СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ, 2025, том 39, № 3, с. 64–76

ЗРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА

УДК 612.843.721+612.846.8+617.751.6

ПРИМЕНЕНИЕ ВИРТУАЛЬНОЙ СЕЛЕКТИВНОЙ ОККЛЮЗИИ НА БАЗЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ 3D-ТЕХНОЛОГИИ В ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ЛЕЧЕНИИ РАССТРОЙСТВ БИНОКУЛЯРНОГО ЗРЕНИЯ

© 2025 г. М. А. Грачева[1,*], Г. И. Рожкова[1], Н. Н. Дергачева[2]

[1]ФГБУН Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Б. Каретный переулок, д. 19/1, Москва, 127051 Россия

[2]Российский научно-исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Островитянова ул., д. 1/6, Москва, 117513 Россия

**E-mail: mg@iitp.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2025
После доработки 15.05.2025
Принята к публикации 29.05.2025

Компьютеризация функционального лечения расстройств бинокулярного зрения, в частности – амблиопии и косоглазия, открыла принципиально новые возможности для повышения эффективности и скорости лечения за счет совершенствования коррекционных и тренировочных процедур, внедрения новых стимулов и упражнений, ранее практически нереализуемых, и уменьшения физиологического и психологического дискомфорта. С учетом более чем десятилетнего опыта использования в лабораторных и клинических условиях программы “ПОИСК”, разработанной в ИППИ РАН для лечения амблиопии, в статье рассматриваются возможности и особенности применения виртуальной селективной окклюзии на базе поляризационной сепарации левого и правого изображений вместо традиционных методов окклюзии. Анализ показывает, что традиционные методы, предусматривающие длительное использование устанавливаемой перед глазом заслонки, выключающей глаз из работы (пэтчинг) или регулярное закапывание атропина для расфокусировки сетчаточных изображений (атропиновая пенализация) в подавляющем большинстве случаев могут и должны заменяться более эффективными и менее дискомфортными компьютерными методами виртуальной селективной окклюзии.

Ключевые слова: расстройства бинокулярного зрения, амблиопия, виртуальная окклюзия, поляризационные 3D-технологии

DOI: 10.7868/S3034593625030063

ВВЕДЕНИЕ

Классическая и виртуальная окклюзия

К настоящему времени отечественными и зарубежными разработчиками создано много различных интерактивных компьютерных программ (ИКП) для функционального лечения бинокулярных расстройств и тренировки механизмов бинокулярного зрения у пациентов разного возраста и уровня развития. При этом многие ИКП предусматривают использование одного из самых распространенных лечебных средств – метода окклюзии (в современной литературе часто называемого пэтчингом). Этот метод заключается в избирательном тренирующем воздействии на худший глаз (или поочередно на каждый) для снятия предполагаемого подавляющего влияния со стороны второго глаза (если он лучший) или для исключения поступления в мозг конкурирующих сигналов, которые снижают потенциальные возможности обработки сигналов тренируемого глаза. Однако до сих пор в большинстве случаев роль ИКП сводится к обеспечению генерации зрительных стимулов и регистрации реакций пациента, тогда как для избирательного воздействия на тренируемый глаз используется традиционная терапевтическая процедура: второй глаз просто закрывают окклюдером (заслонкой, заклейкой, повязкой), как и сотни лет назад. Такая практика сохраняется и даже рекомендуется официально как универсальная и проверенная временем и в РФ, и за рубежом (Федеральные клинические рекомендации, 2015; Pineles et al., 2020), несмотря на то, что еще с XVIII в. после первых публикаций с описанием окклюзии в научной литературе многие врачи и родители пациентов выступали с критикой

ее применения (см. обзор Loudon, Simonsz, 2005, а также Gifford, 1935; Newsham, 2000; Levi, Li, 2009; Kulp et al., 2014; Tailor et al., 2016).

При традиционном лечении окклюзия назначается на несколько часов в день (или даже на целый день), а курс лечения длится несколько месяцев (и даже лет). Нередко такая окклюзия плохо переносится детьми и вызывает у них психологический дискомфорт и даже неврологические расстройства. Негативное влияние полной окклюзии может особенно сильно сказываться в случаях односторонней амблиопии с большой разницей в остроте зрения худшего и лучшего глаза. Такие пациенты имеют неплохое зрение в отсутствие окклюзии благодаря своему лучшему глазу, а при укреплении перед лучшим глазом окклюдера, оставив для зрения только худший, врач на длительное время "превращает этих пациентов в полуслепых", которые не могут привычным образом ориентироваться в пространстве и выполнять обычные для них манипуляции с мелкими предметами.

Принципиальным недостатком классической окклюзии является ее направленность на улучшение и тренировку только механизмов монокулярного зрения: активируют либо только один худший глаз, либо каждый глаз, но по очереди, без одновременного синхронного воздействия на оба глаза. При этом глаза не обучаются работать совместно, так как нет условий для их одновременного функционирования, то есть во время монокулярной окклюзии специфические бинокулярные механизмы как бы "заблокированы". Учитывая это, можно предположить, что тем самым традиционная окклюзия даже несколько задерживает формирование или восстановление бинокулярных зрительных функций. В частности, такая окклюзия может замедлить ликвидацию скотомы подавления, которая часто присутствует при косоглазии и проявляется только в условиях бинокулярного наблюдения в виде существования "запретной" области вокруг точки фиксации (области внимания и интереса), куда мозг "позволяет" смотреть только ведущему глазу. При традиционной схеме лечения, начинающегося с монокулярной окклюзии, этот негативный момент обычно не обнаруживается, так как выработка бинокулярного взаимодействия начинается на более позднем этапе с применением синоптофора и других средств, обеспечивающих возможность дихоптического наблюдения предъявляемых изображений.

К счастью, в последние десятилетия, благодаря прогрессу физиологии зрения и лучшему пониманию процессов бинокулярного восприятия, сформировалось представление о необходимости с самого начала лечения воздействовать не только на монокулярные каналы, но и на различные модули бинокулярной зрительной системы, которые должны координированно функционировать для обеспечения нормального бинокулярного зрения (Рожкова, Плосконос, 1988; Алексеенко, Шкорбатова, 2015; Хьюбел, 1990; Рожкова, 1992; Wolfe, Owens, 1979; Wolfe, Held, 1982; Wolfe, 1986).

Современные клиницисты предлагают модифицированные методы неполной окклюзии в бинокулярных или частично бинокулярных условиях наблюдения. Из этих методов наиболее перспективными нам представляются варианты виртуальной окклюзии, когда стимульный материал предъявляется с использованием сепарационных 3D-технологий, позволяющих иным способом создавать преимущества для тренируемого глаза и варьировать режимы стимуляции как между сеансами, так и в каждом сеансе тренировки (Рожкова и др., 2015, 2025; Li et al., 2013; Qiu et al., 2007; Herbison et al., 2013).

Амблиопия и косоглазие, функциональное и хирургическое лечение

Следует подчеркнуть, что амблиопия часто сочетается с косоглазием, и сильным стимулом для ее быстрого и эффективного излечения является желание избежать хирургического вмешательства для исправления установки глаз. Согласно современным научным представлениям, при лечении косоглазия с амблиопией прежде всего нужно добиться "равноправия" левого и правого зрительных каналов обработки информации, т.е. одинаково высокого качества зрения левым и правым глазом, которое является необходимым условием успешного функционирования бинокулярных механизмов.

Отечественная статистика результатов хирургического лечения косоглазия в последние десятилетия выявляет два тревожных обстоятельства: растет среднее число операций, проводимых на одном пациенте для достижения положительного эффекта, и снижается вероятность достижения успеха даже после второй, третьей (а иногда и четвертой) операции (Чернышова, Самедова, 2012). Одной из основных причин такой неблагополучной ситуации мы считаем наблюдающуюся тенденцию к недооценке важности функционального лечения косоглазия сразу после его выявления. При этом нужно использовать все возможные

методы, индивидуально оптимизируя лечение в соответствии с возрастом, диагнозом, физиологическим и психологическим состоянием пациента и другими его особенностями. При раннем вмешательстве особенно удобны щадящие и разнообразные компьютерные упражнения и игры. Однако в клиниках при лечении косоглазия нередко придерживаются пагубного правила: “прежде всего, надо хирургическим путем поставить глаза правильно”. Во многих случаях это правило не отвечает характеру патологии и может нанести пациенту трудно поправимый вред, так как надо не “исправлять” мышечный аппарат, а лечить мозговые механизмы, управляющие совместными движениями двух глаз.

К настоящему времени достоверно установлено, что определенные виды косоглазия могут излечиваться в относительно небольшие сроки без хирургического вмешательства различными средствами оптической коррекции, специальными упражнениями и тренировками, стимулирующими воздействиями – т.е. неинвазивными методами *функционального лечения*. Еще в середине прошлого века Л.И. Сергиевский (Сергиевский, 1961) писал о богатых возможностях функционального лечения косоглазия, а к настоящему времени эти возможности многократно возросли благодаря техническому прогрессу. Если раньше лечебные процедуры, проводимые преимущественно на приборах, нередко были однообразны и утомительны как для пациента, так и для медицинского персонала, то теперь большую часть процедур можно имитировать в компьютерной реализации и представить в игровой форме. Более того, появляется возможность изобретать и реализовывать такие эффективные лечебные тренировки, о которых раньше невозможно было даже мечтать.

Поляризационные технологии и другие методы сепарации изображений в функциональном лечении

Наиболее часто, особенно на начальных этапах лечения амблиопии, используют полную окклюзию, хотя уже в начале XIX в. применяли и неполную окклюзию, используя полупрозрачные окклюдеры, а позже – атропиновую пенализацию. Во второй половине XX в., благодаря техническим достижениям, были разработаны новые модификации метода окклюзии, позволяющие легко регулировать степень видимости изображений, предъявляемых каждому глазу. Один из наиболее удобных способов – дозирование проходящего в каждый глаз светового потока поляризационными фильтрами в условиях генерации левого и правого изображений на мониторах со специальным покрытием экрана, позволяющим обеспечить противоположную поляризацию этих изображений и независимое варьирование их параметров. Для восприятия каждым глазом “своих” изображений используют очки с соответствующими поляризационными фильтрами.

Как пишет в своей книге Н.И. Пильман (Пильман, 1964), в отечественной практике одними из первых, применивших для лечения амблиопии поляризационные фильтры, были Е.М. Белостоцкий и Н.И. Гольцман, которые использовали возможности поляроидного диплоскопа и очковые фильтры с линейной поляризацией разного направления. Варьируя ориентацию очковых фильтров, они могли менять степень пропускания света, идущего от левого и правого изображений и, соответственно, получать нужный процент частичной окклюзии.

Чтобы обеспечить возможность проведения аналогичных тренировок по лечению амблиопии в домашних условиях, Н.И. Пильман предложила Е.М. Белостоцкому и Н.И. Гольцману сделать пленочный поляризационный фильтр, который крепился бы к экрану обычного телевизора. Одну половину телевизионного экрана предлагалось покрыть пленкой, пропускающей свет с горизонтальной поляризацией, другую половину – с вертикальной поляризацией (рис. 1). Просматривая телефильмы в соответствующих поляризационных очках и наблюдая движение объектов по всему экрану, пациент мог видеть отдельные объекты то одним, то другим глазом, а в центре экрана – частично одним, частично другим. Очевидно, что для успешного восприятия содержания телепередач пациенту нужно было обеспечивать продуктивное использование информации, поступающей от обоих глаз, развивать свои механизмы одновременного зрения.

В своей книге Н.И. Пильман отмечала, что исследования Т.И. Голиковой, пролечившей таким методом 55 детей, продемонстрировали его большую эффективность в ликвидации скотомы подавления и развитии устойчивого одновременного зрения: всего 10–15 дней требовалось для существенного прогресса и возможности перехода к следующему этапу аппаратного лечения для развития фузии и стереоскопического восприятия. (К сожалению, подробных публикаций о результатах этой работы мы не обнаружили.)

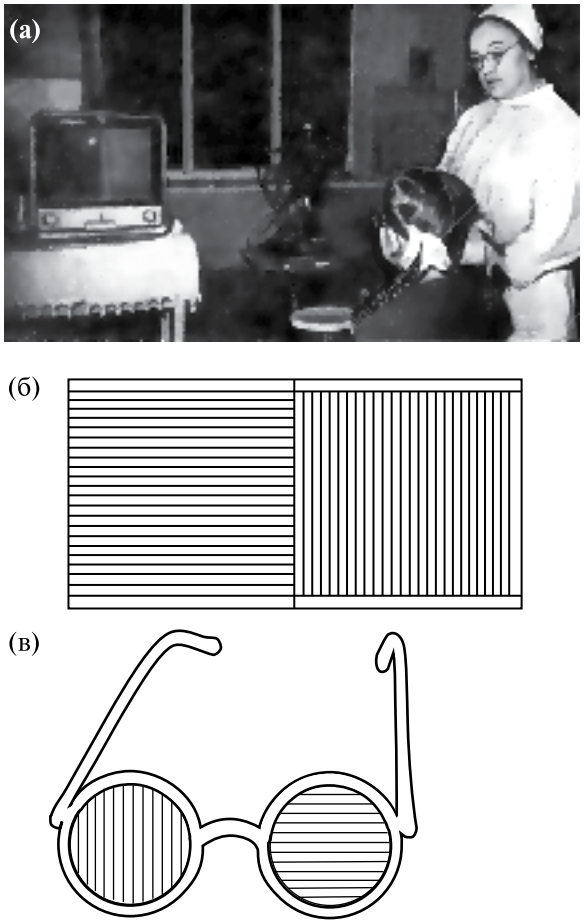

Рис. 1. Иллюстрация использования поляризационных фильтров для сеансов лечения бинокулярных расстройств при помощи просмотра обычных телепередач (а). Ниже условно изображены поляризационные фильтры для двух половин экрана телевизора (б) и для очков (в). (Из книги Пильман, 1964).

В случае амблиопии с правильной установкой глаз полная окклюзия противопоказана, так как может спровоцировать косоглазие. В этих случаях рекомендуется использовать именно частичную окклюзию. В 90-х годах прошлого века начался новый этап применения частичной окклюзии, связанный с быстрым внедрением компьютерных методов функционального лечения косоглазия и амблиопии. По своей сути все компьютерные тренировки, использующие сепарацию изображений для левого и правого глаза любыми методами, являются *дихоптическими*.

В данной работе мы анализируем результаты лечения амблиопии при помощи интерактивной компьютерной программы “ПОИСК”, предусматривающей поляризационную сепарацию изображений для левого и правого глаза, предъявляемых на мониторах или телевизорах со специальной структурой экрана. Эта программа апробирована и используется в ряде медицинских учреждений Москвы и Санкт-Петербурга. Для иллюстрации ее особенностей и преимуществ здесь приведены данные, полученные в “Международном центре охраны зрения” г. Москвы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика используемой компьютерной программы

ИКП “ПОИСК” – игровая интерактивная программа для функционального лечения амблиопии, развития механизмов зрительного поиска, повышения скорости зрительной работы (Большаков и др., 2013). Во всех упражнениях с различными заданиями общей задачей является поиск объекта, идентичного постоянно демонстрируемому в верхней части экрана образцу, среди одновременно предъявляемых ниже, в поле поиска (игровом поле), объектов, число и размеры которых варьируются. Для работы с программой использовали 3D-телевизор LG 32LF620U со специальным поляризационным покрытием экрана, обеспечивающим чередование противоположных направлений круговой поляризации света в четных и нечетных строках (технология FPR). Во время сеансов функционального лечения пациенты надевали соответствующие пассивные поляризационные стереоочки. Данная аппаратно-программная схема позволяет реализовывать различные режимы полной и частичной виртуальной окклюзии.

В программе предусмотрены четыре “уровня сложности” по степени видимости изображений на игровом поле для лучшего (нетренируемого) глаза (75; 50; 25 и 0%). Кроме того, имеется возможность выбрать одну из трех игровых схем: “Алфавит”, “Галерея” и “Мозаика” (поиск букв, небольших предметов или картинок в наборе, фрагментов в большой картине). Варианты заданий приведены на рис. 2. Помимо стандартных изображений, в программу можно загружать дополнительный стимульный материал, например, наборы изображений или фотографий, принесенные пациентом.

Усложнять задания от сеанса к сеансу рекомендуется постепенно в соответствии с достигнутыми результатами путем ухудшения видимости игрового поля для лучшего (нетренируемого) глаза до полного его “выключения”, которое пациент не осознает, а также путем изменения вида и размеров изображений для поиска.

Рис. 2. Примеры заданий в программе “ПОИСК”. В верхней части игрового поля расположен элемент для поиска, который нужно найти в нижней части игрового поля. Это может быть буква (а), изображение животного (б), небольшая картинка (в), фрагмент большой картины (г) и др.

Испытуемые и процедура

Испытуемыми были 25 пациентов разного возраста (от 5 до 29 лет), проходившие лечение в “Международном центре охраны зрения” (г. Москва) в реальных условиях работы медицинского учреждения. Каждый испытуемый проходил курс из 10 тренировок по 10-15 минут.

До и после курса тренировок у испытуемых оценивали следующие показатели работы зрительной системы: монокулярную остроту зрения, запас аккомодации, характер зрения. Из-за ограничений, определяемых условиями реальной работы в клинике с приходящими пациентами, для некоторых из них удалось собрать не весь запланированный набор данных; для каждого показателя объем использованных при анализе данных указан в результатах отдельно.

Остроту зрения измеряли при помощи проектора знаков Huvitz CCP-3100, дополнительно использовали пробную оправу и набор пробных линз.

Запас аккомодации оценивали как положительную часть относительной аккомодации: оценивалась максимально переносимая сила

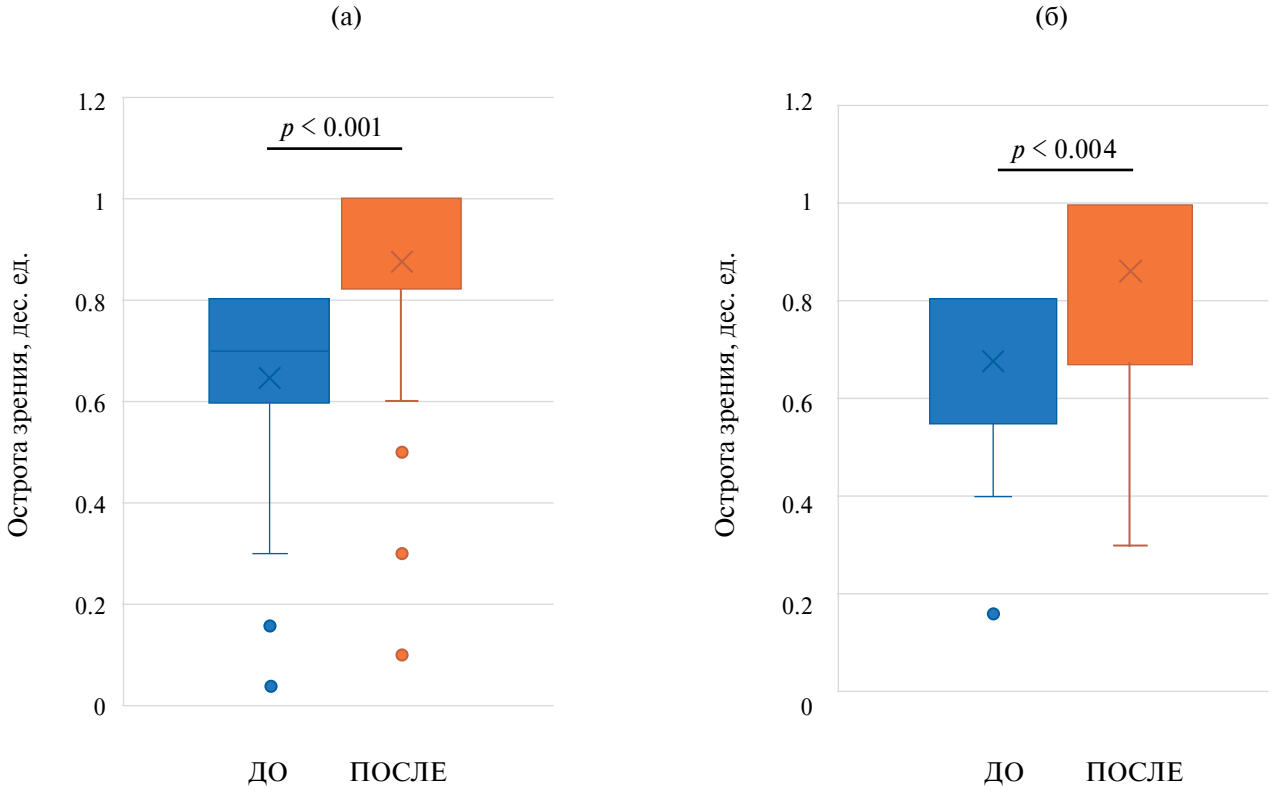

Рис. 3. Острота зрения до и после тренировок: (а) – в группе пациентов смешанного возраста (24 человека / 32 глаза, ср. возраст ± станд. отклон. – 14.6±8.5 лет) и (б) – у взрослых пациентов (8 человек / 10 глаз ср. возраст 25.3±4.3 лет).

Таблица 1. Острота зрения тренируемого глаза до и после тренировок в группе смешанного возраста и в группе взрослых пациентов.

Группа пациентов	До тренировок		После тренировок		Статистики по критерию Уилкоксона	
	Медиана, дес. ед.	Среднее ± ст. откл., дес. ед.	Медиана, дес. ед.	Среднее ± ст. откл., дес. ед.	z	p
Группа смешанного возраста (14.6±8.5 лет)	0.7	0.65±0.21	1.0	0.88±0.23	–5.05	< 0.001
Группа взрослых (25.3±4.3 лет)	0.8	0.67±0.22	1.0	0.86±0.25	–2.91	0.004

отрицательных линз при чтении текста, соответствующего остроте зрения 0.7 (текст № 4), на расстоянии 33 см (монокулярно).

Характер зрения оценивали четырехточечным тестом (тест Уорса, цветотест) с анаглифной сепарацией. По принятым в РФ критериям, характер зрения считали монокулярным, если пациент видел только изображение, предназначенное для одного глаза, то есть 2 или 3 кружка. Если пациент видел 4 кружка, характер зрения считали бинокулярным, если 5 кружков – одновременным; а если нестабильно и попеременно наблюдались то 4, то 5 кружков, характер зрения считали нестабильным бинокулярным.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Острота зрения

Повышение остроты зрения в результате тренировок представлено на рис. 3 и в табл. 1. Из графиков видно, что даже после короткого курса тренировок наблюдался значимый прирост остроты зрения у пациентов как в группе смешанного возраста (рис. 3, а), так и в выделенной группе взрослых пациентов (старше 18 лет, рис. 3, б).

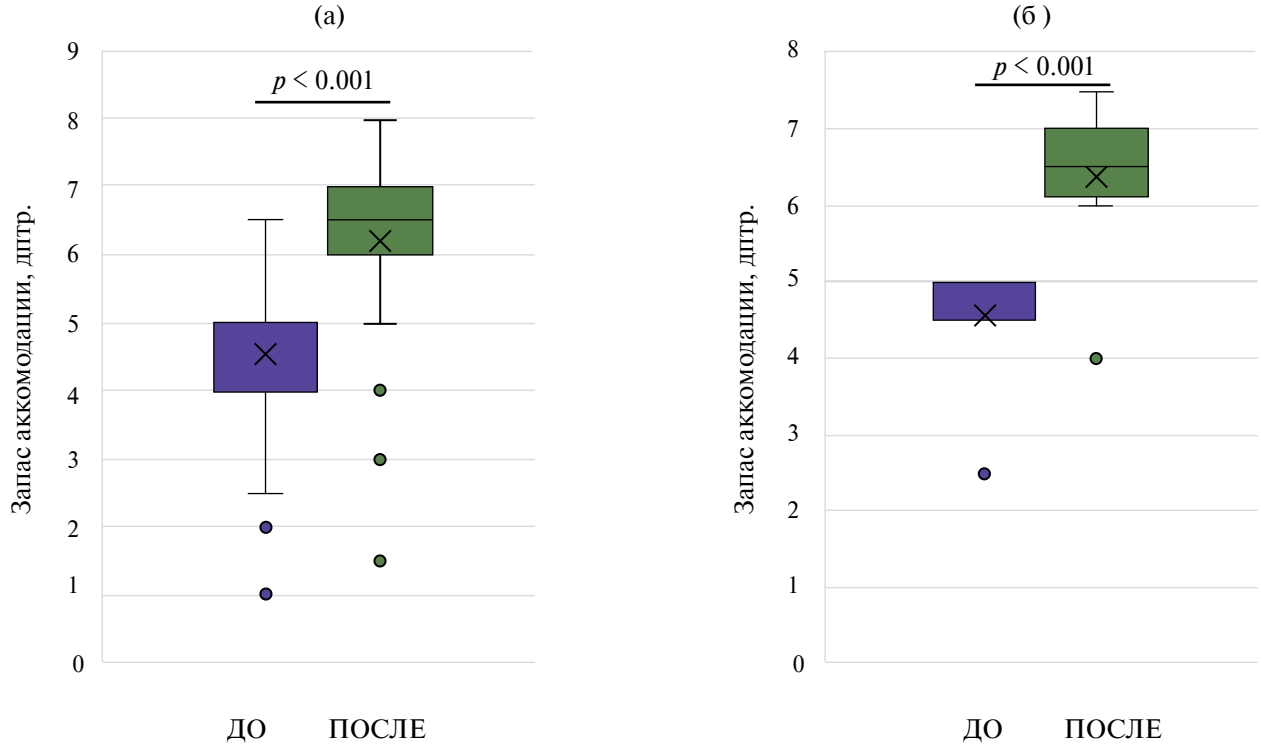

Рис. 4. Запас аккомодации до и после тренировок: а – в группе пациентов смешанного возраста (21 человек / 27 глаз, ср. возраст ± станд.отклон. – 14.6±8.4 лет); б – в группе взрослых пациентов (8 человек / 10 глаз, ср. возраст ± станд. отклон. – 25.3±4.3 лет).

Таблица 2. Запас аккомодации до и после тренировок в группе смешанного возраста и в группе взрослых пациентов

Группа пациентов	До тренировок		После тренировок		Статистики по критерию Уилкоксона	
	Медиана, дптр	Среднее ± ст. откл., дптр	Медиана, дптр	Среднее ± ст. откл., дптр	z	p
Группа смешанного возраста (14.6±8.4 лет)	5	4.54±1.29	6.5	6.20±1.44	–4.58	< 0.001
Группа взрослых (26.5±4.5 лет)	5	4.56±0.86	6.5	6.38 ± 1.06	–2.57	0.01

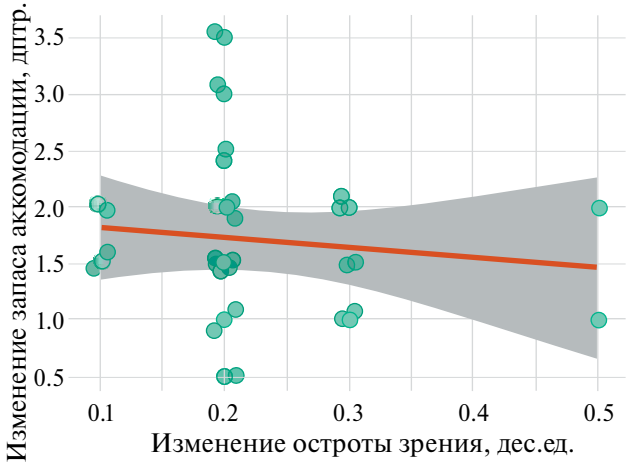

Рис. 5. Сравнение индивидуальных изменений остроты зрения и запаса аккомодации. Прямой линией отмечена линейная регрессия с 95% доверительным интервалом. Данные для 19 пациентов (26 глаз), ср. возраст ± станд. отклон. – 14.1±8.0 лет.

Запас аккомодации

Увеличение запаса аккомодации в результате курса тренировок представлено на рис. 4 и в табл. 2. Как и по остроте зрения, результаты оценки запаса аккомодации показывают значимый прирост и для группы смешанного возраста (рис. 4, а), и отдельно для взрослых пациентов (старше 18 лет, рис. 4, б).

Сравнение изменений остроты зрения и запаса аккомодации

Анализ индивидуальных данных по изменению остроты зрения и запаса аккомодации представлен на рис. 5. Показано, что прирост остроты зрения и прирост аккомодации имеют очень слабую статистически незначимую корреляцию, Спирмен $r = -0.13$ ($N = 25$, $p = 0.53$), то есть изменения этих показателей в результате лечения не были связаны между собой.

Из графика видно, что при одном и том же приросте остроты зрения (например, 0.2 дес. ед.) прирост аккомодации имеет большой разброс (от 0.5 до 3.5 дптр). Это подчеркивает необходимость оценки эффективности лечения по разным показателям качества функционирования зрительной системы, а не только по значениям остроты зрения.

Характер зрения

Данные по оценке характера зрения представлены на рис. 6. Из рисунка видно, что в результате курса тренировок значительно выросла доля пациентов с бинокулярным характером зрения. Сравнение высоты столбиков показывает, что в этот рост внесли вклад не только 5 пациентов с исходно неустойчивым бинокулярным зрением, но также 5 пациентов с одновременным и 3 пациента с монокулярным характером зрения.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе рассмотрены данные, полученные на 25 пациентах до и после короткого курса тренировок для восстановления и развития бинокулярного зрения (10 сеансов по 10–15 минут) с использованием ИКП ПОИСК. Анализ всех результатов такого функционального лечения продемонстрировал значимое улучшение качества зрения пациентов исследованной группы: в среднем улучшились показатели и характера зрения, и остроты зрения, и запаса аккомодации.

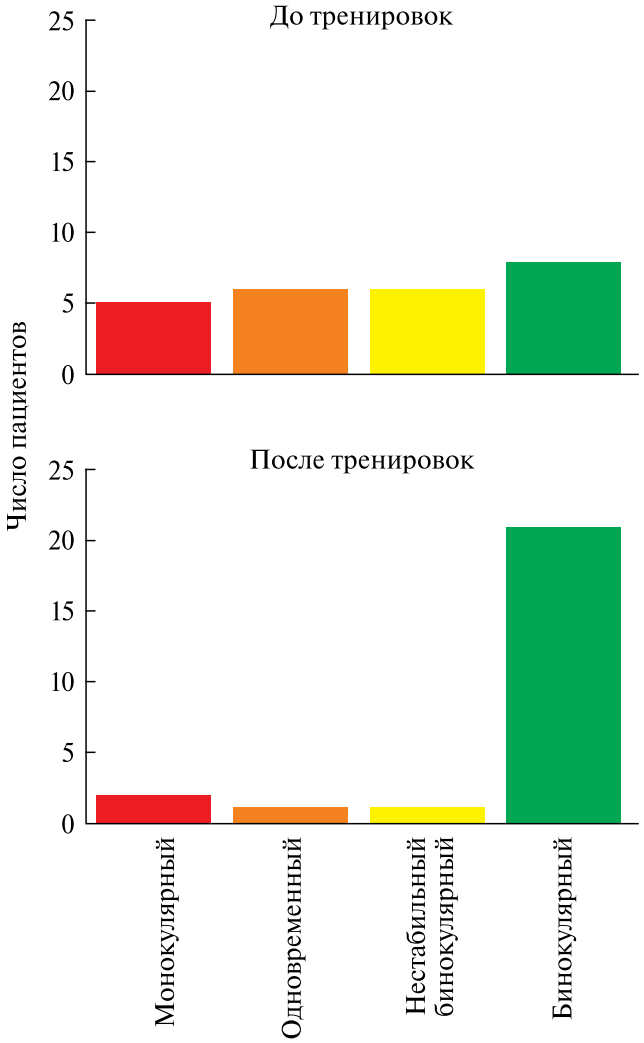

Рис. 6. Характер зрения до и после курса тренировок в группе смешанных по возрасту пациентов (25 человек, ср. возраст ± станд. отклон. 14.6±8.3).

Важно отметить, что группа пациентов включала не только детей, но и подростков, и взрослых (старше 18 лет), при этом даже отдельно для группы взрослых пациентов выявлено статистически значимое улучшение показателей остроты зрения и запаса аккомодации (см. рис. 3, б и рис. 4, б). Эти данные в очередной раз свидетельствуют о том, что функциональное лечение можно успешно проводить не только детям младшего возраста, но и взрослым пациентам, так как зрительная система сохраняет определенную пластичность и за пределами сенситивных периодов (Рожкова и др., 2025; Levi, 2006).

Важным наблюдением является отсутствие значимой корреляции между двумя оцениваемыми показателями: остротой зрения и аккомодацией (рис. 5). Представленные данные позволяют предполагать, что значимые улучшения остроты зрения и запаса аккомодации получены не за счет нескольких наиболее чувствительных к данной терапии пациентов, и что эта терапия с разной эффективностью влияла на улучшение разных показателей: по графику видно, что даже при одинаковом приросте остроты зрения на 0.2 дес. ед. имел место большой разброс значений прироста аккомодации. И хотя в исследованной группе положительный эффект лечения был зарегистрирован у всех пациентов, важно подчеркнуть, что эффективность функционального лечения стоит оценивать не по одному, а по ряду показателей состояния зрительной системы.

Отечественными авторами такое мнение обосновывалось еще с 90-х годов прошлого века при анализе опыта работы с оригинальными ИКП того периода (см. обзор: Рожкова и др., 2025). Неоднократно высказывалось оно и в зарубежных публикациях, в частности – в статье (Levi et al., 2015). Авторы цитируемой работы особо подчеркивают, что для разных типов амблиопии различный эффект по ряду показателей могут давать разные типы тренировок, которые они делят на монокулярные (например, с традиционной окклюзией), дихоптические (в которых стимулы для левого и правого глаза разделены) и стереотренировки (когда зрительную систему стимулируют именно объединять, совместно перерабатывать сигналы, поступающие от обоих глаз).

По нашему мнению, чисто монокулярной терапии не бывает вообще. В формирование видимого образа всегда вносят вклад оба глаза (если они зрячие), даже тогда, когда один из них полностью закрыт окклюдером, т.е. когда для этого глаза "зрительным стимулом" является темнота. Самым удивительным свидетельством этого являются эксперименты с монокулярным наблюдением однородного светлого поля – ганцфельда. В таких экспериментах видимое поле зрения воспринимается как светящаяся среда, на которую со стороны закрытого глаза эпизодически наплывает темный туман, причем темнота может заполнять все поле зрения (Рожкова и др., 1985). Такого рода эксперименты показывают, что при традиционной окклюзии полностью исключить из процесса восприятия физиологически зрячий глаз не так просто: закрытый глаз все время пытается вносить свой вклад в видимый образ наблюдаемой сцены, основываясь на состоянии собственных фоторецепторов и частично игнорируя информацию о закрытых веках, наличии заслонки и других обстоятельствах наблюдения.

Заметим, что у пациентов с косоглазием в обычных условиях наблюдения почти всегда в поле зрения есть область, которая (теоретически) может восприниматься бинокулярно, так как она проецируется на центральные участки двух сетчаток, которые могут обеспечивать работу бинокулярных механизмов. Эта область находится на пересечении зрительных осей левого и правого глаза. Отличие такого зрения от нормального состоит в том, что при косоглазии данная область не совпадает с областью фиксации взора – областью интереса, на которую хочет направить внимание наблюдатель. Если бы пациент с косоглазием мог произвольно переключать внимание на область пересечения зрительных осей, это создавало бы условия для функционирования бинокулярных механизмов при восприятии находящихся там объектов. Именно на этом основаны процедуры восстановления и развития бинокулярного зрения на синоптофоре – аппарате с отдельными каналами наблюдения для каждого глаза, только на этом аппарате пациенту предъявляют не один объект, а два стимула для слияния, располагая их в соответствии с естественным для пациента "неправильным" положением его зрительных осей. Таким образом, синоптофор создает условия дихоптической тренировки для восстановления бинокулярного зрения, что отличает его от традиционных окклюдеров, создающих ситуацию восприятия противоречивых сигналов, идущих в мозг от двух глаз: сетчатка одного глаза направляет информацию о темноте, а второго – о рассматриваемом объекте.

Синоптофор, будучи одним из самых распространенных приборов для восстановления бинокулярных функций в отечественной

офтальмологической практике, является довольно громоздким и не очень удобным для осуществления дихоптических тренировок аппаратом с ограниченным его конструкцией набором возможных упражнений. В отличие от этого современные компьютеризированные дихоптические методы, особенно основанные на использовании передовых технологий сепарации изображений, открывают широкие возможности для творческого совершенствования лечебных процедур. Такие методы не только заменяют неудобные приборы, но и дают более богатые возможности для реализации различных монокулярных, дихоптических и стереоскопических тренировок и воздействий на разные модули зрительной системы, варьируя в широких пределах пространственно-временные параметры и контраст стимулов, предъявляемых каждому глазу.

Из особых достоинств применяемого нами метода поляризационной сепарации изображений с пассивными очками (технология FRP) в сравнении с цветовыми и временны*ми* методами сепарации важно указать (1) возможность беспроблемного использования полноцветных изображений одинаковой цветовой палитры для обоих глаз (это облегчает настройку цветопередачи и исключает осложнения фузии из-за бинокулярной конкуренции по цвету) и (2) отсутствие необходимости синхронизировать работу системы предъявления изображений для левого и правого глаза и режим затемнения-просветления фильтров в активных очках. Детальное обсуждение этих вопросов выходит за рамки данной статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– Использование виртуальной окклюзии на базе поляризационной технологии сепарации позволяет добиться значимого улучшения качества зрения пациентов даже после короткого курса тренировок (10 занятий по 10–15 мин).

– У взрослых пациентов удается получить улучшение качества зрения, сопоставимое по величине с результатами детей и подростков, что говорит о перспективности применения рассмотренного метода виртуальной окклюзии для эффективного функционального лечения бинокулярных расстройств не только в пределах сенситивного периода развития зрительной системы. Эти результаты дополняют регулярно публикуемые в последние десятилетия данные, свидетельствующие об отсутствии возрастных ограничений для лечения нарушенного бинокулярного восприятия.

– Выявленная по результатам работы значительная индивидуальная вариабельность положительного влияния тренировок с использованием виртуальной окклюзии на остроту зрения, аккомодацию и характер зрения пациентов говорит о необходимости комплексной оценки эффективности лечебных процедур. Обычно используемый простой критерий – улучшение остроты зрения – не позволяет однозначно судить о степени полезности проведенного лечения, необходимо учитывать изменение других значимых показателей, характеризующих качество зрения пациентов.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гос. задания ИППИ РАН №FFNU-2025-0044.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Все процедуры исследования соответствуют этическим стандартам национального комитета по исследовательской этике и Хельсинкской декларации 1964 года и ее последующим изменениям. Исследование было одобрено локальным этическим комитетом Института проблем передачи информации.

ИНФОРМИРОВАННОЕ СОГЛАСИЕ

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

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной статьи подтвердили отсутствие конфликта интересов, о котором необходимо сообщить.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Рожкова Г.И. – идея исследования, планирование эксперимента, написание текста статьи, разработка тренировочной программы. Грачева М.А. – идея исследования, планирование эксперимента, написание текста статьи, разработка тренировочной программы. Дергачева Н.Н. – проведение исследования, сбор данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеенко С.В., Шкорбатова П.Ю. Депривационная и дисбинокулярная амблиопия: нарушения в геникуло-корковых зрительных путях. *Альманах клинической медицины*. 2015. № 36. С. 97-100.

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

Пильман Н.И. *Функциональное лечение косоглазия у детей*. Киев: “Здоров’я”, 1964. 225 с.

Рожкова Г.И. Бинокулярное зрение. *Физиология зрения*. М.: Наука, 1992. С. 586-664.

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.

Рожкова Г.И., Николаев П.П, Диментман А.М. Бинокулярная борьба при монокулярном наблюдении однородного поля и стабилизированных изображений. Физиология человека. 1985. Т. 11(3). С. 360-367.

Рожкова Г.И., Плосконос Г.А. Множественность механизмов бинокулярного синтеза и их избирательные нарушения при косоглазии. *Сенсорные системы*. 1988. Т. 2(2). С. 167-176.

Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Грачева М.А., Васильева Н.Н., Белокопытов А.В., Кононова Н.Е., Хаценко И.Е. Анализ развития компьютерных методов бинокулярного лечения косоглазия и амблиопии. *Сенсорные системы*. 2025. Т. 39 (2). С. 3-44.

Сергиевский Л.И. *Содружественное косоглазие и гетерофории. (Профилактика, диагностика, лечение без операции)*. М.: Медгиз, 1951. 243 с.

Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2015. (2). С. 56-63.

Хьюбел Д. *Глаз, мозг, зрение*. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 239 с.

Чернышова С.Г., Самедова Д.Х. Структура и причины неудовлетворительных результатов хирургического лечения содружественного косоглазия. *Офтальмология*. 2012. Т. 3 (10). С.158-164.

Gifford S.R. Some notes on the treatment of strabismus. *Br J Ophthalmol*. 1935. V. 19. P. 148-151.

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. 1077–1083.

Kulp M.T., Cotter S.A., Connor A.J., Clarke M.P. Should amblyopia be treated? *Ophthalmic Physiol Opt*. 2014. V. 34(2). P. 226. https://doi.org/10.1111/opo.12124

Levi D. Visual processing in amblyopia: Human studies. *Strabismus*. 2006. V. 14(1). P. 11–19. https://doi.org/10.1080/09273970500536243

Levi D.M., Li R.W. Perceptual learning as a potential treatment of amblyopia: a mini-review. *Vision Res*. 2009; V. 49(21). P. 2535-2549. https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.010

Levi D.M., Knill D.C., Bavelier D. Stereopsis and amblyopia: A mini-review. *Vision Research*. 2015. V. 114(January). P. 17–30. https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.002

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.

Loudon S.E, Simonsz H.J. The history of the treatment of amblyopia. *Strabismus*. 2005. V. 13. P. 93-106. https://doi.org/10.1080/09273970590949818

Newsham D. Parental non-concordance with occlusion therapy. *Br. J. Ophthalmol*. 2000. V. 84(9). P. 957-962.

Pineles S.L., Aakalu V.K., Hutchinson A.K., Galvin J.A., Heidary G., Binenbaum G., VanderVeen D.K., Lambert S.R. Binocular treatment of amblyopia: a report by the American Academy of Ophthalmology. Ophthalmology. 2020. V. 127(2). P. 261-272. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.08.024

Qiu F., Wang L., Liu Y., Yu L. Interactive binocular amblyopia treatment system with full-field vision based on virtual reality // IEEE. 2007. 1257–1260.

Tailor V., Bossi M., Greenwood J.A., Dahlmann-Noor A. Childhood amblyopia: current managemtnt and new trends. *British Medical Bulletin*. 2016. V. 119. P. 75-86. https://doi.org/10.1093/bmb/ldw030.

Wolfe J.M., Owens D.A. Evidence for separable binocular processes differentially affected by artificial anisometropia. *Amer. J. Optometry and Physiol. Opt*. 1979. V. 56. P. 279-284.

Wolfe J.M., Held R. Binocular adaptation that cannot be measured monocularly. *Perception*. 1982. V. 11. P. 289-295.

Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol. Rev*. 1986. V. 93(3). P. 262-282.

VIRTUAL SELECTIVE OCCLUSION BASED ON POLARIZATION 3D TECHNOLOGY IN FUNCTIONAL TREATMENT OF BINOCULAR VISION DISORDERS

M. A. Gracheva[a, *], G. I. Rozhkova[a], N. N. Dergacheva[b]

[a] *Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences, Moscow, B. Karetny lane, 19/1, 127051, Russia*

[b] *Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Ostrovitianova St, 1/6, 117513, Russia*

**E-mail: mg@iitp.ru*

Computerized functional treatment of binocular vision disorders, amblyopia and strabismus in particular, has opened fundamentally new opportunities for increasing the efficiency and decreasing time needed for treatment: improved correction and training procedures, new stimuli and exercises, previously practically unrealizable, and reduced physiological and psychological discomfort. Taking into account more than 10-year experience of using the "POISK" (the computer program developed in IITP RAS for amblyopia treatment) in laboratory and clinical conditions, the authors discuss the possibilities and features of employing virtual selective occlusion based on polarization separation of left and right images instead of traditional methods of occlusion. The analysis shows that, in the vast majority of cases, the traditional methods involving the long-term use of patching (occlusion therapy), which turns one of the eyes off from work, or regular injection of atropine to defocus retinal images (atropine penalization) can and should be replaced by more effective and less uncomfortable computer-based methods of virtual selective occlusion.

Keywords: binocular vision disorders, amblyopia, virtual occlusion, polarization 3D technologies

REFERENCES

Alekseenko S.V., Shkorbatova P.YU. Deprivatsionnaya i disbinokulyarnaya ambliopiya: narusheniya v genikulo-korkovykh zritel'nykh putyakh [Deprivation and dysbinocular amblyopia: disorders in geniculo-cortical visual pathways]. *Al'manakh klinicheskoi meditsiny*. 2015. (36). P. 97-100. (in Russian)

Bolshakov A.S., Gracheva M.A., Rozhkova G.I. *Interactive program for increasing visual acuity and speed of visual work in amblyopia – POISK*. Certificate of state registration of computer program No. 2013610976. Date of registration in the Register of Computer Programs January 9, 2013.

Pil'man N.I. *Funktsional'noe lechenie kosoglaziya u detei* [Functional treatment of strabismus in children]. Kiev: "ZdoroV'YA", 1964. 225 p. (in Russian)

Rozhkova G.I. Binokulyarnoe zrenie [Binocular vision]. *Fiziologiya zreniya* [Physiology of vision]. M.: Nauka, 1992. S. 586-664. (in Russian)

Rozhkova G. I., Lozinskii I. T., Gracheva M. A., Bol'shakov A. S., Vorob'ev A. V., Sen'ko I. V., Belokopytov A. V. Funktsional'naya korrektsiya narushennogo binokulyarnogo zreniya: preimushchestva ispol'zovaniya novykh komp'yuternykh tekhnologii [Functional correction of disturbed binocular vision: advantages of using new computer technologies]. *Sensornye sistemy* [Sensory Systems]. 2015. T. 29(2). S. 99–121. (in Russian)

Rozhkova G.I., Nikolaev P.P., Dimentman A.M. Binokulyarnaya bor'ba pri monokulyarnom nablyudenii odnorodnogo polya i stabilizirovannykh izobrazhenii. [Binocular struggle during monocular observation of homogeneous field and stabilized images]. *Fiziologiya cheloveka* [Human Physiology]. 1985. V. 11(3). P.360-367. (in Russian)

Rozhkova G.I., Ploskonos G.A. Mnozhestvennost' mekhanizmov binokulyarnogo sinteza i ikh izbiratel'nye narusheniya pri kosoglazii [Multiple mechanisms of binocular synthesis and their selective disorders in strabismus.]. *Sensornye sistemy*. 1988. V. 2. (2). P. 167-176. (in Russian)

Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Gracheva M.A., Vasilyeva N.N., Belokopytov A.V., Kononova N.E., Khatsenko I.E. Analiz razvitiya komp'yuternykh metodov binokulyarnogo lecheniya kosoglaziya i ambliopii [Development of computer methods in binocular treatment of strabismus and ambliopia]. *Sensornye sistemy*. 2025. V. 39 (2). P. 3-44. (in Russian)

Sergievskii L.I. *Sodruzhestvennoe kosoglazie i geteroforii. (Profilaktika, diagnostika, lechenie bez operatsii)* [Sodruzhnoe strabismus and heterophoria. (Prevention, diagnosis, treatment without surgery)]. M.: Medgiz, 1951. 243 p. (in Russian).

State clinical recommendations. Diagnostika i lechenie sodruzhestvennogo kosoglaziya [Diagnosis and treatment of concomitant strabismus]. *Rossiiskaya Pediatricheskaya Oftal'mologiya* [Russian Pediatric Ophthalmology]. 2015. (2). P. 56-63. (in Russian).

Kh'yubel D. *Glaz, mozg, zrenie* [Eye, Brain, Vision]. Per. s angl. M.: Mir, 1990. 239 p. (in Russian)

Chernyshova S.G., Samedova D.Kh. Struktura i prichiny neudovletvoritel'nykh rezul'tatov khirurgicheskogo lecheniya sodruzhestvennogo kosoglaziya [Structure and

causes of unsatisfactory results of surgical treatment of concomitant strabismus]. *Oftal'mologiya*. 2012. V. 3 (10). P.158-164. (in Russian)

Gifford S.R. Some notes on the treatment of strabismus. *Br J Ophthalmol*. 1935. V. 19. P. 148-151.

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. 1077–1083.

Kulp M.T., Cotter S.A., Connor A.J., Clarke M.P. Should amblyopia be treated? *Ophthalmic Physiol Opt*. 2014. V. 34(2). P. 226. https://doi.org/10.1111/opo.12124

Levi D. Visual processing in amblyopia: Human studies. *Strabismus*. 2006. V. 14(1). P. 11–19. https://doi.org/10.1080/09273970500536243

Levi D.M., Li R.W. Perceptual learning as a potential treatment of amblyopia: a mini-review. *Vision Res*. 2009; V. 49(21). P. 2535-2549. https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.02.010

Levi D.M., Knill D.C., Bavelier D. Stereopsis and amblyopia: A mini-review. *Vision Research*. 2015. V. 114(January). P. 17–30. https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.002

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.

Loudon S.E, Simonsz H.J. The history of the treatment of amblyopia. *Strabismus*. 2005. V. 13. P. 93-106. https://doi.org/10.1080/09273970590949818

Newsham D. Parental non-concordance with occlusion therapy. *Br. J. Ophthalmol*. 2000. V. 84(9). P. 957-962.

Pineles S.L., Aakalu V.K., Hutchinson A.K., Galvin J.A., Heidary G., Binenbaum G., VanderVeen D.K., Lambert S.R. Binocular treatment of amblyopia: a report by the American Academy of Ophthalmology. Ophthalmology. 2020. V. 127(2). P. 261-272. https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2019.08.024

Qiu F., Wang L., Liu Y., Yu L. Interactive binocular amblyopia treatment system with full-field vision based on virtual reality // IEEE. 2007. 1257–1260.

Tailor V., Bossi M., Greenwood J.A., Dahlmann-Noor A. Childhood amblyopia: current managemtnt and new trends. *British Medical Bulletin*. 2016. V. 119. P. 75-86. https://doi.org/10.1093/bmb/ldw030.

Wolfe J.M., Owens D.A. Evidence for separable binocular processes differentially affected by artificial anisometropia. *Amer. J. Optometry and Physiol. Opt*. 1979. V. 56. P. 279-284.

Wolfe J.M., Held R. Binocular adaptation that cannot be measured monocularly. *Perception*. 1982. V. 11. P. 289-295.

Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol. Rev*. 1986. V. 93(3). P. 262-282.