на модулях из сформированной серии (около 25 сеансов по 10 минут) под контролем врача-офтальмолога.

По окончании курса лечебных тренингов все пациенты повторно прошли процедуру расширенной диагностики.

Серия состояла из модулей многопараметрической стимуляции глаза,

модуля развития остроты зрения, модуля формирования центральной фиксации взора, модуля развития совмещения изображений, модуля развития проксимальной аккомодации. Результаты представлены в таблицах 5.2.5 и 5.2.6.

Таблица 5.2.5. Результаты для пациентов с бинокулярными нарушениями: измеренные значения основных показателей зрительных функций до и после курса лечебных тренингов с использованием комбинации модулей.

Показатели зрительных функций у детей с бинокулярными нарушениями (42 человека)	Единицы измерения	До лечения	После лечения	Разность
Острота зрения монокулярная для дали без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.25± 0.02 (SD 0.22)	0.31 ±0.02 (δ 0.2)	0.06
Острота зрения монокулярная для дали с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.43±0.02 (SD 0.26)	0.54 δ 0.28 ±0.03	0.11
Острота зрения монокулярная для близи без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.26±0.02 (SD 0.21)	0.35 δ 0.22 ±0.02	0.09
Острота зрения монокулярная для близи с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.46±0.02 (SD 0.25)	0.61 δ 0.21 ±0.02	0.15
Острота зрения бинокулярная для близи без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.34±0.03 (SD 0.25)	0.45 δ 0.25 ±0.03	0.11
Острота зрения бинокулярная для близи с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.54±0.03 (SD 0.25)	0.71 δ 0.19 ±0.02	0.17
Острота зрения бинокулярная для дали без коррекции	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.31±0.02 (SD 0.25)	0.39 δ 0.28 ±0.03	0.08

Острота зрения бинокулярная для дали с коррекцией	Дес.ед. (1/угл. мин)	0.54±0.02 (SD 0.25)	0.67 δ 0.29 0.03	0.13
Объем аккомодации (монокулярно)	Дптр	2.9±0.06 (SD 0.7)	4.2 δ 0.9 ±0.2	1.3
Резерв аккомодации (бинокулярно)	Дптр	2.2±0.15 (SD 1.6)	3.8 δ 0.6 ±0.07	1.6
Угол косоглазия	Градусы	12.5±0.17 (SD 2.7)	7.5 ±0.1 (SD 1.5)	5
Фузионные резервы конвергентные	ПрДптр	4.6, SD 1.3	6.5, SD 2.3	1.9
Фузионные резервы дивергентные	ПрДптр	2.1±0.13 (SD 0.3)	2.9±0.14 (SD 0.7)	0.8

Таблица 5.2.6. Оценка характера зрения для пациентов с бинокулярными нарушениями до и после курса лечебных тренингов с использованием комбинации модулей (указано число пациентов с данным характером зрения).

Показатели зрительных функций у детей с бинокулярными нарушениями (42 человека)	До лечения	После лечения	Разность
Бинокулярный устойчивый характер зрения по цветотесту для дали	0	11	11
Бинокулярный неустойчивый характер зрения по цветотесту для дали	7	0	7
Одновременный характер зрения по цветотесту для дали	5	20	15
Монокулярный характер зрения по цветотесту для дали	30	11	19
Бинокулярный устойчивый характер зрения по Баголини для дали	2	11	9
Бинокулярный неустойчивый характер зрения по Баголини для дали	7	0	7
Одновременный характер зрения	5	21	16

по Баголини для дали			
Монокулярный характер зрения по Баголини для дали	28	10	18
Бинокулярный устойчивый характер зрения по Баголини для близи	6	11	5
Бинокулярный неустойчивый характер зрения по Баголини для близи	4	0	4
Одновременный характер зрения по Баголини для близи	2	21	19
Монокулярный характер зрения по Баголини для близи	30	10	20
Стереотест положительный	2	5	3

В обследованной группе наблюдалось достоверное повышение монокулярной остроты зрения ($p < 0.05$) у всех пациентов и повышение бинокулярной остроты зрения у 6 пациентов, имевших до начала лечения бинокулярный характер зрения для близи. Увеличение объема аккомодации (измеряемого монокулярно) также наблюдалось у всех пациентов группы, а увеличение резерва аккомодации (измеряемого бинокулярно) наблюдалось у 6 пациентов, имевших до начала лечения бинокулярный характер зрения для близи.

Благодаря уменьшению угла косоглазия (полностью устранить угол косоглазия удалось у 8 человек, а среднее уменьшение составило 5 градусов у большинства пациентов группы), а также благодаря уменьшению функциональной супрессии косящего глаза, развитию и повышению устойчивости бинокулярных функций в результате лечения удалось существенно увеличить число пациентов с бинокулярным характером зрения, а у трех пациентов даже добиться появления стереозрения.

Заключение по второму этапу апробации

Результаты применения серии комбинированных тренировок показали эффективность данного способа функционального лечения пациентов, имеющих бинокулярные нарушения. Положительная динамика проявляется прежде всего в развитии и повышении устойчивости бинокулярных функций в сочетании с

повышением остроты зрения и улучшением аккомодации.

Рекомендовать апробированную серию можно для функционального лечения пациентов с различными формами косоглазия и дисбинокулярной амблиопией разной степени.

5.3. Результаты апробации интерактивной программы «Поиск» комплекса 3D-БИС с поляризационной сепарацией изображений стереопары

Описание программы «Поиск» приведено в разделе 5.1.

Апробация программы «Поиск» проводилась в два этапа.

На первом этапе апробации проводилось сравнение эффективности виртуальной окклюзии, реализуемой на базе программы «Поиск», и реальной окклюзии, реализуемой традиционными приемами (повязки, заклейки) с другими компьютерными программами для лечения амблиопии.

На втором этапе апробации проводилось прямое сравнение эффективности виртуальной окклюзии и реальной классической окклюзии на базе одной и той же программы «Поиск» (при идентичных зрительных задачах) и сравнении восприимчивости пациентов с амблиопией разного генеза к такому виду дихоптической тренировки.

Первый этап апробации

Первый этап апробации проводился в поликлиническом кабинете охраны зрения в ходе планового лечения пациентов. В части сеансов использовались нескольких компьютерных программ для лечения амблиопии, относительно давно включенных в общий курс обычной коррекционной работы для пациентов с амблиопией и предполагающих использование реальной окклюзии. Экспериментальный подход предполагал сравнение результатов по группам, у которых различие в содержании комплексного лечения касалось только одной процедуры. Были проанализированы результаты лечения детей с амблиопией в группах, где использовалась реальная окклюзия (реализовано на базе различных компьютерных программ, все программы объединены, отдельно не рассматривались), и отдельно в группах, где использовалась виртуальная окклюзия (на базе программы «Поиск»).

Испытуемые: 60 амблиопов в возрасте 6-15 лет (средний возраст 9.8 ± 3.1). Были выделены следующие группы:

(I) 20 детей (40 глаз), которые прошли только один курс тренировок с классической окклюзией;

(II) 28 детей (56 глаз), которые прошли первый курс тренировок с классической окклюзией, а затем – второй курс тренировок с виртуальной окклюзией;

(III) 12 детей (24 глаза), которые тренировались только с виртуальной окклюзией.

Схема тестирования приведена на рис. 5.3.1.

Каждый курс лечения включал 10 сеансов тренировки длительностью 10 мин.

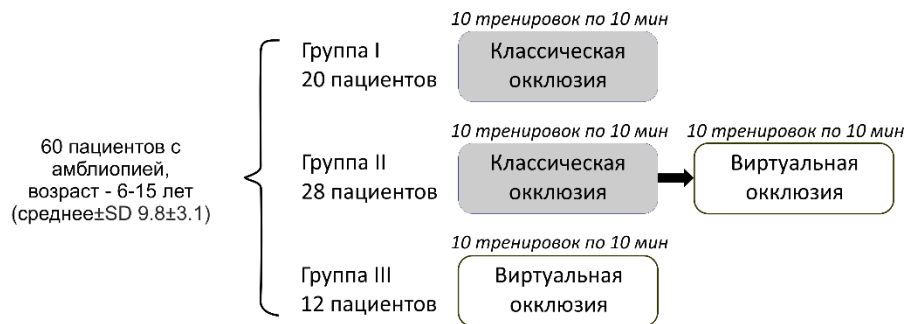


Рис 5.3.1. Схема тренировок первого этапа апробации.

Среднее повышение остроты зрения за один курс лечения с использованием реальной окклюзии у детей из групп (I) и (II) составило 0.11 ± 0.06 , что характерно для интерактивных компьютерных программ при данной длительности сеансов и курса лечения. При использовании виртуальной окклюзии средние результаты за один курс лечения были заметно выше: 0.17 ± 0.09 в группе (III) и 0.16 ± 0.09 в группе (II), где такой курс лечения проводился через некоторое время после курса с классической окклюзией, давшего среднее улучшение 0.10 ± 0.07 . (Различия между результатами лечения с использованием классической и виртуальной окклюзии достоверны: $p < 0.005$). Полученные данные, а также данные опроса пациентов относительно комфортности и утомительности тренировок свидетельствуют о преимуществах виртуальной окклюзии.

Таблица 5.3.1. Результаты первого этапа апробации

	Острота зрения до лечения	Острота зрения после курса тренировок с применением классической окклюзии	Острота зрения после курса тренировок с применением виртуальной окклюзии
Группа I (N=20)	0.74	0.12 ±0.05	-
Группа II (N=28)	0.68	0.10±0.07	0.16±0.09
Группа III (N=12)	0.74	-	0.17±0.09

Суммарный прирост остроты зрения у группы II: 0.26±0.08

Заключение по первому этапу апробации

При прочих равных условиях использование вместо реальной окклюзии виртуальной позволяет существенно повысить эффективность применения интерактивных компьютерных программ в лечении амблиопии.

Второй этап апробации

На втором этапе апробации проводилось прямое сравнение эффективности виртуальной и классической окклюзии. В качестве тренировочной программы использовалась программа «Поиск».

Как было сказано в главе 1, существующие данные показывают неоднозначность воздействия дихоптических методов и традиционной окклюзии на пациентов с амблиопией разного генеза. Для определения дальнейшего направления развития методов дихоптических тренировок было проведено сравнение виртуальной и реальной окклюзии на равных группах с амблиопией разного вида.

Испытуемые: 59 амблиопов (29 из них – с дисбинокулярной амблиопией, 30 – с рефракционной). Испытуемые были разделены на две группы с почти равным соотношением двух разных видов амблиопии (подробное описание групп представлено в таблице 5.3.2).

Таблица 5.3.2. Характеристика зрения пациентов, принимавших участие во втором этапе апробации.

Пациенты	Тип амблиопии	Число пациентов	Возраст, годы	Число пациентов с гиперметропией/миопией
Группа I	Дисбинокулярная*	15	8-14, среднее 10.5 ± 0.7	10/5
	Рефракционная	15	8-13, среднее 10.2 ± 0.6	10/5
Группа II	Дисбинокулярная*	14	7-14, среднее 10.2 ± 0.6	8/6
	Рефракционная	15	7-14, среднее 10.1 ± 0.6	11/4

* У пациентов с дисбинокулярной амблиопией угол косоглазия предварительно был устранен операционно или оптической коррекцией (очками).

Пациенты группы I прошли сначала курс тренировок с классической окклюзией, затем – с виртуальной окклюзией. Пациенты группы II прошли сначала курс с виртуальной окклюзией, затем – с классической. Каждый курс состоял из 10 тренировок по 5 минут. Расстояние до монитора при тренировках было равно 50 см.

В течение эксперимента и в течение 6 месяцев до его начала пациенты не проходили никакого другого лечения амблиопии.

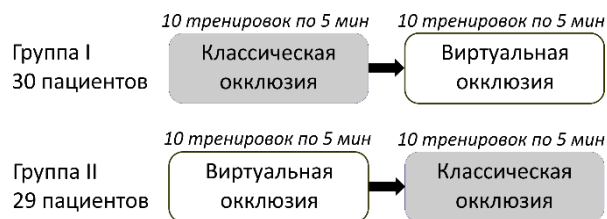


Рис 5.3.2. Схема тренировок групп второго этапа апробации.

Всем испытуемым оценивали бинокулярную и монокулярную остроту зрения, параметры аккомодации, характер зрения (по тесту Баголини и четырехточечному цветотесту).

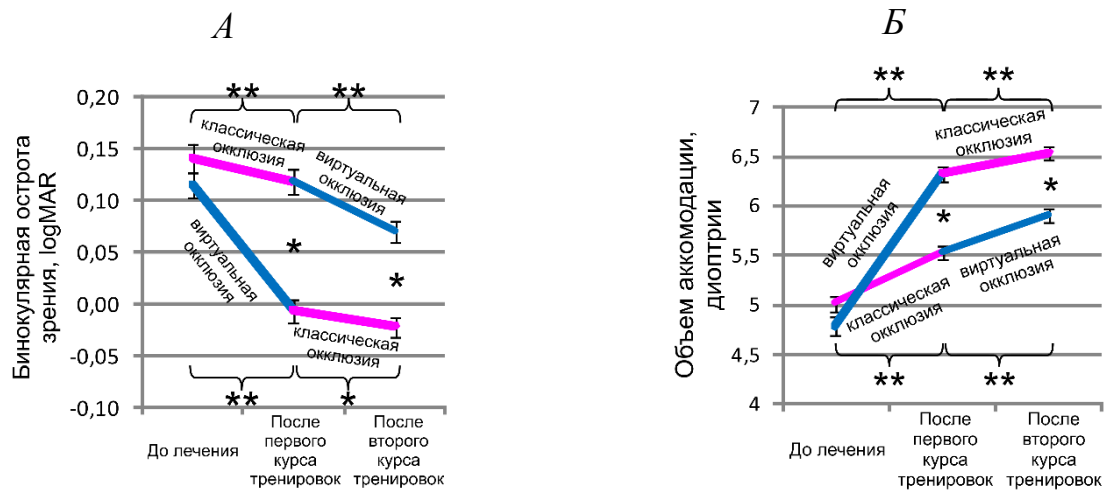


Рис. 5.3.3. Динамика бинокулярной остроты зрения (А) и аккомодации (Б) в ходе второго этапа апробации. Звездочки на графиках указывают статистическую значимость (t-тест, * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.001$), планки погрешностей указывают стандартную ошибку среднего.

В обеих группах было показано значительное улучшение показателей бинокулярной остроты зрения после курса виртуальной окклюзии в сравнении с курсом классической окклюзии. Данные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными нашей группой ранее, и с результатами других авторов (Li et al., 2013), полученные на взрослых пациентах с использованием другого метода сепарации и несколько отличающейся игровой схемы.

Показатели аккомодации улучшались как после тренировок с виртуальной, так и после тренировок с классической окклюзией. После первого курса мы получили лучшие результаты для виртуальной окклюзии, чем для классической окклюзии ($p < 0.05$). После второго курса мы также получили лучшие результаты для виртуальной окклюзии (прирост на 0.37 ± 0.06 дптр), чем для классической окклюзии (прирост на 0.22 ± 0.06 дптр), однако различие было небольшим и не достигало уровня статистической значимости ($p = 0.085$).



Рис. 5.3.4. Изменение характера зрения, по тесту Баголини для близи (50 см) в результате двух последовательных курсов тренировок. Представлены только данные пациентов с дисбинокулярной амблиопией (все пациенты с рефракционной амблиопией изначально имели бинокулярный характер зрения).

По показателям монокулярной остроты зрения для **тренируемого глаза** было обнаружено статистически значимое улучшение как для виртуальной, так и для классической окклюзии в обеих группах. Результаты виртуальной и реальной окклюзии статистически не различались.

При этом для **нетренируемого глаза** после курса виртуальной окклюзии было показано статистически значимое улучшение монокулярной остроты зрения в обеих группах (I и II). После курса классической окклюзии никаких статистически значимых улучшений в обеих группах показано не было.

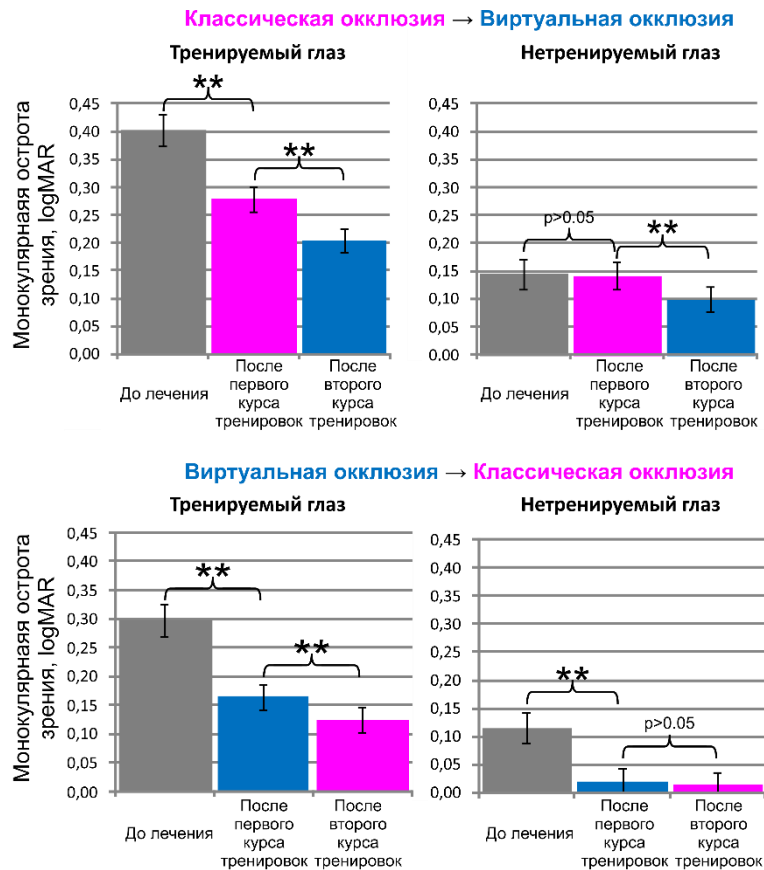


Рис. 5.3.5. Динамика монокулярной остроты зрения для тренируемого и нетренируемого глаза по результатам двух последовательных курсов тренировок.

Заключение по второму этапу апробации

Из полученных данных видно, что при применении на первом курсе тренировок виртуальная окклюзия давала существенное преимущество по сравнению с классической окклюзией. На втором курсе тренировок виртуальная окклюзия также оказалась более эффективной, чем классическая окклюзия, однако менее эффективной, чем виртуальная окклюзия на первом курсе. Можно предположить, что снижение эффективности тренировок связано с ограниченными возможностями улучшения зрительных функций (предположительно, в ходе первого курса для части пациентов был достигнут максимально возможный уровень значений остроты зрения) и с эффектом привыкания к зрительной задаче и надоедания тренировки (однообразие упражнений снижает их эффективность).

Неожиданным результатом эксперимента оказалось улучшение зрительных функций нетренируемого глаза. Можно предположить, что нетренируемый глаз

хоть и имел в начале эксперимента лучшие показатели, однако тоже был в некоторой степени амблиопичным. Можно предположить, что улучшение остроты зрения нетренируемого глаза вызвано «мягкими» условиями виртуальной окклюзии, позволяющими ему оставаться включенным в зрительный акт. Такая методика тренировок оставляет часть зрительного поля видимым для обоих глаз, помогая бинокулярной интеграции, что также выражается в улучшении показателей бинокулярной остроты зрения.

Полученные результаты показывают следующие преимущества виртуальной окклюзии по сравнению с классической реальной окклюзией:

- улучшение **монокулярной остроты зрения** на обоих глазах (а не только на тренируемом);
- более выраженное улучшение **бинокулярной остроты зрения**;
- более выраженное улучшение **аккомодации и характера зрения**.

Заключение

На сегодняшний день в отечественной офтальмологической практике набор средств для оценки и тренировки стереоскопического зрения довольно ограниченным набором средств. Методы, представленные в зарубежных клиниках, также немногочисленны. При этом результаты многих оценочных тестов, как правило, некорректно сравнивать напрямую: например, в Титмус-тесте используются монокулярно различимые стимулы с относительно малыми диспаратностями, а в тесте Ланга – случайно-точечные стимулы со значительно большей минимальной диспаратностью. При этом создание и апробация большого количества стимулов и разнообразных игровых схем как для тренировки, так и для тестирования, кажется возможной только при компьютеризации процедур. Ни одна некомпьютерная процедура не может предоставить сопоставимого функционала, а компьютеризация методов оценки и коррекции бинокулярных зрительных функций возможна только с использованием технологий сепарации изображений стереопары.

Как показал обзор литературы по нормативным значениям порогов стереоостроты, точная оценка этого параметра при компьютеризации возможна только с использованием субпиксельных диспаратностей. Это связано с техническими ограничениями современных дисплеев: размеры пикселей большинства предлагаемых на рынке устройств слишком велики для формирования диспаратностей, соответствующих пороговым значениям для большинства здоровых испытуемых (эти значения могут составлять 5-10 угл. сек). Существуют различные методы создания субпиксельных диспаратностей (сдвиг фазы в случае синусоидальных решеток и их элементов, малые изменения плотности точечных паттернов, анти-алиасинг и другие), поэтому этот момент компьютеризации процедур оценки стереоостроты не представляется проблематичным.

Наши эксперименты, описанные в главе 3, показали, что при оценке стереоостроты периодическими стимулами следует выбирать стимулы малой площади: в нашем случае протяженные синусоидальные решетки вносили

существенные артефакты из-за возможности неоднозначного фузирования периодов; использованные нами в другой серии экспериментов элементы Габора не создавали таких артефактов.

Для тех исследований, где необходимо точно оценивать стереоостроту зрения, но не нужно анализировать зависимость этого показателя от пространственной частоты, можно удовлетвориться созданием компьютерных тестов с непериодическими стимулами.

Наши эксперименты также показали, что, несмотря на использование современных, принятых в психофизиологических исследованиях «быстрых» алгоритмов поиска порогового значения, процедура точной оценки стереоостроты зрения все равно занимает довольно длительное время, что приемлемо для лабораторных исследований, но не подходит для введения в стандартную медицинскую практику. Аналогично обычной остроте зрения, которая при скрининговых обследованиях оценивается по уровню условной нормы в 1.0 дес.ед., хотя может быть и выше, рекомендуется оценивать и стереоостроту зрения по условному уровню нормы и ввести разделение тестов для стереоостроты зрения на точные и скрининговые. Скрининговый режим был введен нами в программу «Стереопорог», и дополнительно были разработаны печатные скрининговые тесты, основанные на растровом методе сепарации и привлекательные тем, что не требуют использования очков.

Как показала апробация разработанного в ходе выполнения диссертации скринингового растрового теста, оценка стереоостроты по стереопарам с относительно высокими уровнями диспаратностей (4-46 угл.мин с расстояния 30 см) успешно выявляет нарушения бинокулярных зрительных функций и даже позволяет проводить градуальную оценку стереоскопического зрения, благодаря наличию нескольких уровней диспаратности. Форма, в которой выполнен тест, позволяет проводить тестирование за несколько минут: растровая технология не требует использования очков, а случайно-точечные стереограммы исключают возможность видеть стимулы монокулярно. Избранный нами метод кодирования изображений при печати делает тестирование еще более надежным.

Использование случайно-точечных стереограмм при оценке фузионных резервов, как и в растровом скрининговом тесте, также позволило упростить и сделать более надежной процедуру тестирования: в сочетании с алгоритмами случайной смены закодированного объекта по ходу увеличения рассогласования между аккомодацией и конвергенцией такая оценка фузионных резервов позволяет более однозначно определять момент срыва фузии.

Эксперименты по оценке стереоостроты зрения, описанные в разделах 3.1 и 3.2, показали, что многие испытуемые, чьи пороги существенно превышают принятый порог стереослепоты (1 угл. мин) способны воспринимать пространственное расположение объектов и их объемную форму. Дополнительные эксперименты, описанные в разделе 3.3, показали, что при превышении общепринятого значения порога даже в 10 раз наблюдатели могут сохранять адекватное восприятие стереообразов. Термин «стереослепота», очевидно, на сегодняшний день используется некорректно и требует пересмотра.

Полученные результаты подтверждают, что стереоострота в том диапазоне, в котором она необходима для повседневной жизни, может быть успешно оценена скрининговыми тестами. Точная оценка требуется в научных и экспертных специализированных исследованиях: в психофизиологических или медицинских экспериментах, либо при профотборе на должности, требующие высокого качества стереозрения.

Описанные нами эксперименты по сравнению методов сепарации изображений как при оценке стереоостроты зрения (глава 3), так и при оценке фузионных резервов (глава 4) показали преимущество поляризационной технологии сепарации. Значения, получаемые при использовании различных методов сепарации у одних и тех же испытуемых значительно различались, при этом лучшие значения (как для стереоостроты, так и для фузионных резервов) были в среднем получены для поляризационной сепарации. Например, в наших экспериментах по оценке стереоостроты зрения средние пороги для одних и тех же групп испытуемых на частоте 4 цикл/град при использовании стимулов в виде элементов Габора составляли 21.5 угл. сек – для поляризационной сепарации и 41.5

угл. сек – для цветовой анаглифной. При оценке фузионных резервов средние конвергентные резервы при поляризационной сепарации составили 31.5 градуса, при цветовой анаглифной – 23 градуса; дивергентные резервы при поляризационной сепарации составили 9 градусов, при цветовой анаглифной – 6.5 градуса.

Можно предположить, что при использовании анаглифной сепарации существенный негативный вклад в процедуру измерения вносит бинокулярная конкуренция по цвету. Это необходимо учитывать при выборе измерительного метода. Также, данные результаты говорят о том, что при проведении метааналитических работ нужно обязательно указывать использованные авторами методы сепарации, так как напрямую сравнивать результаты, полученные при использовании разных 3D-технологий, некорректно.

Как показала апробация разработанных коррекционных программ, использование 3D-технологий позволяет заменять классические процедуры окклюзии или пенализации виртуальными аналогами. Виртуальная окклюзия более удобна для пациентов, доставляет меньше психологического дискомфорта, позволяет в широком диапазоне варьировать параметры стимуляции и создавать невозможные при обычной окклюзии условия (например, демонстрировать изображения разным глазам поэлементно или вносить стереоскопический компонент в тренировки). Наша апробация показала, что использование виртуальной окклюзии не уступает по эффективности традиционной окклюзии, а по ряду параметров (показатели бинокулярной остроты зрения, аккомодации) даже превосходит ее. Однако явно ощущается необходимость проведения подробных экспериментов по сравнительной оценке различных методов функциональных тренировок в зависимости от типа и генеза нарушения, метода сепарации, общей длительности воздействия и других параметров. Такая работа должна проводиться уже в клинических условиях и быть достаточно широкомасштабной для того, чтобы можно было формулировать методические рекомендации для практикующих специалистов.

Выводы

1. Применение современных 3D-технологий позволяет существенно повысить точность измерения показателей стереозрения, сделать скрининговые процедуры более комфортными и увеличить эффективность коррекционных тренировок для восстановления и развития бинокулярного зрения.
2. На современном технологическом уровне точная компьютерная оценка стереоостроты зрения может быть реализована только с использованием субпиксельных диспаратностей.
3. При выборе тестовых стимулов следует избегать использования однородных периодических текстур, так как измерения осложняются из-за возможности неоднозначного фузирования. Показано, что элементы Габора являются более подходящими тестовыми стимулами, чем протяженные синусоидальные решетки.
4. Поляризационная технология сепарации позволяет при прочих равных условиях получить лучшие значения стереопорогов и фузионных резервов чем цветовая анаглифная технология. Испытуемых на частоте 4 цикл/град при использовании стимулов в виде элементов Габора составляли 21.5 угл. сек – для поляризационной сепарации и 41.5 угл. сек – для цветовой анаглифной; средние конвергентные резервы при поляризационной сепарации составили 31.5 градуса, при цветовой анаглифной – 23 градуса; дивергентные резервы при поляризационной сепарации составили 9 градусов, при цветовой анаглифной – 6.5 градуса.
5. Для целей скринингового исследования стереозрения наиболее перспективными представляются безочковые растровые 3D-технологии, которые уже на данном этапе развития позволяют существенно повысить качество скрининговой диагностики стереоскопического восприятия.
6. Принятый в настоящее время критерий стереослепоты (порог стереоскопического восприятия более 1 угл. мин) требует пересмотра, поскольку обнаружено, что способность адекватного восприятия 3D-контента может сохраняться при превышении указанного порога в 10 и более раз.

7. Применение современных 3D-технологий для функционального лечения амблиопии позволяет заменить реальную традиционную окклюзию и пенализацию виртуальной окклюзией, пространственно-временные параметры которой легко варьировать.

8. При прочих равных условиях виртуальная окклюзия позволяет добиться лучших результатов тренировочных процедур, чем традиционная окклюзия.

Публикации по теме диссертации

Статьи в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК

1. Грачёва М.А., Рожкова Г.И. Стереострота зрения: основные понятия, методы измерения, возрастная динамика // Сенсорные системы. 2012. Т. 26. № 4. С. 259-279.
2. Грачева М.А. Опыт использования субпиксельных параллаксов при оценке стереостроты зрения // Мир техники кино. 2013. Т. 2. № 26 С. 17-22.
3. Рычкова С.И., Большаков А.С., Грачева М.А., Рожкова Г.И. Очковый хромостереопсис у людей с различными показателями естественного хромостереопсиса // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. №. 1. С. 72-80.
4. Рожкова Г.И., Грачева М.А. Естественный хромостереопсис: причины и индивидуальные вариации бинокулярных пространственных цветовых эффектов // Сенсорные системы. Т. 28. № 1. 2014. С. 3–14.
5. Грачева М.А., Рожкова Г.И. Восприятие стереоизображений зрителями с так называемой "стереослепотой" // Мир техники кино. 2014. Т. 4. № 34. С. 24-30.
6. Рожкова Г.И., Лозинский И.Т., Грачева М.А., Большаков А.С., Воробьев А.В., Сенько И.В., Белокопытов А.В. Функциональная коррекция нарушенного бинокулярного зрения: преимущества использования новых компьютерных технологий // Сенсорные системы. 2015. Т. 29. № 2. С. 99–121.
7. Рожкова Г.И., Рычкова С.И., Грачева М.А., Тахчиди Х.П. Индивидуальная оптимизация функциональной коррекции нарушенного бинокулярного зрения // Сенсорные системы, 2015. Т. 29. №. 4. С. 341–353.
8. Рожков С.Н., Рожкова Г.И., Грачева М.А. Стереоскопическое зрение: основные термины // Мир техники кино. 2016. Т. 2. № 10. С. 26-32.

Статьи в сборниках

1. Грачева М.А. Об использовании субпиксельных диспаратностей при оценке строты стереозрения // V Международная научно-технической конференция "Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других отраслях". Москва. 18–19 апреля. 2013. Материалы и доклады. – М.: МКБК, 2013. С. 42-54.
2. Васильева Н.Н., Большаков А.С., Грачева М.А., Рожкова Г.И. Сравнение результатов оценки фузионных резервов с использованием анаглифного и поляризационного методов сепарации изображений // «Федоровские чтения – 2013» XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. Москва. 21-22 июня. 2013. М.: Изд-во «Офтальмология», 2013. С. 61.
3. Грачева М.А. Компьютерная оценка строты стереозрения с использованием цветового и поляризационного методов сепарации // 37 конференция-школа молодых ученых и специалистов "Информационные технологии и системы - 2013". Калининград. 1-6 сентября. 2013. С. 157-161.
4. Рожкова Г.И., Большаков А.С., Грачева М.А. Применение современных 3D-технологий для оценки показателей бинокулярного зрения и лечения его нарушений // VI Российский общенациональный офтальмологический форум. Москва, 1-3 октября. 2013. М.: Изд-во «Апрель», 2013. Т.1. С. 296-300.

5. Грачева М.А., Рожкова Г.И. Восприятие пространственных отношений и объёмности в стереофильмах зрителями с различной остротой стереозрения // VI Международная научно-техническая конференция "Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других отраслях". Москва. 17–18 апреля. 2014.: Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2014. С. 65-75.
6. Грачева М.А., Васильева Н.Н., Большаков А.С., Рожкова Г.И. Влияние метода сепарации изображений на измерение показателей бинокулярного зрения при помощи компьютерных тестовых программ // «Невские горизонты-2014». Материалы научной конференции офтальмологов. СПбГПМУ. – СПб.: Политехника-сервис, 2014. С. 310–314.
7. Рычкова С.И., Большаков А.С., Грачева М.А., Рожкова Г.И. Очковый хромостереопсис при использовании призматической коррекции у детей // «Невские горизонты-2014». Материалы научной конференции офтальмологов. СПбГПМУ. – СПб.: Политехника-сервис, 2014. С. 334–337.
8. Рожкова Г.И., Грачева М.А., Рычкова С.И. Оптимизация процедур функциональной коррекции бинокулярного зрения // VIII Российский Общенациональный Офтальмологический Форум, сборник научных трудов научно-практической конференции с международным участием. Москва, 22-24 сентября 2015. С. 425-429.
9. Рожкова Г.И., Рычкова С.И., Наумова О.И., Грачева М.А., Быкова Т.А. Эффективность лечения амблиопии с применением виртуальной окклюзии на базе 3D технологии // «Невские горизонты-2016». Материалы научной конференции офтальмологов. СПбГПМУ. – СПб.: Политехника-сервис, 2016. С. 222–223.
10. Рычкова С.И., Грачева М.А., Рожкова Г.И., Тахчиди Х.П. Результаты использования компьютерного программного комплекса СКАБ для плеопто-ортоптического лечения у детей // Современные технологии в офтальмологии. 2016. Т. 3. № 11. С. 231–235.

Тезисы конференций и презентации на выставках

1. Грачева М.А. Безочковый растровый набор тестов для быстрой проверки бинокулярного зрения // Выставка разработок молодых ученых, Каталог. U-NOVUS. Томск. 2-4 апреля 2014 г. / Томск.: Д-Принт, 2014., С. 32.
2. Gracheva M.A. Computer-aided methods for clinical stereo acuity measurement: some practical aspects of left-right image separation techniques // 36th European Conference on Visual Perception 2013. Bremen, Germany. 25-29 August. Perception. 2013. V. 42, Suppl. P. 69.
3. Bolshakov A., Vasiljeva N., Gracheva M., Rozhkova G. Assessment of fusional reserves with interactive software: Dependence of results on left-right image separation method // 36th European Conference on Visual Perception 2013. Bremen, Germany. 25-29 August. Perception. 2013. V. 42, Suppl. P. 224.
4. Bolshakov A.S., Gracheva M.A., Rozhkova G.I. The benefits of applying modern 3D technologies in computer-aided diagnostics and functional treatment of amblyopia and binocular disorders // 37th European Conference on Visual Perception 2014. Belgrad, Serbia. 24-28 August. Perception. 2014. V. 43, Suppl. P. 165.

5. Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G. New varieties of the tests for binocular vision assessment // 41-st Meeting of the European Paediatric Ophthalmological Society, Programm and book of abstracts. St. Petersburg, 2015. P. 84.
6. Rozhkova G., Rychkova S., Gracheva M. Optimal parameters of the treatment procedures for rehabilitation and development of binocular functions in different cases // 38th European Conference on Visual Perception 2015. Liverpool, UK. 24-27 August. Perception. 2015. V. 44, Suppl. P. 301.
7. Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G. Individual variability in visual acuity improvement due to binocular fusion and accommodation training // 38th European Conference on Visual Perception 2015. Liverpool, UK. 24-27 August. Perception. 2015. V. 44, Suppl. P. 296.
8. Rychkova S., Gracheva M., Senko I. Computer-aided techniques in analysis and treatment of strabismic suppression: practical issues // 1st International Symposium on Visual Physiology, Environment, and Perception. Riga, Latvia. 6-8 October, 2016. Book of abstracts. P. 47-48.
9. Gracheva M., Rychkova S., Senko I., Tahchidi H.P. Interactive computer trainings for improvement of binocular functions // 1st International Symposium on Visual Physiology, Environment, and Perception. Riga, Latvia. 6-8 october, 2016. Book of abstracts. P. 46-47.
10. Bolshakov A., Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G. Amblyopia treatment: Advantages of virtual occlusion based on a contemporary 3D technique // 39th European Conference on Visual Perception 2016. Barcelona, Spain. 28th of August - 1st of September. Perception. 2016. V. 45, Suppl. P. 301-302.
11. Rychkova S., Gracheva M., Sandimirov R., Bolshakov A. Direct comparison of eye patch and virtual occlusion during computer-aided treatment of amblyopia in children // 40th European Conference on Visual Perception 2017. Berlin, Germany. 27-31 August. Perception. 2017. V. 46, Suppl. (В печати).

Другие публикации

1. Рожкова Г.И., Грачева М.А., Большаков А.С., Белокопытов А.В., Крутцова Е.Н. Современные стереотехнологии и их применение в функциональной коррекции бинокулярного зрения: методическое пособие / М.: ИППИ РАН, 2016. 38 с. ISBN 978-5-901158-29-6
2. Грачева М.А., Большаков А.С. Современные шлемы виртуальной реальности: причины появления дискомфорта и способы их исправления // Киномеханик сегодня, 2016. № 6. С. 30–35.
3. Большаков А.С., Грачева М.А. Истоки современного этапа развития технологии виртуальной реальности // Киномеханик сегодня, 2016, 5, с. 34–39.

Список цитированной литературы

1. Аветисов Э.С. Дисбинокулярная амблиопия и ее лечение / М. : Медицина. – 1968. – 207 с.
2. Аветисов Э.С. Бинокулярное зрение. Клинические методы исследования и восстановления / Э.С. Аветисов, Т.П. Кащенко // Клиническая физиология зрения ; под ред. А.А. Яковлева. – М. : Изд-во АО «Русомед», 1993. – С. 199-209.
3. Алексеенко С.В. Влияние косоглазия и монокулярной депривации на структуру межполушарных связей в проекционных зрительных полях коры кошки / С.В. Алексеенко, П.Ю. Шкорбатова, С.Н. Топорова, С.Д. Солнушкин // Сенсорные системы – 2012– Т. 26 – № 2 – С. 106-116.
4. Алексеенко С.В. Нарушения в геникуло-корковых зрительных путях при дисбинокулярной и депривационной амблиопии / С.В. Алексеенко, П.Ю. Шкорбатова // Глаз. – 2014. – №6 – С. 23-27.
5. Алексеенко С.В. Депривационная и дисбинокулярная амблиопия: нарушения в геникуло-корковых зрительных путях / С.В. Алексеенко, П.Ю. Шкорбатова // Альманах клинической медицины – 2015 – №36 – С. 97-100.
6. Алексеенко С.В. Динамика развития аномалий в подкорковом зрительном центре головного мозга при раннем нарушении бинокулярного опыта / С.В. Алексеенко, П.Ю. Шкорбатова // Альманах клинической медицины – 2016 – Т. 44 – №3 – С. 351-357.
7. Белозеров А.Е. Глаз и компьютер // Визуализация в клинике. – 2001. – № 18. – С. 30-33.
8. Белозёров А.Е. Разработка и внедрение компьютерных функциональных методов в офтальмологии : автореф. дисс. ...докт. биол. наук. – М., 2003. – 41 с.
9. Бойчук И.М. Клинические особенности стереовосприятия у детей при эмметропии, аметропии и содружественном косоглазии : автореф. дис... канд. мед. наук : 14.00.08 / И.М. Бойчук. – Одесса, 1990. – 17 с.

- 10.Бойчук И.М. Состояние стереовосприятия как индикатор нарушений в аккомодационно-конвергентном аппарате глаз // Офтальмологической журнал. – 1992. – № 5-6. – С. 260-262.
- 11.Большаков А.С. Истоки современного этапа развития технологии виртуальной реальности / А.С. Большаков, М.А. Грачева // Киномеханик сегодня. – 2016. – № 5. – С. 34–39.
- 12.Бондарко В.М. Пространственное зрение / В.М. Бондарко, М. В. Данилова, Н.Н. Красильников, Л.И. Леушина, А.А. Невская, Ю.Е. Шелепин. - СПб. : Наука, 1999. – 218 с.
- 13.Валюс Н.А. Стере: фотография, кино, телевидение. – М. : Искусство, 1986. – 263 с.
- 14.Валюс Н.А. Стереоскопия. М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 379 с.
- 15.Васильева Н.Н. Формирование механизмов пространственного зрительного восприятия в онтогенезе : дисс.... докт. биол. наук. – Чебоксары, 2012. – 347 с.
- 16.Васильева Н.Н. Возрастная динамика остроты стереозрения у школьников / Н.Н. Васильева, Г.И. Рожкова, А.Е. Белозёров // Сенсорные системы. – 2010. – Т. 24. – № 3. – С. 179–187.
- 17.Грачёва М.А. Стереοοстрота зрения: основные понятия, методы измерения, возрастная динамика / М.А. Грачёва, Г.И. Рожкова // Сенсорные системы. – 2012. – Т. 26. – № 4. – С. 259–279.
- 18.Грачева М.А. Современные шлемы виртуальной реальности: причины появления дискомфорта и способы их исправления / М.А. Грачева, А.С. Большаков // Киномеханик сегодня. – 2016. – № 6. – С. 30–35.
- 19.Двейб М.А. Разработка инструментальных методов и аппаратных средств для исследования бинокулярного зрения с использованием электронных дисплеев : автореф. дис... канд. техн. наук / М.А. Двейб. – СПб., 1996. – 14 с.

20. Дубовская Л.А. Комплексная терапия содружественного косоглазия у детей: Метод. Рекомендации / М.Р. Гусева, Е.Ю. Жильцова, С.Г. Матвеев – М., 2002. – 22 с.
21. Елхов В.А. Стереокomпьютерные методы формирования изображений и их применение / В.А. Елхов, Н.В. Кондратьев, Ю.Н. Овечкис // Техника кино и телевидения. – 2001. – № 8. – С. 11-16.
22. Кащенко Т.П. Влияние диплоптического лечения на основе лазерных спеклов на состояние монокулярных зрительных функций при дисбинокулярной амблиопии / Т.П. Кащенко, Т.А. Корнюшина, А.Р. Базарбаева, М.Д. Магарамова, // Вестник КРСУ. – 2014. – Т. 1. – № 10. – С. 131-133. (а)
23. Кащенко Т.П. Применение лазерных спеклов в диплоптическом лечении содружественного косоглазия в различных зрительных зонах / Т.П. Кащенко, Т.А. Корнюшина, А.Р. Базарбаева, М.Д. Магарамова, Р.Д. Кацанашвили // Офтальмохирургия. – 2014 – № 4 – С. 90-94. (б)
24. Кащенко Т.П. Способ восстановления бинокулярного зрения на основе лазерных спеклов в диплоптическом лечении содружественного косоглазия / Т.П. Кащенко, Т.А. Корнюшина, А.Р. Базарбаева, М.Д. Магарамова, Р.Д. Кацанашвили // Вестник офтальмологии. – № 5. – 2014. (в)
25. Кащенко Т.П. Сравнительная оценка эффективности использования специальных компьютерных программ для лечения амблиопии / Т. П. Кащенко, Ф. Мухамедьяров, Г.Л. Губкина, А.М. Шамшинова, У. Кэмпф, А.Е. Белозеров // Близорукость, нарушения рефракции, аккомодации и глазодвигательного аппарата. – М. : МНИИ ГБ им. Гельмгольца, 2001. – С. 186-188.
26. Кащенко Т.Н. Функциональное лечение при косоглазии, амблиопии, нарушениях аккомодации. Методы и приборы / Т.Н. Кащенко, Ю.М. Райгородский, Т.А. Корнюшина // – М. – ИИЦ СГМУ. 2016. –163с.
27. Клементьев А.К. Стереоскопия в архитектуре и строительстве. М. : Госиздат., 1952. – 90 с.

28. Колосова С.А. Бинокулярное глубинное зрение человека в норме и при воздействии некоторых экстремальных факторов: Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – М., 1981. – 18 с.
29. Кононова Н.Е. Использование гиперкоррекции в лечении содружественного сходящегося косоглазия у детей / Н.Е. Кононова, В.М. Кононов // IX Съезд офтальмологов России, Москва, 16-18 июня 2010 г.
30. Котлярский А. М. Функционально-системный анализ бинокулярного зрения : автореф. дис... докт. биол. наук : 00.03.13 / А. М. Котлярский. – М., 1982. – 66 с.
31. Корнюшина Т.А. Состояние стереоскопического зрения у детей с различными видами рефракции / Т.А. Корнюшина, Т.П. Кащенко, А.В. Ибрагимов // Офтальмохирургия. – № 1. – 2012. – С. 76-79.
32. Корнюшина Т.А. Стереоскопическое зрение и методы его оценки / Т.А. Корнюшина, Т.П. Кащенко, А.В. Ибрагимов // Офтальмохирургия. – № 1. – 2013. – С. 13-19.
33. Кравков С.В. Глаз и его работа // М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 531 с.
34. Кропман И.Л. Физиология бинокулярного зрения и расстройства его при содружественном косоглазии. – Л. : Медицина, 1966. – 206 с.
35. Левашов О.В. Модель бинокулярного слияния в стереозрении и ее экспериментальная проверка : автореф. дис... канд. биол. наук : 03.00.02 / О. В. Левашов. – Л., 1985. – 18 с.
36. Ляховецкий В. А. Имитационная модель, методы и технические средства исследования стереоскопического зрения человека : дис... канд. техн. наук : 05.11.17 / В. А. Ляховецкий. – СПб., 2004. – 168 с.
37. Маглакелидзе Н.М. Амблиопия и бинокулярное зрение / Н.М. Маглакелидзе, М.В. Зуева // Российский офтальмологический журнал – 2017 – Т. 10 – № 2. – С. 97-102.
38. Маглакелидзе Н.М. Паттерн-эрг в оценке зрительных каналов при анизометропической амблиопии / Н.М. Маглакелидзе, М.В. Зуева, И.В.

- Цапенко, Е.П. Лантух // X Съезд офтальмологов России, М. Офтальмология. 2015. – С. 314.
39. Майоров Н.А. Становление и развитие отечественного стереокино // Мир техники кино. – 2011. – № 1. – С. 33–51.
40. Майоров Н.А. 120 лет кинематографа в России: 1896-2016 // Мир техники кино. – 2016. – 2(10). – С. 33-40.
41. Невская А.А. Стереоскопическое зрение / А. А. Невская // Сенсорные системы. – Л. : Наука, 1977. – С. 37-64.
42. Нероев В.В. Патофизиология амблиопии: латеральное колленчатое тело и зрительная кора / В.В. Нероев., М.В. Зуева, Н.М. Маглакелидзе // Российский офтальмологический журнал – 2015 – Т. 8 – № 1. – С. 81-89.
43. Нероев В.В. Патофизиология амблиопии: вовлечена ли сетчатка? / В.В. Нероев., Н.М. Маглакелидзе, М.В. Зуева // Российский офтальмологический журнал – 2014 – Т. 7 – № 4. – С. 98-105.
44. Никулина Г.В. Дети с косоглазием и амблиопией (психолого-педагогические основы работы по развитию зрительного восприятия в условиях образовательного учреждения общего назначения) : учеб. пос. / Г.В. Никулина, Л.В. Фомичева, Е.В. Артюкевич ; под ред. Г.В. Никулиной. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 1999. – 86 с.
45. Плосконос Г.А. Функциональные подсистемы бинокулярного зрения и их взаимодействие у детей : автореф. дис... канд. мед. наук : 14.00.08 / Г. А. Плосконос. – М., 1989. – 21 с.
46. Рожков С.Н. Системы стереокинематографа, применявшиеся в СССР // Мир техники кино. – 2006. – № 1. – С. 36-40.
47. Рожков С.Н. Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике. Терминологический словарь / С.Н. Рожков, Н.А. Овсянникова. – М. : Парадиз, 2003. – 136 с.
48. Рожков С.Н. Стереоскопическое зрение: основные термины / С.Н. Рожков, Г.И. Рожкова, М.А. Грачева // Мир техники кино. – 2016. – Т. 2. – № 10. С. 26–32.

- 49.Рожкова Г.И. Изменения фокусирующих способностей человеческого глаза в постнатальном онтогенезе // Биомеханика глаза: сборник трудов конференции. – 2007. – Т. 1. – С. 1689–1699.
- 50.Рожкова Г.И. Бинокулярное зрение // Сб: Физиология зрения / Ред. А.Л. Бызов. – М.: Наука, 1992.
- 51.Рожкова Г.И. Естественный хромостереопсис: причины и индивидуальные вариации бинокулярных пространственных цветовых эффектов. Обзор / Г.И. Рожкова, М.А. Грачева // Сенсорные системы. – 2014. – Т. 28. – № 1. – С. 3–14.
- 52.Рожкова Г.И. Зрение детей: проблемы оценки и функциональной коррекции / Г.И. Рожкова, С.Г. Матвеев. – М.: Наука. – 2007. – 315 с.
- 53.Рожкова Г.И. Зрительный дискомфорт при восприятии стереоскопических изображений как следствие непривычного распределения нагрузки на различные механизмы зрительной системы / Г.И. Рожкова, С.В. Алексеенко // Мир техники кино. – 2011. – Т. 3. – С. 12–21.
- 54.Рожкова Г.И. Компьютерное лечение косоглазия и амблиопии с применением случайно-точечных стереограмм / Г.И. Рожкова, Т.А. Подугольникова, И.А. Лешкевич, М.А. Корнюшин, В.Н. Носов, С.Г. Матвеев // Вестник офтальмологии. – 1998. – № 4. – С. 28-32.
- 55.Рожкова Г.И. Компьютерное тестирование бинокулярной зрительной системы человека. II. Прямая оценка основных клинических показателей / Г.И. Рожкова, Т.А. Подугольникова, Г.Ж. Сисенгалиева // Сенсорные системы. – 1996. – Т. 10. – № 1. – С. 59-68.
- 56.Рожкова, Г.И. Компьютерный метод оценки фузионных резервов с объективным контролем нарушения фузии / Г.И. Рожкова, Н.Н. Васильева // Физиология человека. – 2010. – Т. 36. – № 3. – С. 135-137
- 57.Рожкова Г. И. Множественность механизмов бинокулярного синтеза и их избирательные нарушения при косоглазии / Г.И. Рожкова, Г.А. Плосконос // Сенсорные системы. – 1988. – Т. 2. – № 2. – С. 167–176.

- 58.Рожкова Г.И. Оптико-физиологические основы использования интерактивных компьютерных программ в функциональном лечении косоглазия / Г.И. Рожкова, В.М. Кононов // Современные проблемы детской офтальмологии. Матер. юб. науч. конф., посв. 70-летию каф. детской офтальмологии СПб гос. педиатрической мед. акад. Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию. СПб., 2005. – С. 121–124.
- 59.Рожкова Г.И. Современные стереотехнологии и их применение в функциональной коррекции бинокулярного зрения: методическое пособие / Г.И. Рожкова, М.А. Грачева, А.С. Большаков, А.В. Белокопытов, Е.Н. Крутцова. – М.: ИППИ РАН, 2016. – 38 с. ISBN 978-5-901158-29-6
- 60.Рожкова Г.И. Таблицы и тесты для оценки зрительных способностей / Г.И. Рожкова, В.С. Токарева. – М. : Владос, 2001. – 104 с.
- 61.Рожкова Г.И. Функциональная коррекция нарушенного бинокулярного зрения: преимущества использования новых компьютерных технологий / Г.И. Рожкова, И.Т. Лозинский, М.А. Грачева, А.С. Большаков, А.В. Воробьев, И.В.Сенько, А.В Белокопытов // Сенсорные системы. – 2015. – Т. 29. – № 2. – С. 99–121.
- 62.Рычкова С.И. Очковый хромостереопсис у людей с различными показателями естественного хромостереопсиса / С.И. Рычкова, А.С. Большаков, М.А. Грачева, Г.И. Рожкова // Сенсорные системы. – 2012. – Т. 28. – № 1. – С. 72-80.
- 63.Рычкова С.И. Острота зрения, аккомодация и оптимальная оптическая коррекция при косоглазии в постоперационном периоде / С.И. Рычкова, Г.И. Рожкова // Сенсорные системы. – 2009. – Т. 23. – № 1. – С. 24–39.
- 64.Сомов Е.Е. Методы офтальмоэргономики // Л. : Наука, 1989. – 157 с.
- 65.Татаринов С.А. Значение использования компьютера при лечении детей с косоглазием и амблиопией / С.А. Татаринов, Т.П. Кащенко // Вестник офтальмологии. – 1993. – № 5. – С. 28-29.
- 66.Тимошенко Т.А., Штилерман А.Л. Современные методы лечения амблиопии // Тихоокеанский медицинский журнал. 2013. № 4. С. 59–62.

- 67.Топорова С.Н. Послойная локализация нейронов, обеспечивающих межполушарные связи, в зрительной коре кошки при нарушении бинокулярного зрения/ С.Н. Топорова, П.Ю. Шкорбатова, С.В. Алексеенко // Морфология – 2015 – Т. 147 – № 2 – С. 12-16.
- 68.Филин В.А. Автоматия саккад / М.: МЦ «Видеоэкология» ; изд. Московский Университет. – 2001. – 263 с.
- 69.Филин В.А. Видеоэкология / М. : Видеоэкология, 2006. – 512 с.
- 70.Хватова Н.В. Амблиопия: зрительные функции, патогенез и принципы лечения / Н.В. Хватова, Н.Н. Слышалова, А.Е. Вакурина // Зрительные функции и их коррекция у детей; под ред. С.Э. Аветисова, Т.П. Кащенко, А.М. Шамшиновой. М.: Медицина, 2005. С. 202–220.
- 71.Хиллис Е.М. Влияние использования шлема виртуальной реальности на зрительные функции / Е.М. Хиллис, Т.П. Кащенко, Т.А. Корнюшина // Медицина труда и промышленная экология. – 2006. – № 9. – С. 16-23.
- 72.Шамшинова А.М. Наследственные и врожденные заболевания сетчатки и зрительного нерва / А.М. Шамшинова. – М. : Медицина, 2001. – С. 527.
- 73.Шаповалов С.Л. Бинокулярные функции при аметропиях / С.Л. Шаповалов, Т.И. Милявская, С.А. Игнатьев, Т.А. Корнюшина. – М.: МИК, 2014. – 176 с.
- 74.Шелепин Ю.Е. Визоконтрастометрия: Измерение пространственных передаточных функций зрительной системы / Ю.Е. Шелепин, Л.Н. Колесникова, Ю.И. Левкович. – Л. : Наука, 1985. – 103 с.
- 75.Adams W.E., Hrisos S., Richardson S., Davis H., Frisby J.P., Clarke M.P. Frisby Davis distance stereoacuity values in visually normal children // Br. J. Ophtalmol. 2005. V. 89. P. 1438 – 1441.
- 76.Asker L., Crewther D., Crewther S.G. Strabismic amblyopia. Part 1: Psychophysics // Clin. Exp. Optom. 2000a. V. 83 (2). P. 49–58.
- 77.Asker L., Crewther D., Crewther S.G. Strabismic amblyopia. Part 2: Neural processing // Clin. Exp. Optom. 2000b. V. 83 (4). P. 200–211.
- 78.Atkinson J. The developing visual brain. N.Y.: Oxford Univ. Press, 2000. 211 p.

79. Atkinson J., Braddick O. Stereoscopic discrimination in infants // *Perception*. 1976. V. 5. P. 29–38.
80. Bach M., Schmitt C., Kromeier M., Kommerell G. The Freiburg Stereoacuity Test: automatic measurement of stereo threshold. // *Graefes Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 2001. V. 239 (8). P. 562–566.
81. Birch E.E., Gwiazda J., Held R. Stereoacuity development for crossed and uncrossed disparities in human infants // *Vision Res.* 1982. V. 22. P. 507–513.
82. Birch E., Petrig B. FPL and VEP measures of fusion, stereopsis and stereoacuity in normal infants // *Vision Res.* 1996. V. 36. P. 1321–1327.
83. Birch E.E., Salomao S. Infant random dot stereoacuity cards // *J. Pediatr. ophthalmology and strabismus*. 1998. V. 35 (2). P. 86–90.
84. Black J. M., Hess R. F., Cooperstock J. R., To L., Thompson B. The measurement and treatment of suppression in amblyopia. *Journal of Visualized Experiments : JoVE*, 2012. No. 70, e3927.
85. Bosten J.M., Goodbourn P.T., Lawrance-Owen A.J., Bargary G., Hogg R.E., Mollon J. D. A population study of binocular function // *Vision Res.* 2015. V. 110. P. 34–50.
86. Braddick O.J., Wattam-Bell J.D., Atkinson J. The onset of binocular function in human infants // *Hum. Neurobiol.* 1983. V. 2. P. 65–69.
87. Breyer A., Jiang X., Rüttsche A., Mojon D.S. A new 3D monitor-based random-dot stereotest for children // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2006. V. 47(11). P. 4842–4846.
88. Breyer A., Jiang X., Rüttsche A., Mojon D.S. A new objective test for random-dot stereopsis in preverbal children // *Klin. Monbl. Augenheilkd.* 2003. V. 220(3). P. 96–98.
89. Brown A. M., Lindsey D.T., Satgunam P.N., Miracle J.A. Critical immaturities limiting infant binocular stereopsis // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2007. V. 48. P. 1424 – 1434.
90. Brown J.P., Ogle K.N., Reiher L. Stereoscopic acuity and observation distance // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 1965. V. 4. No 5. P. 894 – 900.

- 91.Ciner E. B., Schanel-Klitsch E., Herzberg C. Stereoacuity development: 6 months to 5 years. A new tool for testing and screening // Optometry and Vision Science. 1996. V. 73. No 1. P. 43-48.
- 92.Cogan A. I. Human binocular interaction: towards a neural model//Vision Res. 1987. V. 27(12), P. 2125-2139.
- 93.Coutant B.E., Westheimer G. Population distribution of stereoscopic ability // Ophthal. Physiol. Opt. 1993. V. 13.No 1. P. 3 – 7.
- 94.Devernay F., Beardsley P. Stereoscopic cinema. Image and geometry processing for 3-D cinematography / Ed. by Ronfard R., Taubin G. // Geometry and Computing. 2010. V. 5. P. 1151.
- 95.Dodgson N. A. On the number of viewing zones required for head-tracked autostereoscopic display // 2006. V. 6055. P. 60550Q–60550Q–12.
- 96.Ee R. Van, Richards W. A planar and a volumetric test for stereoanomaly // Perception. 2002. V. 31. No 1. P. 51–64.
- 97.Elliott S., Shafiq A. Interventions for infantile esotropia // Cochrane Database Syst. Rev. 2005. № 1. P. CD004917.
- 98.Fox R., Aslin R.N., Shea S.L., Dumais S.T. Stereopsis in human infants // Science. 1980. V. 207(4428). P. 323–324. DOI: 10.1126/science.7350666
- 99.Gadia D., Garipoli G, Bonanomi C., Albani L., Rizzi A. Assessing stereo blindness and stereo acuity on digital displays // Displays. 2014. V. 35. No. 4. P. 206–212.
100. Goodwin R.T., Romano P.E. Stereoacuity degradation by experimental and real monocular and binocular amblyopia. // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 1985. V. 26. No. 7. P. 917–923.
- 101.Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G. New varieties of the tests for binocular vision assessment // 41-st Meeting of the European Paediatric Ophthalmological Society, Programm and book of abstracts. St. Petersburg, 2015. P. 84.
- 102.Hall C. The relationship between clinical stereotests. // Ophthalmic Physiol. Opt. 1982. V. 2. No. 2. P. 135–143.

- 103.Hamm L.M., Black J., Dai S., Thompson B. Global processing in amblyopia: a review // *Frontiers in Psychology*. 2014. V. 5(June). Article 583. P. 1–21.
- 104.Harwerth R.S., Fredenbourg P.M, Smith E.L. Temporal integration for stereoscopic vision // *Vision Res*. 2003. V. 43. P. 505 - 517.
- 105.Held R., Birch E.E., Gwiazada J. Stereoacuity of human infants // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1980. V. 77. P. 5572 – 5574.
- 106.Herbison N., Cobb S., Gregson R., Ash I., Eastgate R., Purdy J., Hepburn T., MacKeith D., Foss A. Interactive binocular treatment (I-BiT) for amblyopia: results of a pilot study of 3D shutter glasses system // *Eye (London, England)*. 2013. V. 27(9). P. 1077–83.
- 107.Hess R. F., Mansouri B., Thompson B. A binocular approach to treating amblyopia: antisuppression therapy// *Optometry and Vision Science: Official Publication of the American Academy of Optometry*. 2010. V. 87(9). P. 697–704.
- 108.Hess R.F. Amblyopia: site unseen. // *Clin. Exp. Optom*. 2001. V. 84(6). P. 321–P. 336.
- 109.Hess R. F., Baker C. L. Human pattern-evoked electroretinogram // *Journal of neurophysiology*. 1984. V. 51(5). P. 939-951.
- 110.Hess R.F. Baker C. L., Verhoeve J. N., Keesey U. T., France T. D. The pattern evoked electroretinogram: Its variability in normals and its relationship to amblyopia // *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci*. 1985. V. 26(11). P. 1610–1623.
- 111.Hess R. F., Field D.J., Watt R.J. The puzzle of amblyopia // *Vision: Coding and efficiency* / Ed. Blakemore C. Cambridge Univ. Press, 1993. Ch. 25. P. 267–280.
- 112.Hess R.F., France T.D., Keesey U.T. Residual vision in humans who have been monocularly deprived of pattern vision in early life // *Exp. Brain. Res*. V. 44. P. 295-311.
- 113.Hess R.F., Thompson B. New insights into amblyopia: binocular therapy and noninvasive brain stimulation // *J. AAPOS: The Official Publ. Am. Assoc. Pediatric Ophthalm. Strabismus*. 2013. V. 17(1). P. 89–93.
- 114.Howard I. P. *Perceiving in depth, volume 1: basic mechanisms*. Oxford University Press, 2012, 664 p.

- 115.Howard I. P., Rogers B. J. Perceiving in depth, volume 2: stereoscopic vision. Oxford University Press, 2012, 635 p.
- 116.Howard I. P. Perceiving in depth, volume 3: other mechanisms of depth perception. Oxford University Press, 2012, 392 p.
- 117.Kanonidou E. Amblyopia: a mini review of the literature // Internat. Ophthalm. 2011. V. 31(3). P. 249–256.
- 118.Kim J., Yang H. K., Kim Y., Lee B., Hwang J. M. Distance stereotest using a 3-dimensional monitor for adult subjects // Am. J. Ophthalmol. 2011. V. 151. No. 6. P. 1081–1086.
- 119.Koenderink J.J., van Doorn A.J., Kappers A.M.L. Pictorial Relief // Seeing spatial form / Eds. Jenkin M.R.M., Harris L.R. Oxford Univ. Press, 2006. P. 11-33.
- 120.Kriegbaum-Stehberger B., Jiang X., Mojon D.S. Performance of a new, 3D-monitor based random-dot stereotest for children under 4 years of age // Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 2008. V. 246. P. 1 – 7.
- 121.Krumina G., Ozolinsh M., Lyakhovetskii V.A. Stereovision by visual stimulus of different quality (Изучение стереоскопического зрения с помощью стимулов с различной степенью размывания) // Proceedings of the IV seminar "Ocular biomechanics", Moscow, 12 mar.2004.– Moscow, 2004.– P.82-89.
- 122.Kulp M.T., Cotter S.A., Connor A.J., Clarke M.P. Should amblyopia be treated? // Ophthalmic and Physiological Optics. 2014. V. 34(2). P. 226–232.
- 123.Lee S., Shioiri S., Yaguchi H. The effect of exposure duration on stereopsis and its dependency on spatial frequency // Opt. Rev. 2004. V. 11. No. 4. P. 258 – 264.
- 124.Legge G.E., Gu Y. Stereopsis and contrast // Vision Res. 1989. V. 29. No. 8. P. 989 - 1004.
- 125.Leguire L. E., Rogers G. L., Bremer D. L. Amblyopia: The normal eye is not normal // J. Ped. Ophthalmol. Srtab. 1990. V. 27. P. 32-38.
126. Leske D.A., Birch E.E., Holmes J.M. Real Depth vs Randot Stereotests // Am. J. Ophthalmol. 2006. V. 142. No 4. P. 699–701.

127. Levi D.M. Perceptual learning in adults with amblyopia: a reevaluation of critical periods in human vision // *Developmental Psychobiology*. 2005. V. 46(3). P. 222–232.
128. Levi D.M., Knill D.C., Bavelier D. Stereopsis and amblyopia: A mini-review // *Vision Res.* 2015. V. 114, January. P. 17–30.
129. Li S.L., Jost R.M., Morale S.E., Stager D.R., Dao L., Stager D., Birch E.E. A binocular iPad treatment for amblyopic children // *Eye*. 2014. V. 28(10). P. 1246–1253.
130. Li J., Thompson B., Deng D., Chan L.Y., Yu M., Hess R.F. Dichoptic training enables the adult amblyopic brain to learn // *Current Biology*. 2013. V. 23(8). P. R308–R309.
131. Mathews S., Kruger P. B. Spatiotemporal transfer function of human accommodation // *Vision Res.* 1994. V. 34. N. 15. P. 1965–1980.
132. McKee S.P. The spatial requirements for fine stereoacuity // *Vision Res.* 1983. V. 23. No 2. P. 191–198.
133. Mirabella G., Hay S., Wong A.M.F. Deficits in perception of images of real-world scenes in patients with a history of amblyopia // *Arch. Ophthalmol.* 2011. V. 129(2). P. 176–183.
134. Momeni-Moghaddam H., Kundart J., Ehsani M., Gholami K. The Comparison of Stereopsis with TNO and Titmus Tests in Symptomatic and Asymptomatic University Students // *J. Behav. Optom.* 2012. V. 23(2). P. 35–39.
135. Morita T., Ando H. Effects of Viewing Conditions on Fatigue Caused by Watching 3DTV // *The 2012 Annual Technical Conference & Exhibition, SMPTE Conf.* 2012. 2012. P. 1–9.
136. O'Connor M.D. Deficits in perception of images of real world scenes in patients with a history of amblyopia // *Evid. Based Ophthalm.* 2011. V. 12(3). P. 140–141.
137. Ogle K.N. Note on stereoscopic acuity and observation distance // *J. Opt. Soc. Am.* 1958. V. 48. P. 794.
138. Owens D.A. A comparison of accommodative responsiveness and contrast sensitivity for sinusoidal gratings // *Vision Res.* 1980. V. 20. N. 1. P. 159–168.

139. Petrig B., Julesz B., Kropfl W., Baumgartner G., Aniliker M. Development of stereopsis and cortical binocularity in human infants: electrophysiological evidence // *Science*. 1981. V. 213. P. 1402 – 1405.
140. Powers M.K. Improving visual skills. A new internet application // *J. Modern Optics*. 2006. V. 53. P. 1313–1323.
141. Powers M.K., Grisham J.D., Wurm J.K., Wurm W.C. Improving visual skills: II-Remote assessment via Internet // *Optometry*. 2009. V. 80(2). P. 61–69.
142. Read J.C.A. What is stereoscopic vision good for? // *Proc. SPIE-IS&T Electron. Imaging*. 2015. V. 9391. P. 0N–1–0N–13.
143. Read J., Vancleef K., Serrano-Pedraza I., Morgan G., Sharp C., Clarke M. ASTEROID: Accurate STEReoacuity measurement in the eye clinic // *Perception* – 2015 – V. 44 – P. 75-76.
144. Qiu F., Wang L., Liu Y., Yu L. Interactive binocular amblyopia treatment system with full-field vision based on virtual reality // *IEEE*. 2007. P. 1257–1260.
145. Rastegarpour A. A computer-based anaglyphic system for the treatment of amblyopia // *Clinical Ophthalmology*. 2011. V. 5. P. 1319–1323.
146. Rogers B. *Perception: a very short introduction*. – OUP Oxford, 2017. 162 p.
147. Schmidt P.P. Vision screening with the RDE stereotest in pediatric populations // *Optom. Vis. Sci*. 1993. V. 71. No 4. P. 273 – 281.
148. Schor C.M. Spatial factors limiting stereopsis and fusion // *Optical news*. 1987. V. 13. No. 5. P. 14 – 17.
149. Schor C.M., Wood I. Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency // *Vision Res*. 1983. V. 23. No. 12. P. 1643–1654.
150. Simons K. Stereoacuity norms in young children // *Arch. Ophthalmol*. 1981. V. 99. P. 439 – 445.
151. Simons K. A comparison of the Frisby, Random-Dot E, TNO, and Randot Circles Stereotests in Screening and office use // *Arch. Ophthalmol*. 1981. V. 99. P. 446 – 452.
152. Sloan L.L. Measurement of visual acuity: A critical review // *Arch. Ophthalmol*. 1951. V. 45. P. 704.

153. Teller D.Y. First glances: the vision of infants // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 1997. V. 38. No. 11. P. 2183–2203.
154. To L., Thompson B., Blum J. R., Maehara G., Hess R. F., Cooperstock J. R.. A game platform for treatment of amblyopia // IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2011. V. 19(3). P. 280–289.
155. Vancleef K., Serrano-Pedraza I., Morgan G., Sharp C., Black C., Casanova T., Hugill J., Rafiq S., Clarke M., Read J. Stereothreshold estimates from a Bayesian staircase versus post hoc fitting of a psychometric function// 40th European Conference on Visual Perception 2016. Berlin, Germany. 27th-31st of August. Perception. 2017. V. 46, Suppl. (In press).
156. Vancleef K., Read J. C., Herbert W., Goodship N., Woodhouse M., Serrano-Pedraza I. Overestimation of stereo thresholds by the TNO stereotest is not due to global stereopsis // Ophthalmic and Physiological Optics. – 2017– V. 37. – No. 4 – P. 507–520.
157. Vasilyeva N.N. Age dynamics of fusion capabilities assessed by means of RDS with markers for objective control of binocular image splitting /N.N. Vasilyeva, G.I. Rozhkova // Perception. – 2008. – V. 37. – Supplement. – P. 102–103
158. Vlaskamp N. S., Yoon G., Banks M. S. Human stereopsis is not limited by the optics of the well-focused eye // Journal of Neuroscience. 2011. V. 31. No. 27. P. 9814–9818.
159. Waddingham P., Eastgate R., Cobb S. Design and development of a virtual-reality based system for improving vision in children with amblyopia //Advanced Computational Intelligence Paradigms in Healthcare 6. Virtual Reality in Psychotherapy, Rehabilitation, and Assessment. Springer Berlin Heidelberg, 2011. V. 337. P. 229–252.
160. Walraven J. Amblyopia screening with random-dot stereograms. // Am. J. Ophthalmol. 1975. V. 80. No. 5. P. 893–900.
161. Walraven J., Janzen P. TNO stereopsis test as an aid to the prevention of amblyopia // Ophthal. Physiol. Opt. 1993. V. 13. No 4. P. 350 – 356.

162. Walsh G., Charman W. N. Visual sensitivity to temporal changes in focus and its relevance to the accommodative response // *Vision Res.* 1988. V. 28. P. 1207-1221.
163. Wang J. Hatt S.R., O'Connor A.R., Drover J.R., Adams R., Birch E.E., Holmes J.M. The Final Version of the Distance Randot Stereotest: Normative data, reliability, and validity // *J. AAPOS.* 2011. V. 14. No. 2. P. 142–146.
164. Ward P. A. The effect of spatial frequency on steady-state accommodation // *Ophthal. Physiol. Opt.* 1987. V. 7. P. 211-217.
165. Webber A. L. Amblyopia treatment: An evidence-based approach to maximising treatment outcome // *Clinical and Experimental Optometry.* 2007. V. 90(4). P. 250–257.
166. Webber A. L., Wood J. Amblyopia: Prevalence, natural history, functional effects and treatment // *Clinical and Experimental Optometry.* 2005. V. 88(6). P. 365–375.
167. Westheimer G. Clinical evaluation of stereopsis // *Vision Res.* 2013. V. 90. P. 38–42.
168. Westheimer G. Seeing depth with two eyes: stereopsis. The Ferrier Lecture, 1992. // *Proc. R. Soc. Lond.* 1994. B. 257. P. 205 – 214.
169. Westheimer G., McKee S.P. Stereogram design for testing local stereopsis // *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 1980. V. 19(7). P. 802–809.
170. Winn D.B., Bradley A., Strang N.C., McGraw P.V., Thibos L.N. Reversal of colour-depth illusion explained by ocular chromatic aberration // *Vision Res.* 1995. V. 35. № 19. P. 2675–2684.
171. Wolfe J. M., Held R. A purely binocular mechanism in human vision // *Vision Res.* 1981. V. 21(12). P. 1755– 1759.
172. Wong B.P.H., Woods R.L., Peli T. Stereoacuity at distance and near // *Optom. Vis/ Sci.* 2002. V. 79. No 12 P. 771-778.
173. Yildirim C., Altinsoy H.I., Yakut E. Distance stereoacuity norms for the mentor B-VAT II-SG video acuity tester in young children and young adults // *J. Pediatr. Ophthalmol. Strabismus.* 1998. V. 2. No 1. P. 26 – 32.

174. Zaroff C.M., Knutelska M., Frumkes T.E. Variation in Stereoacuity: Normative Description, Fixation Disparity, and the Roles of Aging and Gender // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 2003. V. 44. No. 2. P. 891-900