

УДК 612.843.721+612.846.8+617.751.6

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ БИНОКУЛЯРНОГО ЛЕЧЕНИЯ КОСОГЛАЗИЯ И АМБЛИОПИИ

© 2025 Г. И. Рожкова^{1, *}, Т. А. Подугольников¹, М. А. Грачева¹, Н. Н. Васильева¹,
А. В. Белокопытов¹, Н. Е. Кононова², И. Е. Хаценко³

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

²Центр диагностики и хирургии глаза. Лаборатория зрения, Санкт-Петербург, Россия

³ДГБУ “Морозовская детская клиническая больница”, Москва, Россия

*E-mail: gir@iitp.ru

Поступила в редакцию 15.12.2024 г.

После доработки 18.02.2025 г.

Принята к публикации 25.02.2025 г.

Компьютерные методы начали активно внедряться в практику лечения косоглазия и амблиопии с 1990-х гг. В отечественной офтальмологии сразу возникло несколько независимых групп специалистов, создающих интерактивные компьютерные программы (ИКП) для диагностики и лечения указанных расстройств бинокулярного зрения. Это привело к появлению достаточно большого выбора ИКП и аппаратно-программных комплексов, различающихся по назначению, технологии сепарации левого и правого изображений и дизайну. Основными факторами, определяющими потенциал развития компьютерных методов, были и остаются успехи фундаментальных исследований зрительной системы, результаты использования уже созданных ИКП в практической работе и технические нововведения. Однако реализации этого потенциала мешает ряд маркетинговых и социальных факторов, затрудняющих обмен опытом между разными группами специалистов, разрабатывающих и применяющих ИКП, а также отсутствие теоретического обсуждения общей методологии, способов оптимизации и режимов использования различных ИКП. В связи с появлением принципиально новых данных, касающихся патогенеза и лечения амблиопии и возможности успешной активации давно заблокированных (“спящих”) механизмов бинокулярного стереопсиса у взрослых пациентов, остро ощущается необходимость пересмотра сложившейся ситуации. Мнения относительно эффективности компьютерных методов бинокулярной терапии (МБТ) противоречивы: одни исследователи дают очень высокие оценки, другие практически не видят от МБТ специфической пользы по сравнению с традиционными методами. В данной статье обозначен ряд причин, объясняющих отсутствие консенсуса: расплывчатость критериев принадлежности методов к “классу МБТ”, различия технических вариантов реализации МБТ, специфика зрительных стимулов и условий применения МБТ, различия групп пациентов и форм работы с ними (таких как обучение, инструктирование, помощь, поощрение, привлечение к выбору рабочего материала и др.). Обсуждаются требования к адекватному проведению экспертизы и сравнительной оценки результативности различных методов лечения расстройств бинокулярного зрения.

Ключевые слова: бинокулярное зрение, амблиопия, косоглазие, функциональное лечение, методы бинокулярной терапии, диоптрические тренировки

DOI: 10.31857/S0235009225020011

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИСТОРИИ ЛЕЧЕНИЯ АМБЛИОПИИ И КОСОГЛАЗИЯ

Базовая информация

Амблиопия и косоглазие — самые распространенные нарушения бинокулярного зрения у детей. Амблиопию выявляют по сниженной остроте зрения одного или обоих глаз, которую не удастся повысить путем обычной оптической коррекции при помощи очков или контактных линз, поскольку это нарушение определяется главным образом

недостаточным развитием или функциональными расстройствами центральных механизмов зрительного восприятия. Косоглазие выражается в отклонении зрительной оси глаза (или обоих глаз) от правильного направления взгляда на объект внимания. Оба эти нарушения препятствуют развитию механизмов полноценного бинокулярного восприятия на основе совместного анализа информации, поступающей в мозг от одного и того же объекта через два глаза, смотрящих на этот объект с разных направлений.

Функциональные методы лечения амблиопии и косоглазия используются уже много столетий. Есть письменные свидетельства того, что в Греции они применялись уже в VII в. н.э., но их научная история начинается лишь с середины XVIII в., после того, как развернулись дискуссии по поводу применения метода прямой окклюзии — закрывания лучшего глаза повязкой — для лечения односторонней амблиопии. Одним из активных участников этой дискуссии был Бюффон (George Comte de Buffon), который в своей диссертации о причинах косоглазия (1743 г.) рассматривал возможность улучшения зрения амблиопичного глаза благодаря использованию окклюзии лучше видящего глаза.

Лечение односторонней амблиопии закрыванием лучшего глаза заслонкой (окклюдером) основано на увеличении зрительной нагрузки на амблиопичный глаз и его усиленной тренировке. Даже этот, казалось бы, простой метод стал широко распространенным лишь к концу XIX в. (см. Хватова и др., 2005). На самом деле, с самого начала не было и до сих пор не сложилось единого мнения относительно целесообразности его применения (см. Loudon, Simonsz, 2005; Wade, 2008; Pineles et al., 2020). Отчасти это связано с физическим и психологическим дискомфортом, испытываемым пациентами, отчасти — с гетерогенностью причин амблиопии и особенностями онтогенеза зрительной системы, определяющими вариабельность результатов лечения. Со временем, по мере совершенствования методов диагностики и анализа бинокулярных расстройств, выявляется все больше факторов, влияющих на успешность лечения и свидетельствующих о необходимости индивидуального выбора методов терапии для каждого случая.

Основные виды амблиопии и косоглазия

Основными причинами амблиопии и косоглазия являются аномалии строения и развития зрительной и глазодвигательной систем, нарушения в работе мозговых механизмов, участвующих в обеспечении нормального процесса бинокулярного зрения, а также продолжительная зрительная депривация, т.е. отсутствие у человека возможности полноценно использовать один глаз (или оба глаза) из-за травмы, заболевания либо драматических обстоятельств. В зависимости от патогенеза и особенностей проявления различают несколько основных видов амблиопии и косоглазия (Куман, 1984; Алексеенко, Шкорбатова, 2015; Ефимова, 2011; Лебедева и др., 2018; Кононова, Сомов, 2020; Кононова и др., 2023; Хаценко и др., 2023а; Горев и др., 2024; Hess et al., 2009; Levi, 2006; 2020).

Наиболее распространенными видами амблиопии являются рефракционная, дисбинокулярная (страбизмическая), обскурационная и депривационная, каждая из которых имеет много вариантов. Рефракционная амблиопия развивается из-за недостатков оптического аппарата глаза, она возникает при аномалиях рефракции глаз (астигматизме, миопии, гиперметропии, анизометропии), если длительное время не использовать коррекционную оптику для достижения удовлетворительной четкости обоих сетчаточных изображений. Дисбинокулярная амблиопия обусловлена расстройствами бинокулярного зрения — нарушениями согласованной работы двух глаз при формировании единого бинокулярного образа, что может быть связано как с дефектами глаз и глазодвигательной системы, так и с аномалиями функционирования центральных механизмов бинокулярного восприятия. Обскурационная амблиопия развивается из-за длительного наличия препятствий (бельмо, катаракта, помутнения в стекловидном теле, птоз и т.п.), мешающих прохождению света от внешних объектов до фоторецепторов сетчатки на глазном дне. Депривационная амблиопия может возникнуть по причине долгого пребывания нормальных глаз в нерабочем состоянии, например, вследствие временного полного или частичного “выключения” глаза из-за травмы либо ограничения зрительного опыта при существовании человека в обедненной зрительной среде. Амблиопия может быть односторонней и двусторонней, причем выраженной на левом и правом глазу в одинаковой или разной степени (т.е. симметричной и асимметричной). По величине сниженной остроты зрения различают амблиопию высокой, средней и слабой степени. Разные офтальмологические школы обозначают степень амблиопии по несколько различающимся интервалам в общем диапазоне сниженной остроты зрения с коррекцией (от 0.05 до 0.8 в десятичной шкале). Следует отметить, что оценки степени амблиопии, приводимые во многих публикациях, сомнительны, так как основаны на неточных измерениях остроты зрения. К примеру, нередко исследователи ограничивают измерения скрининговым условным значением нормы в 1.0 дес. ед., тогда как у многих школьников острота зрения значительно выше, приближается к 2.0 дес. ед. и даже превосходит это значение (см. Базарный, 1991; Рожкова и др., 2001; Рожкова, Матвеев, 2007; Vaschenko, Rozhkova, 1998; Rozhkova et al., 2005), так что случаи, когда острота зрения одного глаза равна 1.0 дес. ед., а второго — 2.0 дес. ед. также могут свидетельствовать об амблиопии.

Что касается видов косоглазия, то их обычно характеризуют по внешним проявлениям мышечного

дисбаланса (отклонению глаза от правильного направления взгляда на рассматриваемый объект) и по особенностям движений глаз. Косоглазие бывает содружественным и паралитическим, односторонним и двусторонним, горизонтальным и вертикальным, неизменным и альтернирующим (косит то левый, то правый глаз, а зрительная ось второго глаза при этом направлена точно на рассматриваемый объект), постоянным, периодическим или возникающим эпизодически (например, при утомлении или в стрессовой ситуации) и др. Помимо истинного косоглазия, существуют еще мнимое косоглазие и скрытое косоглазие (гетерофория), наличие которых характеризуется определенными внешними проявлениями косоглазости, но не функциональными расстройствами бинокулярного зрения. В естественных условиях эти особые виды косоглазия не отражаются на полноценном функционировании системы бинокулярного восприятия, т.е. на объединении информации от двух глаз и формировании единого бинокулярного видимого образа. Объяснение этой особенности состоит в том, что в естественных условиях зрения при истинном косоглазии имеет место отклонение зрительной оси одного или обоих глаз от направления на рассматриваемую точку, тогда как при мнимом и скрытом косоглазии этого нет. Но причины мнимого и скрытого косоглазия совершенно различны.

При мнимом косоглазии впечатление неверного направления взгляда на объект внимания (точку фиксации взора) создается за счет индивидуальной анатомической особенности глаз — необычно большого смещения центральной ямки сетчатки (фовеа), являющейся областью наилучшего видения, от геометрического центра задней поверхности глазного яблока (заднего полюса). Эта особенность приводит к заметному несовпадению *зрительной оси* (линии, направленной от фовеа к рассматриваемой точке) и *геометрической (оптической) оси* — оси симметрии глаза, проходящей через задний полюс глазного яблока и центр роговицы, и кажущемуся косоглазию. Поскольку о направлении взора судят по ориентации геометрических осей глаз, создается ложное впечатление, что при нормальной бифовеальной фиксации рассматриваемого объекта, т.е. когда обе зрительные оси направлены точно на объект внимания, глазные яблоки повернуты так, будто человек смотрит не на этот объект, а ближе или дальше (рис. 1).

На рис. 1 показаны два основных вида мнимого косоглазия — расходящееся (а) и сходящееся (б). Более часто встречающееся расходящееся

мнимое косоглазие связано со смещением фовеа от заднего полюса к виску, а сходящееся — к носу. В отечественной литературе угол между геометрической и зрительной осями называют углом гамма и считают отрицательным/положительным при

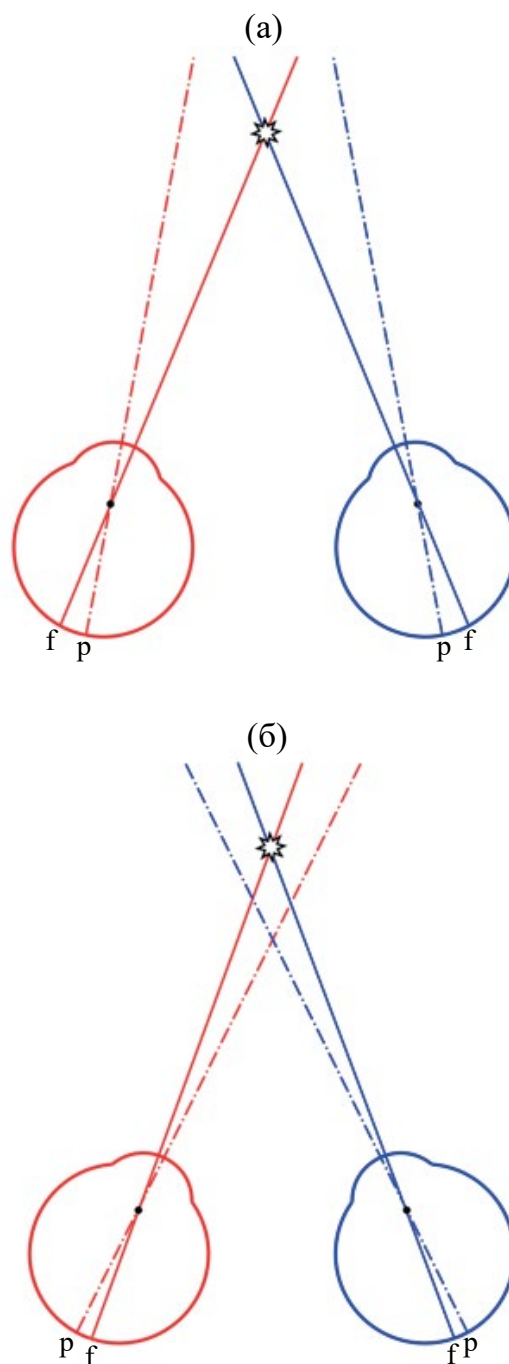


Рис. 1. Схемы ориентации зрительных и оптических осей глаз при расходящемся (а) и сходящемся (б) мнимом косоглазии. f — фовеа; p — задний полюс глаза; звездочка — объект внимания (точка бификсации). Зрительные и геометрические оси изображены сплошными и штрихпунктирными линиями соответственно.

смещении фовеа к носу/виску. По данным литературы, угол гамма большей частью находится в диапазоне от -3° до $+8^\circ$, но в отдельных случаях расходящегося мнимого косоглазия превышает $+10^\circ$ (Пильман, 1964; Кузнецов, 2009; Рожкова, Грачева, 2014; Agarwal, 2002; Bennett, Rabbets, 1998). В популярной литературе для угла гамма обычно приводят значение $+5^\circ$, считающееся наиболее распространенным. Наличие угла гамма не

мешает осуществлению бинокулярных функций и работе механизмов моторной и сенсорной фузии, так как соответствующие процессы определяются ориентацией не оптических, а зрительных осей, а они при мнимом косоглазии направляются точно на рассматриваемый объект, как и в норме.

Скрытое косоглазие (гетерофория) имеет окуломоторную природу: оно связано с нарушением баланса глазодвигательных мышц, определяющим позиции глаз в покое и не проявляющимся в обычных условиях зрения. Этот дисбаланс приводит к аномальным позициям глаз только тогда, когда объект для бификсации отсутствует (например, в темноте или в дихоптических условиях при искусственном “разобщении глаз” – независимом предъявлении левому и правому глазу разных объектов). В обычных условиях зрения мышечный дисбаланс компенсируют сенсорные механизмы восприятия, контролирующие позиции глаз по изображениям объекта бификсации на двух сетчатках. Благодаря сенсорному контролю, гетерофория не мешает ни фузии, ни осуществлению бинокулярных функций. Но, в отличие от мнимого косоглазия, скрытое косоглазие может оказывать негативное влияние на процесс бинокулярного зрения из-за необходимости постоянной компенсации мышечного дисбаланса, поэтому в некоторых случаях гетерофорию целесообразно лечить.

В качестве примера на рис. 2 приведена иллюстрация компьютерного метода обнаружения и оценки гетерофории, который равно пригоден и для оценки истинного косоглазия. Соответствующая ИКП реализует дихоптические условия наблюдения на основе цветовой сепарации левого и правого изображений. В данном конкретном примере один глаз видит через разделительные очки только красные объекты, другой – только синие. На экране дисплея пациенту предъявляют два изображения, например, красный домик и синюю раму для окна (а). Задача пациента: вставить раму точно в оконный проем, перемещая ее при помощи мыши. Человек без гетерофории легко решит задачу правильно (б). Однако пациент с гетерофорией установит раму неверно, в соответствии с имеющимся у него дисбалансом глазодвигательных мышц (в). При этом у пациента будет иллюзия, что он поставил раму точно в проем, и он очень удивится, что это не так, когда снимет разделительные очки. Людям без гетерофории разделительные очки не мешают решать задачи на совмещение столь же точно, как и без них. Ошибки совмещения по горизонтали и вертикали измеряют в угловых градусах и используют в качестве оценок

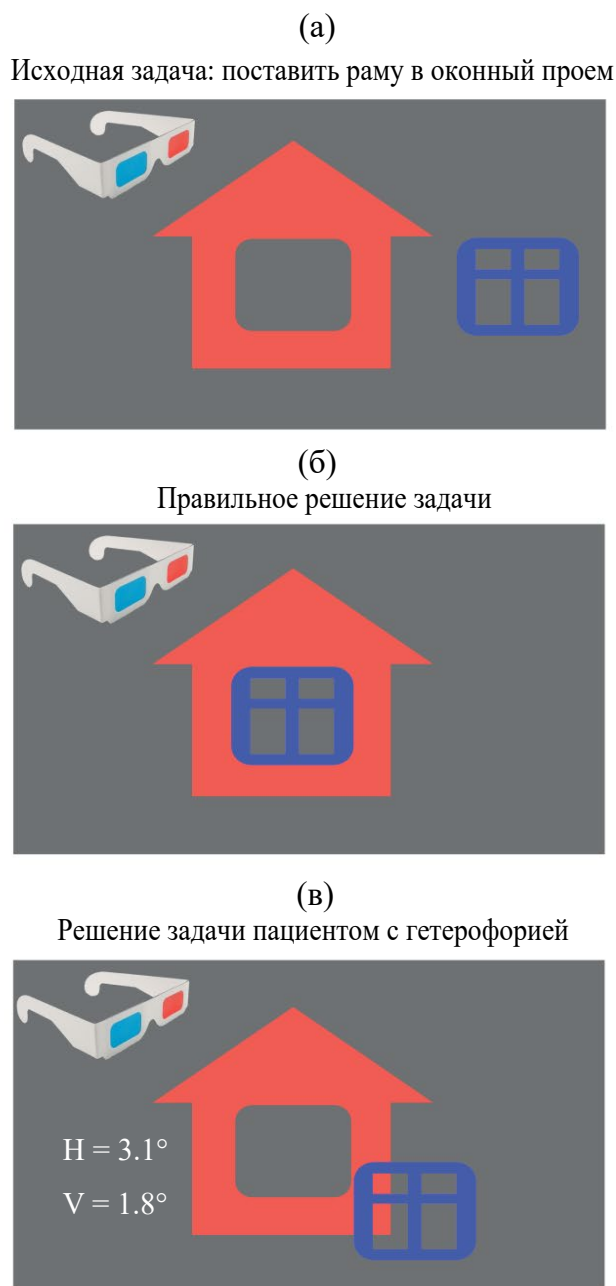


Рис. 2. Иллюстрация обнаружения и оценки гетерофории (скрытого косоглазия) с использованием ИКП (объяснение процедуры в тексте). Н – ошибка совмещения по горизонтали, V – ошибка совмещения по вертикали.

гетерофории. ИКП автоматически выводит эти оценки на экран по щелчку мыши после завершения процедуры и сохраняет их для последующего анализа. Отметим, что данный тест позволяет выявить и количественно оценить гетерофорию, но не позволяет отличить ее от истинного косоглазия. Для этого нужно использовать дополнительный тест с неполным разобщением левого и правого каналов поступления информации, т.е. с наличием в тестовых изображениях объектов, общих для двух глаз.

Функциональное лечение амблиопии и косоглазия

Функциональное (консервативное¹) лечение — это комплекс методов (применение коррекционной оптики, упражнения, тренировки, неинвазивные воздействия), направленных на восстановление либо улучшение функций органа или системы без применения хирургического вмешательства или медикаментозной терапии.

Широко распространенные в настоящее время методы функционального лечения амблиопии и косоглазия можно условно подразделить на оптические, приборные и компьютерные. В современной медицинской практике первым этапом в лечении косоглазия часто является хирургическая операция, однако, заметим, что с середины XX в. большинство специалистов разделяют убеждение, что решение о необходимости операции в любом случае должно приниматься только по результатам первоначального этапа функционального лечения и что после операции также обязательны функциональные тренировки даже при кажущемся полном успехе хирургического вмешательства непосредственно по окончании операции (Сергиевский, 1951; Пильман, 1964, 1979; Asper, 2018). К сожалению, в современной практике хирургии косоглазия послеоперационные осложнения и повторные операции — далеко не редкость (см. Гончарова и др., 2010; Чернышева, Самедова, 2012; Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”, 2015; Leffler et al., 2016; Repka et al., 2018), несмотря на имеющиеся данные, что адекватная и корректно проведенная функциональная терапия может значительно сократить число таких негативных исходов (Taylor et al., 2016). Судя по публикациям, сейчас уже для большинства аналитиков и клиницистов стало очевидным, что функциональная терапия должна проводиться и до, и после операции.

¹ Для функционального лечения бинокулярных расстройств употребление термина “консервативное” нам представляется нежелательным из-за его второго смысла.

Авторы всех методов функционального лечения бинокулярных расстройств исходят из одного и того же очевидного и общепринятого положения, что успешное функционирование бинокулярных механизмов возможно только при нормальном симметричном развитии обоих глаз и глазодвигательных механизмов, обеспечивающем “равноправие” двух каналов зрительного восприятия и полноценный совместный анализ информации, поступающей от обоих глаз в мозг, в процессе формирования единого бинокулярного видимого образа.

Для достижения равноправия двух глаз предложены и применяются на практике процедуры, нацеленные на повышение сниженной остроты зрения амблиопичных глаз, ликвидацию так называемой функциональной скотомы подавления (проявляющейся при бинокулярном наблюдении в существовании “запретной” области вокруг точки фиксации, куда мозг “позволяет” смотреть только ведущему глазу), и затем — на развитие механизмов устойчивой бификсации, фузии и бинокулярного стереозрения.

Традиционные методы функционального лечения амблиопии

В основе традиционных методов лечения расстройств бинокулярного восприятия лежит представляющаяся очевидной и логичной идея начинать лечение с улучшения монокулярного зрения амблиопичного (худшего) глаза. На первый взгляд, самым простым способом достижения этого в случаях односторонней амблиопии кажется использование прямой окклюзии — закрывание лучшего глаза повязкой или заслонкой на несколько часов в день на протяжении нескольких недель или месяцев: таким способом добиваются вынужденного вовлечения амблиопичного глаза в зрительную работу. Сейчас вместо слова “окклюзия” все чаще употребляют слово “пэтчинг” — транслитерацию английского термина “patching” (производного от “patch” — повязка на глазу). Выключение лучшего глаза из процесса наблюдения окружающей обстановки и повседневной зрительной работы означает увеличение нагрузки на худший глаз и его усиленную тренировку, приводящую (при адекватном режиме) к улучшению его остроты зрения и других показателей качества зрительного восприятия. В большинстве случаев, благодаря устранению конкуренции со стороны лучшего глаза, происходит перенастройка центральных зрительных механизмов в пользу большего внимания к информации, поступающей в мозг от амблиопичного глаза. Кратко, но не вполне корректно, говорят, что при

окклюзии лучшего глаза снимается подавление амблиопичного глаза со стороны лучшего глаза. В случае двусторонней амблиопии попеременная окклюзия левого и правого глаза также дает положительный эффект благодаря увеличению нагрузки на смотрящий глаз в период отключения парного глаза. Вполне вероятно, что при этом может положительно сказываться и устранение бинокулярной конкуренции. Однако на практике реальное применение окклюзии в классическом виде осложняют разные обстоятельства: испытываемые пациентами физические неудобства, стресс от ухудшения привычного удовлетворительного качества видимости окружения из-за отключения лучшего глаза, психологический и социальный дискомфорт от ощущения своей неполноценности, насмешки сверстников. Эти недостатки окклюзии нередко заставляют родителей отказаться от такого лечения. Аргументы за и против окклюзии обсуждаются специалистами буквально со времени внедрения этого метода и до последних лет (Gifford, 1935; Newsham, 2000; Loudon, Simonsz, 2005; Levi, Li, 2009; Kulp et al., 2014; Pineles et al., 2020).

Кроме окклюзии с той же целью также применяют менее жесткую процедуру неполного исключения одного глаза из акта зрения, называемую пенализацией, которая подразумевает искусственное ухудшение зрения глаза путем оптической или фармакологической расфокусировки сетчаточных изображений. Во втором случае обычно используют закапывание 1%-атропина, в связи с чем эту реализацию процедуры исходно называли атропинизацией, а позже — атропиновой пенализацией. Врачи считают, что эта процедура не доставляет неприятностей ребенку, однако многие пациенты не разделяют это мнение. В литературе можно найти ряд работ по оценке эффективности окклюзии и атропиновой пенализации как самих по себе, так и в сравнении с другими методами лечения амблиопии (Pediatric Eye Disease Investigator Group, 2002; 2003; 2008абв; 2009; Scheiman et al., 2008; Repka, 2009; Webber, Wood, 2005; Noah et al., 2014; Kelly et al., 2016).

Долгое время основными методами лечения амблиопии были разные режимы окклюзии и пенализации лучшего глаза, назначаемые после попытки повысить остроту зрения амблиопичного глаза чисто оптическими средствами подбора очков или контактных линз, оптимально улучшающих сетчаточные изображения, и их использования в течение достаточно длительного времени (обязательный оптический этап лечения). Со временем к этому добавились общие засветы заднего полюса сетчатки амблиопичного глаза с целью его общей

активации, а также локальные и структурированные засветы для активации определенных механизмов (Аветисов и др., 2005; Хватова и др., 2005; Campbell et al., 1978). Классические реализации процедур окклюзии, пенализации и засветов были детализированы и адаптированы для различных категорий пациентов и разных условий лечения.

Задачи абилитации либо восстановления и развития механизмов бификсации и фузии обычно решались на втором этапе — после приближения качества зрения худшего глаза к уровню лучшего. Конечной целью этого этапа было получение следующих результатов: (1) ликвидация функциональной скотомы, (2) развитие моторных механизмов фузии (совмещения, бификсации), (3) развитие сенсорных механизмов фузии (геометрического слияния левых и правых образов-полуфабрикатов и появления единых трехмерных видимых образов) и (4) развитие когнитивных механизмов фузии (объединение иллюзорных контуров, интерполяция и экстраполяция, логические операции). Для достижения этой цели были придуманы различные упражнения, дающие возможность активировать и развивать генетически предназначенные для бинокулярного зрения нейронные сети, потенциально способные нормально участвовать в процессах бинокулярной фиксации и фузии и в разной степени готовые к выполнению этого предназначения, но не функционировавшие ранее из-за амблиопии и/или по другим причинам.

Традиционные методы функционального лечения косоглазия

В большинстве курсов функционального лечения косоглазия после устранения амблиопии предусматриваются 2 этапа тренировок: “диплоптика” и “ортоптика” (Хватова и др., 2005; Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”, 2015; Кононова и др., 2023). Первый этап включает упражнения для постепенного перехода от преимущественно монокулярного восприятия бывшим лучшим или доминирующим глазом к так называемому “одновременному” зрению с участием обоих глаз, но работающих почти автономно. Цель второго этапа — развитие различных моторных и сенсорных механизмов совместного функционирования двух глаз и совместного анализа информации, поступающей от обоих глаз в мозг, продуктивное использование сходств и различий левого и правого изображений при формировании видимых образов и, наконец, — обретение полноценного бинокулярного восприятия.

С середины XX в. придуманные для этой цели упражнения выполнялись большей частью на синоптофоре — достаточно универсальном оптико-механическом аппарате, имеющем 2 подвижных оптических канала для независимого предъявления левому и правому глазу различающихся и регулируемых изображений в разных участках поля зрения. В список процедур, реализуемых на синоптофоре, входили: перемещения тест-объектов (во всем поле зрения по горизонтали и в достаточном диапазоне по вертикали, а также торзионно), небольшие колебания тест-объектов и их мелькания с варьируемой частотой. Следует, однако, заметить, что при работе на синоптофорах, особенно на первых простых аппаратах, сеансы тренировки были весьма утомительными как для пациентов, так и для медперсонала, поскольку включали много ручных операций: настройку аппарата с учетом параметров зрительной системы пациента, смену слайдов с тестовыми и “лечебными” изображениями в оптических каналах, точную установку оптических каналов по шкалам и их повороты для изменения направления на рассматриваемые объекты, медленное сближение-разведение осей оптических каналов при выполнении упражнений на слияние и др. Кроме того, при необходимости регистрации условий проведения процедуры и промежуточных результатов нужно было постоянно отвлекаться на написание подробного протокола сеанса лечения. Не удивительно, что многие специалисты по лечению амблиопии и косоглазия мечтали об автоматизации утомительных и однообразных вспомогательных действий и об автоматическом сохранении полученных результатов в наглядной и удобной для анализа форме. Накапливались и другие потребности в совершенствовании методов лечения бинокулярных расстройств, в частности, связанные с желанием использовать последние открытия в области фундаментальной науки о зрении для ответа на многие назревшие вопросы диагностики и лечения нарушений бинокулярного восприятия. Это оказалось возможным благодаря совершенствованию компьютерной техники и развитию методов компьютерной графики.

Существуют ли возрастные ограничения для функционального лечения?

Согласно до сих пор действующим медицинским рекомендациям, процедуры для развития и восстановления нарушенных бинокулярных функций имеет смысл проводить только до возраста завершения сенситивного периода развития бинокулярной зрительной системы, так как после достижения этого возраста функциональное

лечение не даст эффекта. Однако, вопреки сложившимся ранее представлениям, появляется все больше свидетельств того, что у части взрослых пациентов, обратившихся по поводу расстройств бинокулярного зрения к врачу даже в пожилом возрасте, лечение бывает успешным, так как мозг сохраняет определенную пластичность, и к тому же соответствующие мозговые механизмы могут быть не нарушенными, а “спящими” или “заблокированными” на многие годы (Mallah et al., 2000; Atkinson, 2000; Astle et al., 2011; Barry, 2009; Cleary et al., 2009; 2012; Li et al., 2013; Noah et al., 2014; Andalib et al., 2015; Bridgeman, Barry, 2015; Vedamurthy et al., 2015; Wang et al., 2022). Одним из наиболее ярких и хорошо документированных примеров такой ситуации является случай Сьюзен Барри (Barry, 2009; Bridgeman, Barry, 2015; Barry, Bridgeman, 2017), у которой было врожденное сходящееся альтернирующее косоглазие и которая лишь в пятидесятилетнем возрасте обрела “восхитительное” (по ее выражению), качественно новое пространственное зрение — стереоскопическое. В анамнезе у Барри было не вполне удачное хирургическое вмешательство в детстве (3 операции на глазных мышцах в возрастном интервале от двух до семи лет) и длительный период (25 лет) жизни с монокулярным характером зрения. Но она продолжала попытки лечения и, наконец, добилась исполнения своей мечты. Благодаря врачу, который призмами скомпенсировал у Барри остаточное вертикальное косоглазие в 3°, она в возрасте 50 лет почувствовала, что это значит — иметь настоящее бинокулярное ощущение пространства за счет функционирующих механизмов стереоскопического зрения.

К сожалению, большая часть свидетельств о возможности лечения амблиопии и обретении стереоскопического зрения у взрослых пациентов (вплоть до 70-летнего возраста) опубликована в газетных статьях и популярных изданиях, однако их подкрепление немногими, но проверенными научными данными не оставляет сомнений в перспективности такого лечения.

Есть данные и о возможности функционального лечения бинокулярных расстройств у детей младшего возраста. Учитывая имеющиеся публикации по выявлению и количественной оценке стереоскопического восприятия у 1–3-месячных младенцев (Braddick et al, 1980; Birch et al., 1982; Braddick, Atkinson, 1983; Atkinson, 2000), можно предположить, что для функционального лечения расстройств бинокулярного восприятия практически нет возрастных ограничений.

НАЧАЛЬНЫЙ ЭТАП РАЗВИТИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ЛЕЧЕНИЯ АМБЛИОПИИ И КОСОГЛАЗИЯ

Первые ИКП для клиники: внедрение идеи Фурье-анализа

Первые попытки использовать компьютерные технологии для внедрения в офтальмологическую практику научных достижений из области психофизиологии зрения были сделаны за рубежом на основе идеи применения пространственно-частотного анализа Фурье к зрению человека. Эта идея, впервые высказанная Кемпбеллом и Робсоном (Campbell, Robson, 1968), доминировала в нейрофизиологических, психофизических и теоретических исследованиях механизмов функционирования зрительной системы на протяжении нескольких десятилетий. Одной из пионерских клинических работ в этой области было экспериментальное исследование Кемпбелла с соавторами (Campbell et al., 1978), в котором проверялась эффективность замены традиционных засветов сетчатки при лечении амблиопии структурированными засветами, учитывающими настройку зрительных нейронов определенных зон коры мозга на разные пространственные частоты световых стимулов из общего диапазона оптической передающей функции человеческого глаза.

В отечественной физиологии и офтальмологии эту идею наиболее активно развивали в лаборатории зрения Института физиологии им. И.П. Павлова АН СССР и в Военно-медицинской академии в Санкт-Петербурге, а также в Московском НИИ глазных болезней им. Гельмгольца (совместно с ООО “Астроинформ СПЕ”). Теоретические и практические достижения этих коллективов отражены в монографиях, обзорах и многочисленных оригинальных статьях, из которых в наш список литературы мы включили лишь некоторые работы обобщающего и принципиального характера (Глезер, 1978; 1985; 2000; Шелепин и др., 1985; Волков, 1986; 1993; Белозеров, 1999, 2002; 2005).

Естественно, что сначала в совместных работах научных сотрудников и клиницистов преобладали диагностические исследования, результаты которых предполагалось затем использовать для развития лечебных методов. Примером могут служить работы по компьютеризации отдельных диагностических процедур, которые проводились в Санкт-Петербурге совместными усилиями сотрудников Педиатрической и Военно-медицинской академий (Волков и др., 1987; Сомов, 1989).

В дальнейшем в Москве, благодаря объединению усилий нескольких медицинских научных и лечебных учреждений (Московский НИИ глазных болезней им. Гельмгольца, ООО “Астроинформ СПЕ”, Российская медицинская академия последилового образования, Тушинская детская городская больница, Детский глазной санаторий Морозовской детской городской клинической больницы), была разработана, апробирована и внедрена расширенная серия диагностических ИКП, а также серия игровых лечебных ИКП, предназначенных для адресного воздействия на различные каналы зрительной системы, которые проявляют избирательность по отношению к временной и пространственной частоте стимуляции, яркостному и цветовому контрасту, а также к движению (программы “Тир”, “Погоня”, “Крестики”, “Паучок” и др.). Эти программы используются в лечебной практике до сих пор, как по отдельности, так и в составе комплекса “Окулист”. Десять лет назад вышеупомянутые диагностические и лечебные ИКП были включены в Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия” (2015).

Первоначальные направления развития ИКП в России

На рубеже веков работы по созданию ИКП для диагностики и лечения амблиопии и косоглазия в нашей стране развивались более активно, чем за рубежом. По-видимому, это связано с тем, что именно на данное время пришелся период быстрого развития, распространения и внедрения компьютерной техники в России, у которой по части этой техники ранее было заметное отставание, порождающее желание устранить его и использовать открывающиеся возможности в медицинских, научных, образовательных и других целях. Поскольку, за редкими исключениями, исследования и разработки проводились без общей координации планов и согласования целей, небольшими коллективами в специализированных учреждениях, имеющих разный опыт работы и разные возможности, спектр задач, решаемых разными коллективами разработчиков, оказался весьма широким. Отметим наиболее продуктивные типы разработок и далее охарактеризуем их особенности.

— *Игровые ИКП, аналогичные стандартным компьютерным играм, но нацеленные на решение задач компьютерной диагностики и терапии бинокулярных зрительных расстройств.*

— *Игровые ИКП с дихоптикой, предусматривающие терапию в условиях наблюдения обоими*

глазами при возможности независимого изменения тестового материала в левом и правом зрительном канале для регулирования перцептивного баланса по разным параметрам.

– *Аппаратно-программные комплексы с биологической обратной связью (БОС).*

– *Интегрированные программные комплексы.*

– *Компьютерные имитации традиционных процедур функционального лечения, проводимых на синоптофоре и аналогичных приборах.*

Игровые ИКП, аналогичные стандартным компьютерным играм, тестам и квестам, разрабатывались как на основе схем, сложившихся в игровой индустрии, так и с использованием специфических проб, испытаний, упражнений, применяемых в клинической практике. Поскольку сейчас даже дошкольники владеют навыками использования компьютерных игр, такие ИКП не требуют общих комментариев.

Игровые ИКП с дихоптикой, т.е. с генерацией отдельных изображений для левого и правого глаза, предусматривали использование технологий создания стереоизображений на основе методов сепарации, применяемых в стереокино и других областях стереотехники.

Специально отметим, что в отечественной практике игровые ИКП для лечения амблиопии и косоглазия с самого начала (с середины 1990-х годов) создавались не только для условий монокулярного наблюдения, но и для дихоптических условий зрительного восприятия с использованием преимущественно цветового или временного методов сепарации левого и правого изображений. В первом случае одному глазу предъявляли красные изображения, другому – сине-зеленые, во втором случае использовали поочередное предъявление изображений левому и правому глазу с высокой частотой. При цветовой сепарации пациенты выполняли задания в красно-синих очках, при временной сепарации – в активных очках (*shutter glasses*), которые пропускали и блокировали соответствующие изображения синхронно с их предъявлением.

Компьютерные игры и игровые упражнения для дихоптических условий наблюдения, создаваемые на рубеже веков параллельно разными коллективами, быстро вошли в отечественную лечебную практику. Среди них немало таких, которые

успешно используются до сих пор. Но многие интересные разработки, к сожалению, не получили продолжения по организационным причинам. Развернутых публикаций по результативности различных отечественных игровых ИКП почти нет, главным образом потому, что их практическая польза в работе с пациентами (в разных отношениях: прогресс лечения, отсутствие дискомфорта, привлекательность и разнообразие содержания и др.) не вызвала сомнений у медицинского персонала. Информация о таких ИКП содержится преимущественно в отчетах, докладах на конференциях, методических рекомендациях и в интернете (например, Татаринов и др., 1996; Белозеров и др., 1997; Авученкова и др., 1999).

Аппаратно-программные комплексы с применением БОС называют также комплексами, использующими методы когнитивной модуляции остроты зрения (Тимошенко, Штилерман, 2014; Туманова, Медведев, 2001). Самым известным из них является комплекс “Амблиокор”, идея которого была описана в 1993 г. (Туманян и др., 1993) и запатентована в 1996 г. (Туманян, Кечек, 1996). Первая версия прибора “Амблиокор-01” (созданная в ООО “Научно-Производственный Центр ИНВИТРО”) была выпущена в 1997 г. В этом комплексе воплощена идея стимуляции эффективной работы амблиопичного глаза во время просмотра специальных фильмов, которая основана на регистрации электроэнцефалограммы (ЭЭГ) пациента и использовании в цепи БОС определенных показателей ЭЭГ, отражающих снижение и повышение внимания к предъявляемому материалу. Изменения этих показателей ЭЭГ служат сигналами, регулирующими работу системы демонстрации фильма в целях стимулирования внимания пациента и увеличения процента того времени лечебного сеанса, когда его зрительная система оптимально настроена на эффективное зрительное восприятие. В качестве простейшего приема для достижения этой цели, основываясь на непрерывном анализе ЭЭГ, система предъявления тренировочного материала прекращает показ в моменты отвлечения пациента или снижения его внимания и возобновляет показ после оптимальной настройки пациента на внимательный просмотр. То обстоятельство, что изображение на экране воспроизводится только при надлежащем состоянии зрительной системы, авторы идеи рассматривают как элемент аутотренинга на основе БОС, способствующего нормализации зрительного восприятия. Для мотивационного подкрепления такого аутотренинга используют возможность выбора пациентом интересующего его материала, от просмотра которого он получает

удовольствие. Сеансы лечения проводятся в комфортных условиях, их продолжительность составляет около получаса.

Следует отметить, что единого четкого определения методов, основанных на БОС, до сих пор не существует. Например, есть сообщения о комплексах для повышения остроты зрения, по мнению авторов, основанных на БОС, но принципиально отличающихся от Амблиокора (Авдеева, 2000; Тарутта и др., 2022). Проблематичность классификации методов обсуждается в заключительном разделе настоящей статьи.

Интегрированные программные комплексы — это комплексы программ специального назначения, в которых сделан акцент на множественность механизмов бинокулярного синтеза и вероятность их избирательного нарушения. Идея создания таких комплексов состоит в обеспечении возможности получить общее представление о состоянии бинокулярных функций пациента и набор данных для дифференциальной диагностики и персонализированного лечения.

Для того чтобы в проводимом анализе опираться на собственный опыт, далее мы более подробно рассмотрим соответствующие разноплановые работы по внедрению компьютеризации в клиническую практику лечения бинокулярных расстройств, которые с начала 1990-х гг. проводились в многопрофильном Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) в сотрудничестве с рядом медицинских учреждений (Рожкова и др., 1998; Рожкова, Подугольникова, 1999; Рожкова, Кононов, 2005; Рожкова и др., 2005; 2015; Сенько и др., 2016; Kononov et al., 2006). Учитывая пожелания заинтересованных офтальмологов, в институте считали актуальными задачами не только обновление и совершенствование диагностических и лечебных процедур с учетом новых достижений фундаментальной науки, но и компьютеризацию проверенных практикой традиционных процедур обследования и функционального лечения, осуществляемых обычно с использованием синоптофора и других аппаратов. Кроме того, важным направлением исследования были экспериментальные работы по оптимизации параметров процедур для повышения точности измерений, эффективности тренировочных сеансов и снижения дискомфорта.

В ИППИ РАН с самого начала возникновения идеи создания комплекса для диагностики и лечения амблиопии и косоглазия была поставлена

задача: разработать единый комплекс общего назначения — для диагностики и функционального лечения бинокулярного расстройства в целом, ориентируясь на совокупность разных показателей состояния зрения пациента, а не отдельных его нарушений. Со временем эта идея была реализована в виде Интегрированного лечебно-диагностического комплекса программ “АКАДЕМИК” для развития и восстановления бинокулярного зрения, первая версия² которого была сертифицирована в 1996 г., а вторая — в 2004 г.³ В этот комплекс вошли пять программ: КЛИНОК, ЦВЕТОК, ЧИБИС, ДИСКОТЕКА и КОДИНГ.

КЛИНОК — комплексная программа для диагностики и лечения косоглазия, позволяющая осуществлять все традиционные процедуры аппаратного лечения на синоптофоре. Программа построена по принципу имитации соответствующих процедур, но позволяет расширить диапазоны их параметров и использовать ряд новых режимов стимуляции. Имеются специальные тесты и упражнения для выявления, картирования и ликвидации функциональной скотомы. В программе использован цветовой метод сепарации левого и правого изображений, предполагающий работу в очках с соответствующими цветными фильтрами.

ЦВЕТОК — игровая интерактивная программа для лечения амблиопии, снижения краудинг-эффекта, ускорения зрительного поиска. Программа включает упражнения в поиске буквенных знаков и различных объектов, предъявляемых кратковременно и уменьшающихся по ходу сеанса тренировки. На разных ступенях тренировки объекты предъявляются поодиночке и группами, чтобы не только повысить остроту зрения, но и развить способность выделять искомые объекты из сложного фона.

ЧИБИС — программа, предназначенная для лечения амблиопии, восстановления нормального

² Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Токарева В.С., Воронцов Д.Д., Голубков М.Г., Дрыгин С.В. Интегрированный лечебно-диагностический комплекс программ “АКАДЕМИК”. 1996. Сертификат соответствия “РОСС RU.СП07.Н00035”.

³ Интегрированный лечебно-диагностический комплекс “Академик”. Сертификат соответствия № РОСС RU.СП07.Н00035. Протокол испытаний № 1/2004 от 28.01.2004 г. ИЛ программных средств и информационных технологий ФГУП “Институт межотраслевой информатизации” (аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.22СП31). Система сертификации ГОСТ Р.

бинокулярного взаимодействия и развития стереоскопического восприятия. На момент создания прототипа (программы КЛАСС) эта программа не имела аналогов в сложившейся лечебной практике. Идея программы базируется на открытии в зрительных зонах мозга человека системы особых чисто бинокулярных нейронов (Хьюбел, 1990; Hubel, Wiesel, 1979; Wolfe, Owens, 1979; Wolfe, Held, 1981, 1983), которые функционируют только при поступлении в мозг согласующихся сигналов от двух глаз и совершенно не реагируют на любые монокулярные стимулы. В качестве тестовых и “лечебных” зрительных стимулов в программе используются случайно-точечные стереограммы (СТС), кодирующие чисто бинокулярные объекты, не воспринимаемые в условиях монокулярного зрения. История создания СТС начинается с работы знаменитого морфолога Кахалы (Cajal C.R., 1901), который фактически является изобретателем СТС, проверявшим свою идею при помощи сделанных вручную стимулов и стереофотоаппарата. Во второй половине XX в., благодаря фундаментальным работам Юлеша (Julesz, 1971), такие стереограммы получили широчайшее распространение в виде изображений, генерируемых на компьютерах, как уникальное и очень удобное средство для исследования механизмов бинокулярного зрения. Для восстановления и развития механизмов стереоскопического восприятия на основе СТС в программе ЧИБИС используется метод балансировки контраста. Использование СТС, состоящих из элементов разной величины, обеспечивает восстановление и развитие нейронных механизмов, настроенных на разные пространственные частоты.

ДИСКОТЕКА — игровая интерактивная тренировочная программа, предназначенная для тренировки аккомодации, профилактики, стабилизации или снижения близорукости, повышения остроты зрения при амблиопии, а также тренировки зрительной памяти и зрительно-моторных реакций. Программа обеспечивает компьютерную реализацию процедур, стимулирующих многократную смену аккомодации благодаря использованию заданий, требующих сравнения изображений на мониторе, расстояние до которого можно менять, и на таблице в руках пациента.

КОДИНГ — программа для лечения амблиопии, количественной оценки и развития зрительного внимания и зрительной работоспособности дошкольников и младших школьников. Лечебное действие программы основано на стимуляции интенсивной координированной деятельности зрительной и глазодвигательной систем при

выполнении заданий по кодированию тестовых изображений, расположенных строкой или по углам экрана, с использованием условных знаков, показываемых в образце.

При создании комплекса “Академик” решались следующие задачи: (1) освободить медперсонал от утомительной однообразной работы путем компьютеризации проведения традиционных процедур, доказавших свою необходимость и эффективность, но трудоемких и требующих участия медперсонала при работе на приборах; (2) обеспечить автоматическую регистрацию и сохранение протокола диагностики/лечения с указанием всех варьируемых параметров процедур и получаемых результатов, а также создание их наглядного представления (в виде графиков и таблиц); (3) расширить диапазоны варьирования параметров зрительных стимулов; (4) повысить точность измерения показателей состояния бинокулярной зрительной системы пациента; (5) увеличить разнообразие вариантов реализации традиционных процедур для поддержания интереса пациентов на протяжении продолжительных курсов лечения, (6) добавить в набор процедур новые тесты и упражнения, учитывая их важность в свете последних достижений нейрофизиологии и психофизиологии зрения и лечебной практики.

Отдельные составляющие комплекса “Академик” создавались и апробировались поочередно. Первой была закончена и апробирована ИКП, являющаяся прототипом программы ЧИБИС и имевшая название КЛАСС (Компьютерное Лечение Амблиопии Случайно-точечными Стереограммами). В ходе ее апробации было пролечено 105 пациентов с амблиопией и косоглазием и обследовано 182 ребенка с нормальным зрением в возрасте 3—10 лет. Апробация проводилась в детском глазном санатории при Морозовской больнице, кабинете охраны зрения поликлиники № 103 г. Москвы и специализированном глазном детском саду г. Королева. Контрольные группы набирались из детей, посещающих обычные детские сады и школы г. Москвы (Рожкова и др., 1998; Подугольникова и др., 2005; Podugolnikova, Rozhkova, 1998).

Отличительной особенностью основных процедур программы КЛАСС была адресация воздействия не столько монокулярным, сколько бинокулярным каналам анализа сетчаточных изображений и, соответственно, проведение процедур в дихоптических условиях, *имитирующих бинокулярное* наблюдение. В качестве основных тестовых и “лечебных” изображений в этой программе использовались СТС — чисто бинокулярные

стимулы, в которых тест-объекты не имеют монокулярно видимых контуров и рельефов, так как специально закодированы только бинокулярной диспаратностью (сдвигом соответствующих точек в левом и правом изображениях). Очевидно, что такие тест-объекты могут становиться видимыми для пациента только при успешном функционировании у него мозговых механизмов, обнаруживающих и оценивающих эту диспаратность путем сравнения изображений на сетчатках двух глаз. Примеры использованных в программе изображений приведены на рис. 3, а репрезентативные результаты лечения бинокулярных расстройств с использованием данной ИКП – на рис. 4 и 5.

На рис. 3 поясняется главная процедура работы с программами КЛАСС и ЧИБИС, называемая “Подсвет”, цель которой – добиться функционирования чисто бинокулярной системы стереоскопического восприятия (ЧБС). Программы базируются на цветовом методе сепарации левых и правых изображений, и работать с ними нужно в соответствующих очках с цветными фильтрами. На рис. 3 показаны примеры закодированных в

стереограммах тест-объектов (а, г) и соответствующие СТС с мелкими (б, в) и крупными (д, е) размерами элементов (“точек”). Программы обеспечивают генерацию СТС с элементами четырех размеров для стимуляции нейронных каналов восприятия, избирательно чувствительных к различным пространственным частотам. В рис. 3 включены классические СТС без подсветки закодированного объекта (б, д), необходимые для проверки функционирования чисто бинокулярных нейронов и узнавания объектов исключительно на основе бинокулярной диспаратности, а также те же СТС, но с подсветкой элементов закодированного объекта в изображении для амблиопичного глаза (в, е) в целях обеспечения возможности узнавания тест-объектов только этим глазом на основе контраста по яркости. В ходе каждого сеанса лечения ИКП автоматически подбирает минимальные уровни подсветки, необходимые для узнавания тест-объектов, закодированных в СТС. Общий диапазон возможных значений яркости подсветки разделен на 10 уровней. От сеанса к сеансу происходит снижение уровня подсветки, требующейся пациенту, и в итоге он начинает различать

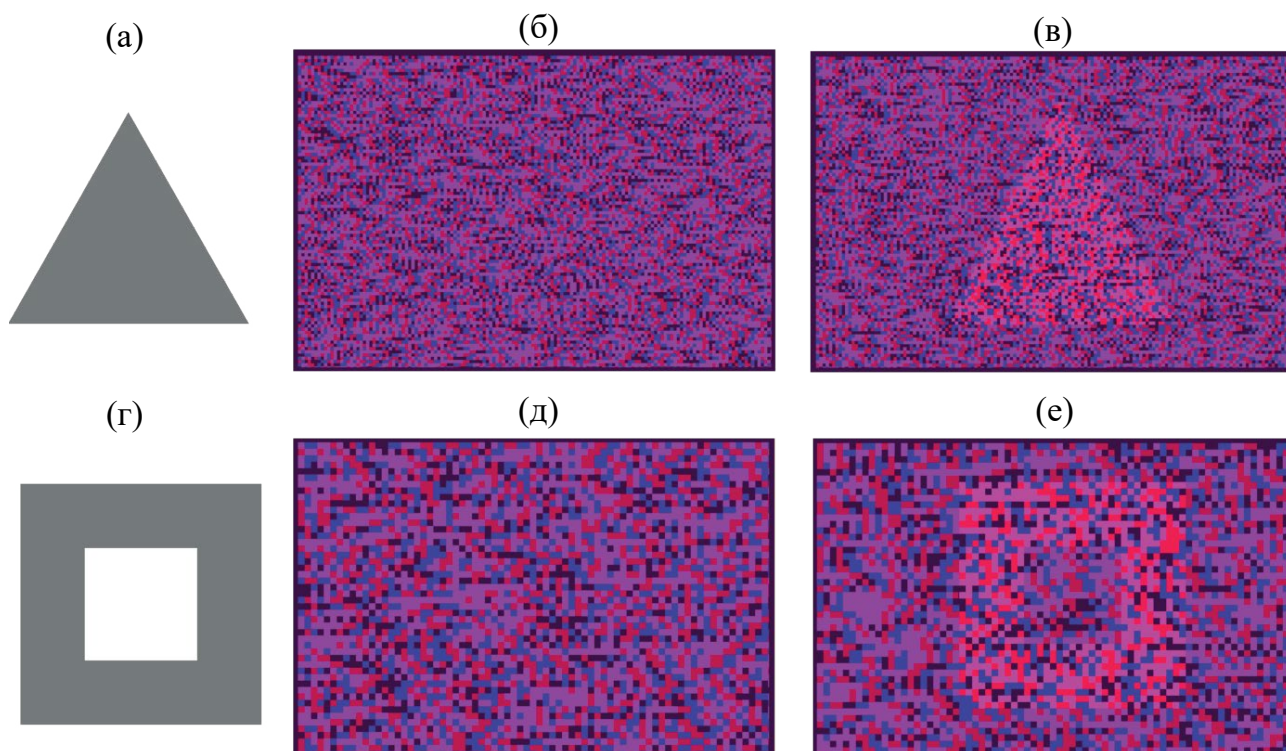


Рис. 3. Пояснение работы с программой ЧИБИС и ее прототипом – программой КЛАСС. Использование автоматически регулируемой подсветки закодированных бинокулярной диспаратностью объектов в изображении для амблиопичного глаза с целью стимуляции его участия в формировании бинокулярных стереообразов. В левом столбце показаны силуэты объектов (а и г), закодированных в СТС с разными размерами элементов (б, в и д, е) и предъявляемых без подсветки (б и д) и с подсветкой (в и е). Пациент рассматривает изображения через красно-синие очки с красным фильтром для амблиопичного глаза и синим фильтром – для лучшего глаза, так что подсветка видна только амблиопичному глазу.

закодированные в СТС тест-объекты совсем без подсветки за счет заработавших механизмов стереоскопического восприятия.

Динамика развития способности к восприятию чисто бинокулярных тест-объектов (называемых также циклопическими) при помощи программ ЧИБИС и КЛАСС у разных пациентов различна,

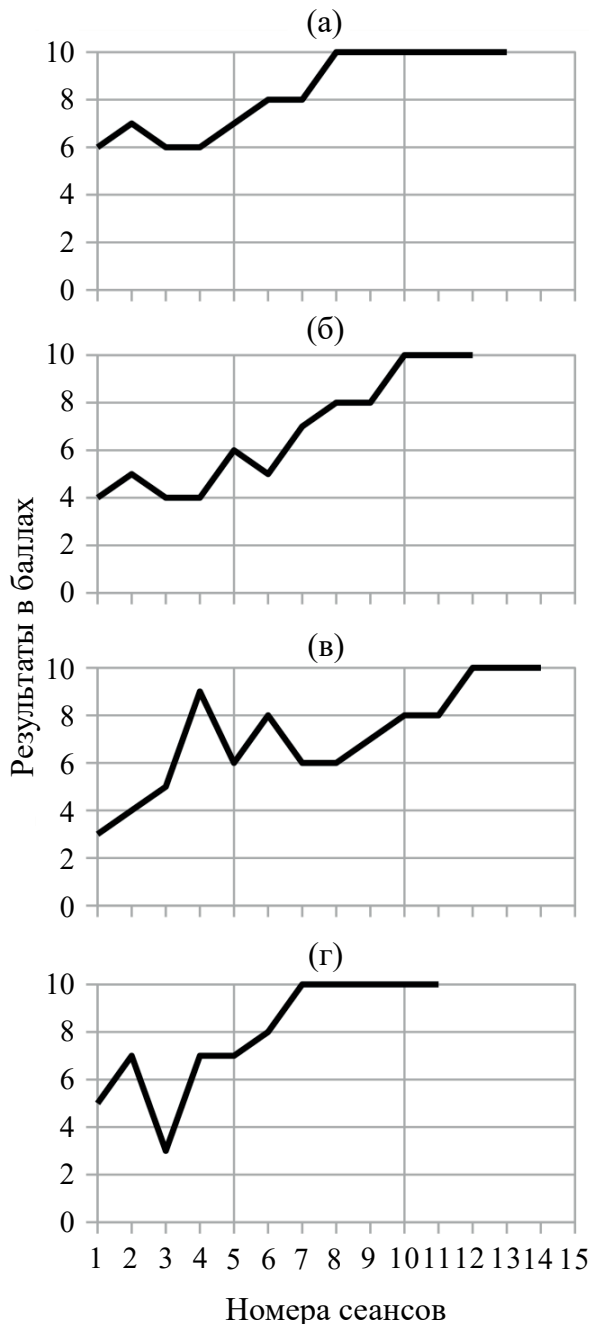


Рис. 4. Динамика развития способности к восприятию чисто бинокулярных тест-объектов при помощи процедуры “подсветка” из программы КЛАСС (а, б, в, г – данные четырех пациентов). По оси абсцисс – номера лечебных сеансов, по оси ординат – оценка результата каждого сеанса в баллах.

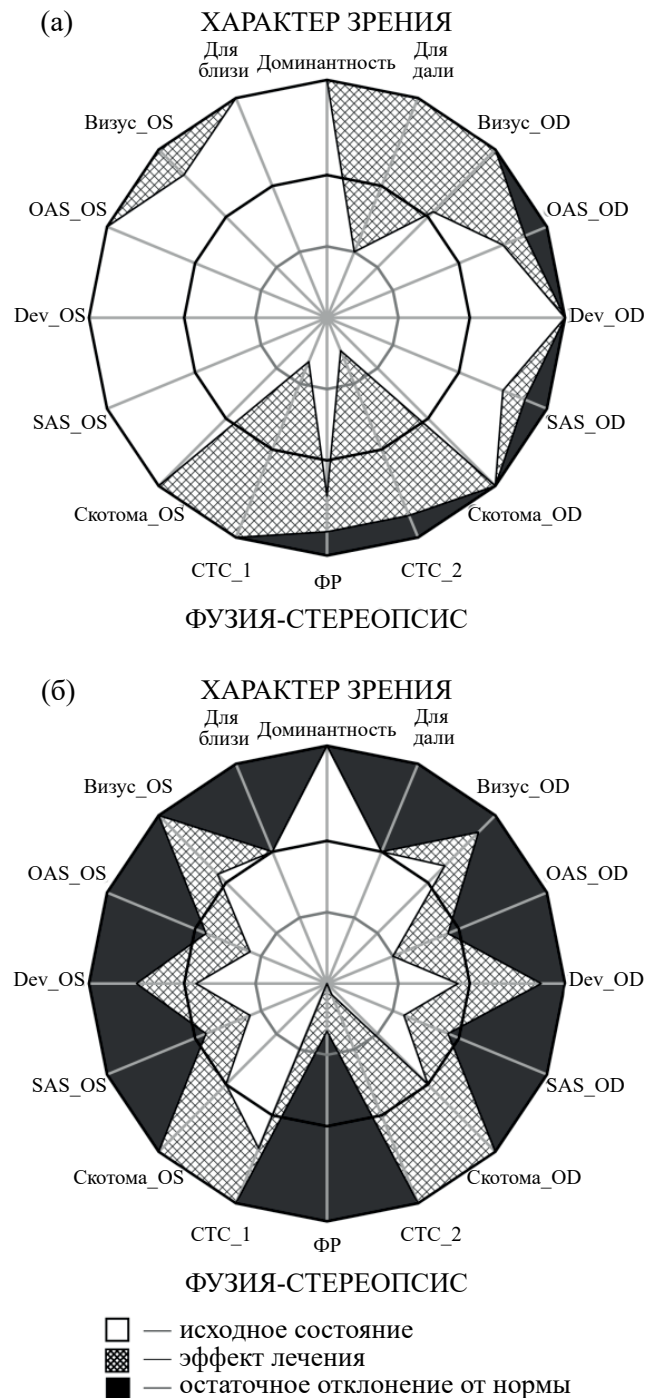


Рис. 5. Иллюстрация эффективности тренировок по программе КЛАСС на примере лечения двух пациенток только при помощи этой программы (объяснения в тексте). Расшифровка буквенных обозначений: OD, OS – правый глаз, левый глаз; Visus – острота зрения; OAS и SAS – объективный и субъективный углы косоглазия по измерениям на синоптофоре, Dev – угол косоглазия по схеме Гиршберга; СТС_1 и СТС_2 – результаты оценки наличия механизмов глобального стереопсиса и его прочности на основе процедур “Подсветка” и “Затемнение”.

она зависит от возраста, вида и исходной степени амблиопии и режима лечебных сеансов. На рис. 4 приведены типичные данные пациентов, участвовавших в апробации программы КЛАСС. В этом исследовании продолжительность отдельных сеансов составляла 10–20 мин, и они проводились по 2–3 раза в неделю.

Низкие оценки результата сеанса в баллах соответствуют низкой контрастной чувствительности амблиопичного глаза пациента, которому требуется интенсивная подсветка объекта для его узнавания на основе яркостного контраста. Высший уровень 10 баллов означает достижение пациентом способности воспринимать классические СТС без подсветки и узнавать тест-объект исключительно на основе механизмов анализа бинокулярной диспаратности.

Для того чтобы механизмы стереопсиса на основе бинокулярной диспаратности начали успешно функционировать, большинству пациентов требовалось 7–12 сеансов, т.е. в общей сложности примерно от полутора до трех часов рабочего времени (при учете средней длительности одного сеанса 15 мин). После этого при необходимости укрепления механизмов стереовосприятия проводили две серии других тренировок — с использованием процедуры “затемнение”, — состоящие из 10–12 сеансов. На протяжении каждого сеанса постепенно уменьшали яркость одного изображения (левого или правого) в предъявляемых СТС, причем эти изображения затемняли целиком. В первой серии снижали яркость изображений, предъявляемых исходно лучшему глазу, во второй — бывшему худшему глазу (возможно, благодаря лечению этот глаз уже сравнялся с лучшим).

Следует специально отметить, что в результате описанных сеансов лечения по программам КЛАСС и ЧИБИС происходило не только излечение амблиопии и развитие механизмов глобального стереопсиса, но и существенное улучшение других показателей бинокулярного зрения, которые оценивались в рамках расширенного стандартного обследования до и после курса лечения. Для демонстрации общей эффективности тренировок строились круговые диаграммы, пример которых приведен на рис. 5. Структура этих диаграмм позволяла с одного взгляда оценить суммарный эффект лечения. Интерпретация таких диаграмм следующая: исходное состояние пациента отражает внутренняя белая область, позитивным изменениям в результате лечения соответствует промежуточная текстурированная область, а оставшимся

отклонениям от нормы — черные сегменты по периферии круга. При расширенном стандартном обследовании, проводимом до и после лечения, для каждого пациента получали 16 показателей состояния бинокулярного зрения, относительные числовые значения которых или условные оценки откладывали по радиусам. Внешняя окружность диаграммы означает соответствие зрения всем нормативным показателям для возрастной группы данного пациента, а меньшие значения по радиусам соответствуют разным степеням нарушений. В отсутствие каких-либо нарушений зрения все показатели должны были бы попадать на внешнюю окружность, соответствующую норме, так что диаграмма имела бы вид белого круга.

Естественно, что из-за индивидуальных особенностей пациентов реальные диаграммы были очень разнообразны по форме и соотношению площадей белых, текстурированных и черных частей нормативного круга. Для расшифровки этих диаграмм добавим, что при нанесении конкретных данных на координатную сетку использовались условные нормировочные масштабы. Средней окружностью обозначена граница между нарушениями слабой степени (попадающими в наружное кольцо) и средней степени (попадающими в среднее кольцо). Внутренней окружностью обведена область нарушений сильной степени. По разным радиусам приведены различные показатели, отражающие общее состояние бинокулярного зрения пациента.

Для примера прокомментируем некоторые особенности двух диаграмм (рис. 5а, б), взятых из протоколов 1998 г. и включенных в статью (Рожкова и др., 1998). На рис. 5а приведены данные пациентки, лечившейся только при помощи программы КЛАСС. До лечения она имела двустороннюю амблиопию, более выраженную на левом глазу (близкую к средней степени), малый угол левостороннего косоглазия (выявленный только на синоптофоре), монокулярный характер зрения для дали и нарушенные механизмы глобального стереопсиса по тестам “Подсвет” (СТС_1) и “Затемнение” (СТС_2). В результате лечения все показатели зрения этой пациентки, включая глобальный стереопсис и фузионные резервы, практически нормализовались.

На второй диаграмме (рис. 5б) показаны результаты одного курса лечения по программе КЛАСС пациентки, которая до этого долго и почти безрезультатно лечилась в других учреждениях. Обследование при поступлении выявило у этой

пациентки следующие расстройства бинокулярного зрения: двустороннюю амблиопию на границе слабой и средней степени, альтернирующее сходящееся косоглазие слабой степени, но с соответствующими функциональными скотомами, слабость механизмов фузии и отсутствие стереоскопического восприятия. Курс компьютерного лечения дал впечатляющие результаты: почти исчезла амблиопия, уменьшились углы косоглазия, исчезли функциональные скотомы, заработали механизмы стереоскопического зрения.

Формат настоящей статьи не предусматривает подробного обсуждения полученных данных и способов их отображения. Целесообразность цитирования материалов данного исследования состоит в том, что его результаты однозначно свидетельствовали об эффективности ИКП, созданных на том этапе и использующих бинокулярные условия наблюдения. Добавим, что в течение ряда лет программа КЛАСС использовалась в Москве, Санкт-Петербурге и других городах в глазных детских садах и кабинетах охраны зрения, в детском глазном санатории, медперсонал которых был удовлетворен получаемыми результатами.

Следует специально отметить важную роль включения СТС в состав ключевых тестовых стимулов ИКП. Чтобы пояснить основания для использования СТС в качестве ключевых тестовых изображений, приведем соответствующие теоретические аргументы, которые также проиллюстрируют потенциальные возможности использования СТС для тонкой дифференциальной диагностики нарушения бинокулярных функций у пациентов. Идея использования СТС при лечении косоглазия и амблиопии связана с появлением концепции множественности механизмов бинокулярного синтеза видимого образа, которая начала формироваться в 80-х годах прошлого века (Вульф, 1983; Рожкова, Плосконос, 1988; Wolfe, Owens, 1979; Wolfe, Held, 1981; 1982; 1983; Wolfe, 1986) в противовес превалировавшей ранее концепции единственности механизма бинокулярного зрения, оказавшейся неспособной объяснить многие экспериментальные факты, накапливающиеся в ходе исследований бинокулярного зрительного восприятия новыми методами. Теоретические и экспериментальные обоснования концепции множественности механизмов бинокулярного синтеза применительно к обсуждаемой в данной статье теме изложены в статье (Рожкова, Плосконос, 1988). Главные положения этой концепции кратко сформулированы ниже.

1. Для восприятия неподвижных объектов у человека имеется, по крайней мере, 3 бинокулярных подсистемы: чисто бинокулярная подсистема (ЧБС), базирующаяся на функционировании нейронов, реагирующих только на одновременно поступающие схожие сигналы от двух глаз и настроенных на разные значения диспаратности (разную глубину); монобинокулярная подсистема (МБС), нейроны которой реагируют на сигналы, поступающие из обоих глаз, как по отдельности, так и совместно, и постмонокулярная подсистема (ПМС), использующая “полуфабрикаты” образов, сформированных двумя чисто монокулярными совокупностями нейронов, связанных с левым и правым глазом.

2. У каждой подсистемы имеются специфические отличительные свойства. ЧБС как бы выделяет срезы объектов с одинаковой диспаратностью и может обеспечивать восприятие объектов на сложном маскирующем фоне, когда они совсем не видны монокулярно (мимикрия у животных, камуфляж у военных, СТС в экспериментальных исследованиях и диагностике бинокулярных нарушений). МБС как бы осуществляет операцию суммирования левого и правого сетчаточных изображений. Эта система особенно полезна в тех случаях, когда контуры и детали сетчаточных проекций объектов в левом и правом глазу сильно “испорчены” различными “помехами”, например, слепыми пятнами и крупными кровеносными сосудами на сетчатках или локальным снижением чувствительности из-за сильного предыдущего светового воздействия. Осуществляя простое объединение, т.е. “смешение” информации от двух глаз для получения более полных изображений на условной “бинокулярной сетчатке”, МБС теряет возможность оценивать интерокулярные различия, она не проявляет чувствительности к диспаратности. ПМС осуществляет логическое объединение в единый образ различных деталей и признаков объектов, причем даже противоречивых, но надежно опознанных в чисто монокулярных каналах обработки зрительной информации, обеспечивая возможность таких эффектов как стереопсис на основе иллюзорных (когнитивных) контуров, появляющихся в результате работы механизмов интерполяции и экстраполяции, или стереоблеск, наблюдаемый при большой разнице в яркости/контрасте одного и того же фрагмента в левом и правом сетчаточном изображении.

3. При расстройствах бинокулярного восприятия ЧБС, МБС и ПМС могут нарушаться и одновременно, и по отдельности, и в разных сочетаниях.

В качестве одного из подтверждений концепции множественности и возможности независимого нарушения выделенных параллельных подсистем бинокулярного синтеза ниже приведены данные, полученные Г.А. Плосконос при оценке нарушений ЧБС, МБС и ПМС у нескольких пациентов (из статьи: Рожкова, Плосконос, 1988). Наличие нарушений оценивалось при помощи трех типов специфических адресных тестов для проверки функционирования этих подсистем. Каждый тест соответствовал свойствам базовых нейронов только одной подсистемы, и человек мог успешно пройти этот тест только при ее удовлетворительном состоянии. Тесты для проверки работы ЧБС представляли собой СТС, тесты для МБС – пары фрагментарных изображений объектов, которые невозможно было опознать по монокулярным неполным изображениям, а для ПМС – стереопары позитив+негатив, в которых левое и правое изображения всех объектов имели противоположные знаки контраста. Об успешном функционировании ЧБС, МБС и ПМС судили, соответственно: по узнаванию объектов, закодированных в СТС бинокулярной диспаратностью; по успешному объединению информации, содержащейся в левых и правых фрагментарных изображениях объектов и их узнаванию; по возникновению эффекта бинокулярного блеска при предъявлении стереопар с противоположными знаками контраста в левых и правых изображениях. Результаты тестирования нескольких пациентов, демонстрирующие избирательность нарушений, приведены в табл. 1. Отобранные для таблицы пациенты имели одинаковые показатели косоглазия и амблиопии (слабой степени), измеряемые при стандартном обследовании. Специально изготовленные тесты предъявлялись на синоптофоре с учетом угла косоглазия, чтобы обеспечить одновременное попадание изображений в обоих глазах на центральные участки сетчаток.

Как показывают приведенные данные, при одинаковости показателей стандартного обследования, у пациента Х1 тесты выявили нарушение всех

трех подсистем, у пациента Х2 – двух подсистем, у пациентов Х3, Х4 и Х5 – одной подсистемы, но не одной и той же, а у пациента Х6 нарушений совсем не было обнаружено. Очевидно, что для успешного лечения этих пациентов нужно было учитывать обнаруженные различия.

ИКП, имитирующие традиционные процедуры функционального лечения, немногочисленны, что объясняется естественным предпочтением новых идей и желанием специалистов совершенствовать клинические методы, используя научные открытия и передовые технологии. В качестве примера рассмотрим программу КЛИНОК – одну из самых востребованных среди ортоптических программ. В качестве примера рассмотрим программу КЛИНОК – одну из самых востребованных среди ортоптических программ комплекса “Академик”, которая позволяет осуществлять все традиционные процедуры функционального лечения на синоптофоре. Хотя главной целью компьютеризации было облегчение работы ортоптических, созданная программа также позволила расширить временной и скоростной диапазон процедур и ввести ряд новых режимов стимуляции. В меню программы входили диагностические процедуры “Оценка характера зрения (ЦВЕТТЕСТ)”, “Измерение угла косоглазия и гетерофории”, “Выявление функциональной скотомы”, “Определение фузионных резервов”, а также лечебные процедуры “Ликвидация функциональной скотомы”, “Устранение косоглазия с применением мельканий”, “Закрепление бификсации с применением колебаний”, “Развитие фузионных резервов”.

Для иллюстрации удобства работы с программой КЛИНОК на рис. 6 представлен графический протокол работы по ликвидации функциональной скотомы. Это одна из самых сложных задач для ортоптических. При выполнении манипуляций, необходимых для определения границ функциональной скотомы и ее ликвидации, пациенту с косоглазием и центральной функциональной скотомой

Таблица 1. Результаты проверки функционирования трех подсистем бинокулярного синтеза у шести пациентов, имевших одинаковые показатели косоглазия и амблиопии

ТЕСТЫ для подсистем	Результаты тестирования шести пациентов (Х1-Х6)					
	Х1	Х2	Х3	Х4	Х5	Х6
ЧБС	-	+	-	+	+	+
МБС	-	-	+	-	+	+
ПМС	-	-	+	+	-	+

Знак “+” означает, что подсистема функционирует нормально, а знак “-”, что подсистема не работает. Данные из статьи (Рожкова, Плосконос, 1988), с адаптацией.

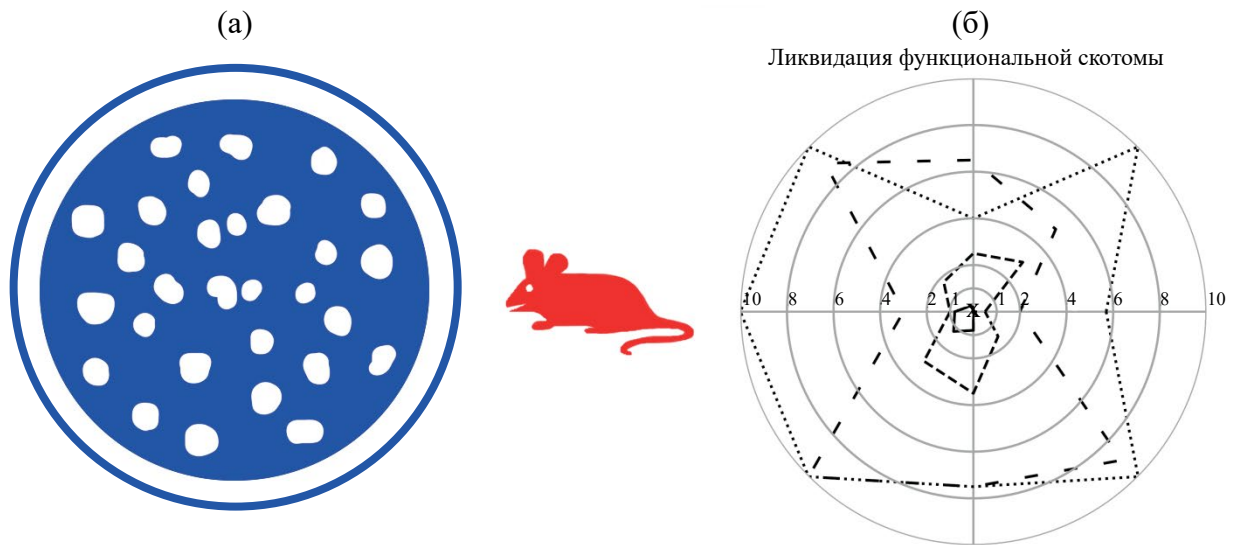


Рис. 6. Пример объектов, предъявляемых в начале лечебного сеанса (а) и графический протокол работы по ликвидации функциональной скотомы при помощи ИКП КЛИНОК (б) у взрослой пациентки (26 лет). Обведенные разными линиями площадки соответствуют оценкам размеров функциональной скотомы на последовательных этапах лечения — в конце 1-го, трех промежуточных и последнего сеансов. В ходе последнего сеанса скотома была ликвидирована, этот результат отмечен крестиком в центре поля зрения.

предъявляют 2 разных объекта: ведущему глазу — объект в центре поля зрения, косящему (худшему) глазу — другой объект, расположенный за пределами скотомы. Приведем для примера описание одного из предлагаемых заданий, имеющего название “Мышеловка”.

В центре экрана предъявляется изображение для ведущего глаза — схематическая “мышеловка”, обозначенная синей окружностью, с большим куском дырявого сыра в середине, а у правого края экрана предъявляется изображение для косящего глаза — условная мышка красного цвета. Размер мышеловки должен примерно соответствовать тому размеру скотомы, который был определен на этапе стандартного диагностического обследования. Задача пациента: нажимая клавиши, медленно двигать изображение мышки к центру экрана (по одному из восьми направлений поочередно), завлекая ее в мышеловку полностью. Для этого мышка должна “съесть” весь сыр. При каждом соприкосновении изображения мышки с краем сыра кусок будет уменьшаться на 1 мм с той стороны, где мышка его “кусает”. Если мордочка мышки коснется центра мышеловки, мышеловка “захлопнется” (накроется решеткой) — это знак того, что функциональная скотома ликвидирована.

Управление перемещением подвижного объекта (мышки), воспринимаемого худшим глазом, в этих упражнениях производится посредством клавиш “к центру” и “от центра”. При выполнении

каждого упражнения задача пациента состоит в перемещении подвижного объекта до самого центра экрана и в выработке способности удерживать этот объект в данном положении. Когда у пациента при некотором расстоянии объекта от центра возникнет впечатление перескока объекта через центр (что характерно для случаев функциональной скотомы подавления), надо вернуть объект в прежнее положение и продолжить упражнение. Если таким способом продвинуть объект ближе к центру не удастся, то для регистрации достигнутого результата (максимального приближения к центру), нужно нажать клавишу Enter.

В представленном на рис. 6б случае для ликвидации функциональной скотомы взрослой пациентке (26 лет) понадобилось 25 сеансов. Ранее этой пациентке были сделаны 3 неудачных операции по поводу косоглазия (последняя — в подростковом возрасте), в результате которых исходное сходящееся косоглазие перешло в расходящееся. Как видно из приведенных выше результатов, даже в таком сложном случае использование программы КЛИНОК дало сравнительно быстрый положительный эффект.

В большинстве отечественных ИКП для лечения амблиопии и косоглазия, созданных в других учреждениях на начальном этапе компьютеризации, традиционные клинические процедуры лечения на синоптофоре и других приборах не имитировались. Основное внимание уделялось игровым

схемам, предназначенным для развития механизмов одновременного зрения, т. е. совместной работы двух глаз в общих игровых действиях или для стимуляции суммирования информации, поступающей от обоих глаз, без тонкого анализа сходств и различий сетчаточных изображений одного и того же объекта в левом и правом глазу.

Преимущественно имитировались упражнения и игры, реализуемые ранее на оптико-механических устройствах и используемые в специализированных глазных детских садах и ортоптических кабинетах. В качестве примеров можно привести программный комплекс “Маленький волшебник”, разработанный сотрудниками Тамбовского филиала МНТК “Микрохирургия глаза” им. академика С.Н. Федорова и Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина (Белоусов, Арзамасцев, 2013), программный пакет “МЕКО”, включающий программы: “UFO”, “KONSTRUKTOR”, “MOSAIC”, “STARS”, программный комплекс “Капбис” (Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”, 2015); компьютерно-тренировочный комплекс “Школьник” (ИППИ РАН, распространение и техническая поддержка – Группа компаний “ВИДА”), включающий программы “Спак” (для снятия спазма аккомодации), “Трест” (для развития стереозрения), “Краб” (для развития резервов фузии), “Колесо удачи” (для восстановления зрительных функций при амблиопии), “Волшебные окошки” (для развития аккомодации). В недавней статье (Новицкая и др., 2022) авторы из ООО “Облачная медицина”, Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова и Северного государственного медицинского университета описали свою программу, созданную на основе программ отечественных предшественников.

ИЗМЕНЕНИЕ ТЕНДРОВ НА СЛЕДУЮЩЕМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ

Расширение использования дихоптических условий наблюдения и компьютерных игр при лечении

Приблизительно с середины первого десятилетия XXI в. наметилось изменение трендов развития компьютерных методов лечения. Увеличение быстроедействия, показателей пространственного разрешения и качества цветопередачи дисплеев, а также внедрение дополнительных технологий сепарации левого и правого изображений, в совокупности со стремлением к стимулированию заинтересованности пациентов, сдвинули основное

направление творческих исканий в сторону создания разнообразных динамических игровых тренировочных ИКП и применения видеофильмов.

Дополнительным стимулом к такому сдвигу послужили все чаще появляющиеся сообщения о возможности успешного лечения амблиопии и косоглазия у взрослых пациентов (Polat et al., 2004; Hess et al., 2010; Li et al., 2013; Barry, 2009; 2012; Barry, Bridgeman, 2017; Andalib et al., 2015; Bridgeman, Barry, 2015), которые опровергали давно сложившееся мнение о безрезультатности и бесперспективности такого лечения после окончания сенситивного периода развития зрительной системы. Как средство лечения для взрослых пациентов компьютерные игры представлялись особенно привлекательными по контрасту с традиционными намеренно упрощенными компьютеризированными упражнениями, разработанными для детей дошкольного и младшего школьного возраста, которые составляют основную массу пациентов с амблиопией и косоглазием.

За рубежом большое влияние на массовое включение компьютерных игровых программ в процесс лечения амблиопии оказала опубликованная в 2006 г. статья в журнале Eye (Waddingham et al., 2006) о предварительных результатах использования “интерактивной системы бинокулярного лечения” (Interactive Binocular Treatment system: I-BiTTM). Лечебные процедуры включали наблюдение видеоклипов и компьютерные игры с использованием технологии виртуальной реальности. В последующих аналогичных работах других авторов использовались и иные методы дихоптического наблюдения (чаще всего на основе временной сепарации с активными очками), и разнообразные игры (Qiu et al., 2007; Hess et al., 2012; Herbison et al., 2013; Li et al., 2014; Birch et al., 2015; Holmes et al., 2016; Kelly et al., 2016; Manh et al., 2018; Pineles et al., 2020; Achtman et al., 2008; Birch et al., 2015; To et al., 2011; Wei et al., 2013; Vitali et al., 2013; Gargantini et al., 2011).

Как следует из приведенной в предыдущем разделе информации, для отечественных специалистов рассмотренное направление развития игровых компьютерных методов лечения не воспринималось как новаторское, а дихоптические условия наблюдения с самого начала разработок использовались практически всеми создателями соответствующих ИКП. В России еще с конца прошлого века компьютерные игры входили в арсенал средств для лечения амблиопии и косоглазия, в том числе и в дихоптических условиях

наблюдения. В качестве примеров можно привести игры “Погоня” (фирмы “Астроинформ”) и “Рыбки” (фирмы “Реабилитация”) для развития одно-временного зрения, а также упражнения игрового типа для развития стереоскопического восприятия из комплекса “Академик” (программа ЧИБИС), заключающиеся в обнаружении и узнавании различных циклопических объектов (геометрических фигур, букв, простых предметов).

Оптимизация техники и дизайна компьютерных лечебных процедур

Развитие и совершенствование компьютерных технологий, которые можно потенциально использовать при создании ИКП для диагностики и лечения нарушений бинокулярного зрения, поставили на повестку дня вопрос об оптимальном выборе технической основы и дизайна для реализации различных конкретных задач. К сожалению, как правило, такой выбор требует весьма трудоемких сравнительных исследований, поэтому количество публикаций на данную тему пока невелико. Однако со временем оно будет расти, так как вопрос остается актуальным, его надо решать, и, скорее всего, по-разному в разных случаях. Для примера рассмотрим работы, касающиеся выбора метода сепарации левого и правого изображений в ИКП для оценки и развития механизмов стереовосприятия.

С самого начала ИКП разных авторов-создателей, предназначавшиеся для восстановления или развития механизмов бинокулярного пространственного зрения (восприятия объемной формы, расстояний по глубине и пространственных отношений между объектами), большей частью различались не столько по сценариям, сколько по дизайну и методам сепарации левого и правого изображений, предъявляемых на дисплее.

Долгое время наиболее широко распространенным в лечебной практике был метод цветовой сепарации. По-видимому, это связано с традиционным использованием цветных фильтров в диагностике бинокулярных нарушений (классический пример — цветотест Уорса (Worth test)). Вторым по распространенности в лечебных учреждениях, особенно за рубежом, быстро стал метод временной сепарации с использованием попеременного показа левых и правых изображений и синхронизируемых с таким предъявлением активных стереочков, обеспечивающих поочередное затемнение правого и левого очкового фильтра, соответственно. Указанные методы цветовой и временной

сепарации не требовали специальных мониторов или экранов для показа тестового и лечебного материала: при их использовании можно было работать с “бытовым” компьютерным оборудованием, заботясь лишь о согласованности спектральных характеристик мониторов и очковых фильтров в случае цветового метода и о настройке синхронизации — в случае временного метода. Заметим, что в других медицинских областях (дистанционная хирургия, стоматология и т.д.) ситуации с выбором методов сепарации иные.

Но медицина — далеко не главная и не первая сфера использования дихоптических методов. Изначально они разрабатывались для создания стереоскопических кинофильмов. Почти до конца XX в., пока они были экзотикой, в стереокинотеатрах преобладали безочковые автостереоскопические растровые технологии (Майоров, 2018а,б), которые в офтальмологических ИКП до последнего времени не использовались. Растровая сепарация представлена в офтальмологии лишь открытками с тестами Ланга (Грачева, 2017; Грачева, Рожкова, 2012; Lang, Lang, 1988). Со второй декады XXI в. в стереокинотеатрах, ставших массовыми, фигурируют только методы сепарации, требующие надевания зрителями стереочков: поляризационный, временной (shutter glasses) и спектрзональный (Infitec) (Грачева и др., 2022). Спектрзональный метод был изобретен на замену простому двухцветному методу сепарации, имеющему большой недостаток — невозможность съемки и показа нормальных полноцветных фильмов из-за использования одномодальных красных и сине-зеленых фильтров, резко обедняющих цветовую палитру стереоизображений. Однако переход на усложненную технологию Infitec (в ее современной технической реализации) при создании ИКП для лечения амблиопии и косоглазия представляется нерациональным. Для создания полноцветных тестов и лечебных стимулов более перспективно использовать технологии шлемов виртуальной реальности (virtual reality, VR), основанные на механической сепарации левого и правого изображений с любыми цветовыми характеристиками, которые пациенту предъявляют через отдельные оптические каналы. Существующие VR-системы сильно различаются по сложности: сейчас в обращении имеются различные модификации как простых шлемов или масок (типа дешевых картонных визоров Google Cardboard), так и громоздкая аппаратура полного погружения в виртуальную среду (например, CAVE — Cave Automatic Virtual Environment) (Грачева, Большаков, 2016; Bonfanti, Gargantini, 2015). Пилотные исследования с применением

VR-шлемов для лечения амблиопии уже не единичны (Sloper, 2022; Xiao et al., 2022; Obukhov et al., 2024; Кос et al., 2025). Возможно, для VR-систем найдется своя специфическая ниша в функциональном лечении, но на данном этапе трудно оценить общий баланс достоинств и недостатков этих систем в плане обсуждаемых целей.

На самом деле, последнее замечание в разной степени касается и других методов сепарации левого и правого изображений, поэтому мы сочли полезным для начала кратко суммировать в табличной форме хотя бы главные особенности разных методов с точки зрения их использования в ИКП (табл. 2).

Для иллюстрации существенной зависимости получаемых результатов от метода сепарации приведем данные использования цветового (анаглифного) и поляризационного (с круговой поляризацией) методов сепарации в ИКП для измерения стереопорогов и фузионных резервов. В созданных для этой цели ИКП “Стереопорог” (Большаков, Грачева, 2012) и “Фузия” (Большаков, Рожкова, 2013) специально предусматривалась возможность выбирать цветовой либо поляризационный метод сепарации на одной и той же аппаратуре и при прочих равных условиях измерения. 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 измерения проводились при расстоянии 6 м от экрана до испытуемого.

Измерение стереопорогов

Для получения данных по измерению порогов стереовосприятия были проведены эксперименты с использованием стимулов разного вида, в том числе элементов Габора. На рис. 7а дается представление о тестовых стимулах, а на рис. 7б — о видимой картине. В тестовом стимуле два элемента из четырех 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 проводилось изменение параллакса с адаптивным шагом. То наименьшее значение параллакса, при котором испытуемый с заданной вероятностью давал правильный ответ, принимали за стереопорог.

В экспериментах участвовали 12 испытуемых от 22 до 47 лет. Протокол исследования включал измерения на трех пространственных частотах: 2, 4 и 8 цикл/град. На каждой пространственной частоте измерения проводились сначала в последовательности анаглифная сепарация — поляризационная сепарация, затем в обратной последовательности. На рис. 7 в показаны усредненные результаты всех измерений для цветовой (штриховая синяя линия) и для поляризационной (сплошная черная линия) сепарации.

Таблица 2. Технические условия для реализации различных методов сепарации

Метод сепарации	Условия предъявления	Условия просмотра
Цветовой анаглифный	Обычный экран	Очки с цветными фильтрами
Цветовой спектрозональный	Обычный экран	Очки с гребенчатыми спектральными фильтрами
Поляризационный (линейная поляризация)	Специальный экран, не искажающий поляризацию	Очки с ортогональными поляризационными линейными фильтрами
Поляризационный (круговая поляризация)	Специальный экран, не искажающий поляризацию	Очки, фильтрующие свет, поляризованный по и против часовой стрелки
Затворный (временной, эклипсный)	Обычный экран	Активные очки, меняющие прозрачность фильтров синхронно со стимуляцией
Автостереоскопический растровый	Специальный экран (линзовый или параллакс-барьерный)	Нахождение глаз зрителя в определенных зонах предэкранного пространства
Шлемы и визоры виртуальной реальности	Наличие отдельных оптических каналов для предъявления изображений левому и правому глазу и датчиков позиции головы	Фиксация шлема на голове

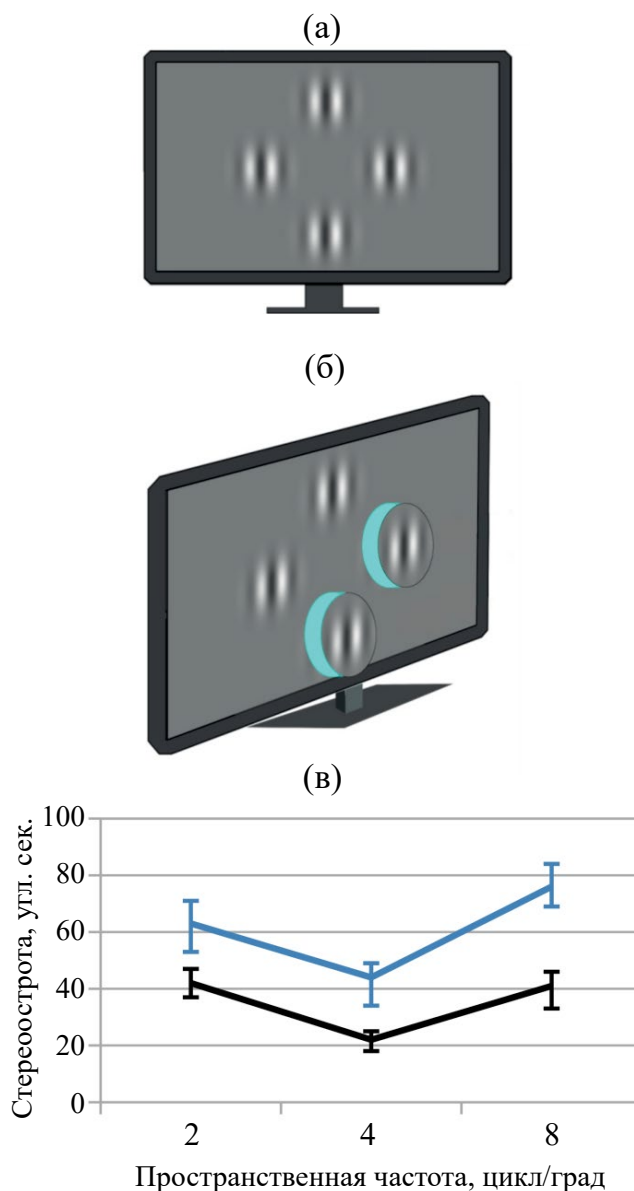


Рис. 7. Измерение порогов стереовосприятия с использованием программы “Стереопорог”. а – примеры тестов для измерения порогов стереовосприятия; б – вид воспринимаемой в стереочках картины. Голубым цветом обозначено виртуальное выступание объекта из экрана; в – результаты оценки стереопорогов с использованием анаглифного и поляризационного методов сепарации.

Было показано, что при использовании поляризационной сепарации получаемые значения стереопорогов иногда оказываются в два-три раза ниже (лучше) по сравнению с данными, получаемыми при использовании цветовой анаглифной сепарации.

Как видно из приведенных данных, различия в результатах, полученных при разных методах сепарации, очевидны, что подчеркивает

важность вопроса о выборе технологии сепарации изображений.

Измерение фузионных резервов

У взрослых испытуемых (преимущественно студентов) оценивали фузионные резервы при помощи компьютерной тестовой программы ФУЗИЯ, рассчитанной на применение цветовой и поляризационного методов сепарации (Васильева и др., 2022). В одном режиме тестовые стимулы, предназначенные для левого и правого глаза, имели разные цвета, в другом режиме – разные направления круговой поляризации света. Испытуемые рассматривали тестовые стимулы через очки с соответствующими фильтрами.

Полученные данные выявили существенную зависимость измеряемых показателей стереозрения от метода сепарации изображений у большинства испытуемых. При оценке конвергентных фузионных резервов в условиях цветовой сепарации пик распределения полученных значений приходился на интервал 15–20°, а в условиях поляризационной сепарации – на интервал 30–35°. Аналогичная разница имела место и для дивергентных фузионных резервов: в условиях цветовой и поляризационной сепарации пики распределений приходились на $|-2-4^\circ|$ и $|-10-12^\circ|$, соответственно. При этом наблюдались значительные различия между испытуемыми – у части испытуемых оба метода давали близкие результаты (рис. 8). Воспроизводимость результатов (тест-ретест) оказалась удовлетворительной и сопоставимой для обоих методов.

Таким образом, результаты оценки фузионных резервов в условиях использования в ИКП цветовой и поляризационного методов сепарации левого и правого изображений наглядно продемонстрировали преимущества поляризационного метода.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ ПОСЛЕДНИХ 15 ЛЕТ

В связи с тем, что в последние годы тенденции использования и развития компьютерных методов лечения амблиопии и косоглазия в России и за рубежом существенно расходятся, рассмотрим их отдельно.

Отечественные разработки

Отечественные ИКП, созданные за последние 15 лет, можно разделить на 3 типа:

1) специализированные ИКП, позволяющие более гибко и эффективно использовать

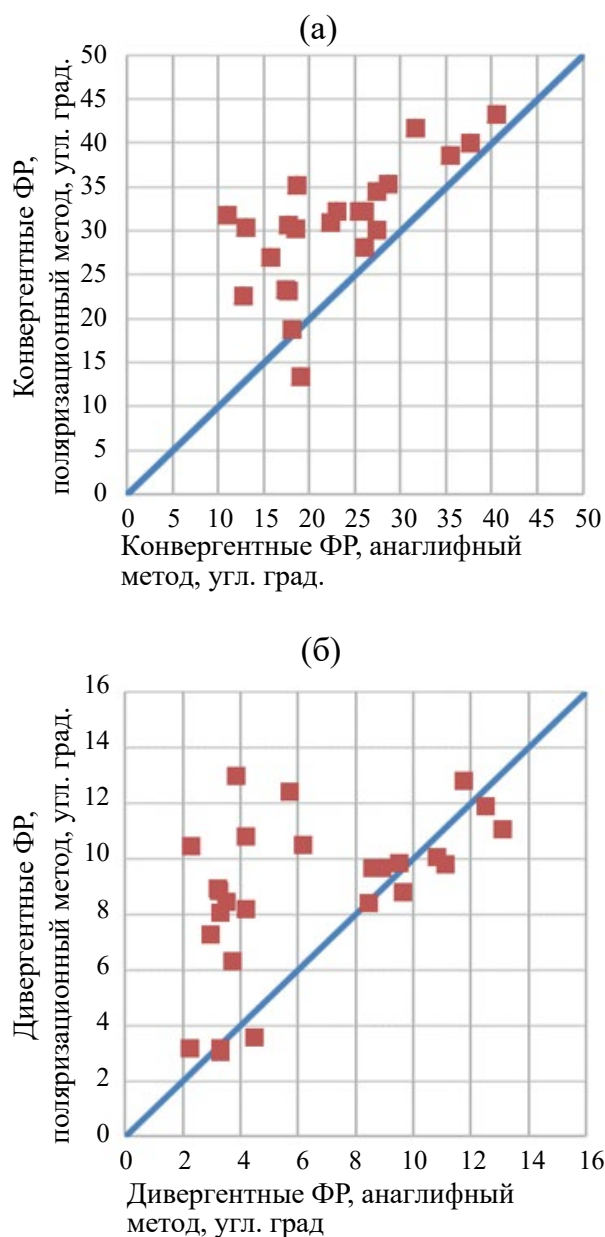


Рис. 8. Демонстрация влияния методов сепарации на измерение фузионных резервов. Индивидуальные соотношения оценок конвергентных (а) и дивергентных (б) фузионных резервов, полученных при использовании цветовой (горизонтальная ось) и поляризационной (вертикальная ось) сепарации.

потенциальные возможности традиционных методов лечения;

2) ИКП, интегрированные в системы, предназначенные для устранения определенных, хорошо установленных нарушений;

3) ИКП, предусматривающие возможность проведения сравнительных исследований на одной

и той же аппаратуре с использованием разных методов сепарации или условий наблюдения.

В качестве примера ИКП первого типа можно привести программу ПОИСК (Большаков и др., 2013а; 2013б), разработанную в ИППИ РАН для повышения остроты зрения и скорости зрительной работы при амблиопии и реализующую метод виртуальной окклюзии на основе поляризационной сепарации для диоптрических условий восприятия. Результаты применения этой ИКП продемонстрировали разноплановые преимущества замены традиционной окклюзии виртуальной окклюзией (Большаков и др., 2013б; Рожкова и др., 2015; Рожкова и др., 2016; Грачева, 2017; Кувшинова и др., 2017; Bolshakov et al., 2016).

Что касается компьютеризированных комплексов второго типа, то хорошей иллюстрацией их возможностей может служить работа сотрудников МГНИИ им. Гельмгольца (Тарутта и др., 2022), посвященная лечению амблиопии у детей с неустойчивой центральной и нецентральной фиксацией на микропериметре с использованием БОС (биологической обратной связи). На основе звуковых сигналов обратной связи, отражающих отклонение глаза от центра поля зрения, удавалось не только улучшать центральную фиксацию, но и повышать светочувствительность и остроту зрения пациентов. Достигнутые авторами результаты, кратко суммированные ниже, сохранялись в срок наблюдения до 3 мес.

В ходе тренировочных сессий на микропериметре МР-3 Nidek (Япония), используя для БОС звуковой сигнал, предупреждающий пациента об отклонении глаза от центра поля зрения, авторы добивались централизации зрительной фиксации и повышения остроты зрения за счет попадания тестовых знаков на область сетчатки с повышенной плотностью фоторецепторов. В результате лечения (10—15 сеансов по 10—12 мин) в группе из 27 пациентов в возрасте от 5 до 17 лет с амблиопией различного генеза были получены следующие результаты: усредненная максимально скорректированная острота зрения (МКОЗ) повысилась с $0,41 \pm 0,24$ до $0,68 \pm 0,27$, исходно неустойчивая центральная фиксация сменилась устойчивой центральной во всех случаях, а при нецентральной фиксации в 75% случаев было получено приближение точки фиксации к центральной области и улучшение характеристик фиксации.

Специфика ИКП третьего типа состоит в обеспечении возможности корректного проведения

сравнительных исследований эффективности и особенностей различных методов или их модификаций. Такие ИКП исходно разрабатываются не только для лечения, но и для научных целей (например, для оптимизации процедур измерения и развития бинокулярной остроты зрения, стереоскопического зрения, скорости бинокулярной интеграции, фузионных резервов и т.д.). В ИППИ РАН были разработаны и апробированы две таких программы – “СТЕРЕОПОРОГ” (Большаков, Грачева, 2012) и “ФУЗИЯ” (Большаков, Рожкова, 2013). Эти программы были предназначены для оценки различия индивидуальных и средних результатов, получаемых при использовании цветового и поляризационного методов сепарации, с целью выбора метода, более перспективного с точки зрения проведения массовых измерений, в частности, для исследования возрастной динамики стереовосприятия. Соответственно, в программах предусматривается возможность проводить измерения с использованием двух различных типов сепарации в схожих условиях, что дает возможность корректного сравнительного исследования эффективности и точности различных конфигураций методик. Результаты, полученные при помощи ИКП этого типа и приведенные в предыдущих разделах, позволили сделать однозначные выводы о преимуществе поляризационной технологии по средним показателям и в то же время выявили большую вариабельность индивидуальных “предпочтений” метода сепарации: у части пациентов показатели различались вдвое, тогда как у других различие было меньше или отсутствовало. Из этого следует, что вопрос выбора метода сепарации требует дополнительных исследований для каждой конкретной задачи.

Зарубежные публикации

В последние десятилетия в англоязычных публикациях по лечению амблиопии и косоглазия с использованием аппаратно-программных компьютерных комплексов стали употреблять термин “методы бинокулярной терапии” (МБТ), имея в виду, что это принципиально новые методы. Для частных видов МБТ используют также термины “дихоптическое лечение” и “дихоптические тренировки”, обозначая ими те виды МБТ, которые подразумевают предъявление различающихся оптических стимулов для левого и правого глаза с использованием стереотехнологий сепарации изображений. Существующие технологии сепарации позволяют предъявлять левые и правые изображения раздельно или разделять совмещенные (например, наложенные на экране монитора) левые

и правые изображения, используя специальные фильтры для попадания каждого изображения в нужный глаз.

Проанализировав исследования, обозначаемые указанными терминами, трудно согласиться с тем, что упоминаемые в статьях МБТ являются новаторскими с точки зрения методологии и что до недавнего времени (примерно до 2010 г.) МБТ не использовались. Можно напомнить, что (1) среди традиционных методов лечения амблиопии и косоглазия уже давно были и сейчас есть методы, соответствующие МБТ, и что (2) в отечественной клинической практике интерактивные компьютерные программы для лечения амблиопии и косоглазия, предполагающие работу в бинокулярных и дихоптических условиях наблюдения, используются еще с 1990-х годов.

Из традиционных классических методов лечения амблиопии, явно относящихся к разряду МБТ, в первую очередь нужно упомянуть метод пенализации, предложенный в позапрошлом веке и применяемый в различных вариантах. Как известно, суть метода заключается в искусственном ухудшении зрения ведущего глаза, чтобы сделать фиксирующим амблиопичный глаз. При этом остроту зрения снижают оптически или фармакологически, не осложняя пациенту жизнь полной окклюзией ведущего глаза, так что он сохраняет некоторые преимущества бинокулярного восприятия. Кроме пенализации, из традиционных процедур к МБТ можно с полным основанием причислить и ряд упражнений на синоптофоре.

Основанием для введения новых терминов послужило совершенствование методологии функционального лечения бинокулярных расстройств, которое обусловлено успехами в исследовании нейрональной структуры и нейрофизиологии бинокулярной зрительной системы человека, а также внедрением в офтальмологическую практику компьютерных технологий. Вопросы классификации МБТ и их оптимального применения до сих пор детально не обсуждались, и существующие мнения относительно эффективности МБТ противоречивы.

Приведенная в настоящей статье информация о программе КЛАСС показывает, что фактически еще в прошлом веке в ИППИ РАН была создана ИКП для лечения амблиопии, являющаяся классическим примером тех методов, которые позднее в зарубежной литературе стали называть МБТ. В

частности, идея процедуры “Подсвет” из программы КЛАСС аналогична введенному за рубежом значительно позже методу диоптрической балансировки контраста (“dichoptic contrast balancing”). Согласно отчету Американской академии офтальмологии, разновидность балансировки контраста, заключающаяся в снижении контраста в изображениях для доминантного глаза (чтобы уменьшить его подавляющее влияние на амблиопичный глаз до уровня равноправного участия обоих глаз в решении заданной зрительной задачи), была впервые использована в 2010 г. в работе (Hess et al., 2010). В программе КЛАСС стимуляция амблиопичного глаза к участию в формировании бинокулярных образов достигалась аналогичным и, по-видимому, более эффективным методом. В основе этого метода также лежит изменение контраста, но не его снижение в лучшем глазу (как в работе Hess et al., 2010), а повышение в амблиопичном глазу, что создает более сильный стимул для использования мозгом информации от амблиопичного глаза, не ухудшая условий наблюдения лучшим глазом. Дополнительным преимуществом отечественной методики было то обстоятельство, что в качестве “лечебных” изображений в программе КЛАСС использовали СТС, и в начале лечения пациент мог узнавать тест-объект за счет яркостного контраста только амблиопичным глазом.

Можно обозначить следующие общие причины, объясняющие отсутствие консенсуса в отношении МБТ: (1)расплывчатость критериев принадлежности методов, использованных разными авторами, к классу “МБТ” (большое разнообразие вариантов, произвольно рассматриваемых как МБТ); (2)различия технических вариантов реализации даже однотипных МБТ; (3)различия условий их применения и рабочих диапазонов варьирования параметров зрительных стимулов; (4)различия временных режимов работы; (5)различия в формах работы с пациентами (обучение, инструктирование, ассистирование, участие пациентов в выборе рабочего материала и процедур и т.д.).

ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНИЗАЦИИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРТНЫХ И СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОВ ЛЕЧЕНИЯ БИНОКУЛЯРНЫХ РАССТРОЙСТВ

Отсутствие единого мнения у исследователей в отношении эффективности МБТ и результатов их сравнения с соответствующими традиционными методами свидетельствует о том, что определенные критические правила организации таких

исследований не соблюдаются. К сожалению, таких правил немало, и их несоблюдение снижает достоверность сделанных авторами выводов, а иногда и вовсе лишает их смысла. Не останавливаясь подробно на перечислении и обосновании всех требований к проведению экспертных и сравнительных исследований обсуждаемых методов, рассмотрим 4 критических требования, которые не соблюдались в выборках публикаций, обсуждавшихся в аналитических обзорах.

Необходимость единообразия всех условий проведения измерений

Совершенно очевидно, что для получения достоверных результатов лечения выбранным методом в разных клиниках или сравнения эффективности лечения разными методами в конкретном учреждении необходимо обеспечить одинаковые условия измерений. Результаты оценки любых зрительных способностей, в частности — остроты зрения, зависят не только от степени развития и состояния зрительной системы пациента, но и от множества других факторов. Все факторы, влияющие на результаты оценки остроты зрения, можно условно подразделить на 4 категории: физические, оптико-физиологические, нейрофизиологические и психологические. К физическим факторам относятся характеристики предъявляемых изображений, дистанция наблюдения, допустимое время выполнения задания и др. Оптико-физиологические факторы — это характеристики рефракции и степени прозрачности глазных сред. Нейрофизиологические факторы включают уровень развития и состояние нейронных структур сетчатки и мозговых отделов зрительной системы пациента. Многочисленные психологические факторы включают как личностные особенности пациента (характер, степень активности, настойчивость и др.), так и его психологическое состояние (степень заинтересованности, утомление, ощущение дискомфорта и т.д.). Усреднение результатов, полученных на неоднородных группах пациентов в существенно различающихся условиях — это процедура, которая может привести к неверным выводам. Необходимо учитывать, что влияние некоторых факторов может быть очень значительным, а априори оно неизвестно. Влияние определенных факторов можно предвидеть заранее и адекватно учесть при анализе. В качестве примера можно напомнить приведенные выше данные о влиянии метода сепарации изображений на измерение остроты стереозрения и фузионных резервов. При прочих равных условиях цветовой и поляризационный методы могут

дать результаты, различающиеся в 2 раза, что может критически сказаться на оценках эффективности дихоптических тренировок.

Необходимость достаточно высокой точности измерения критических показателей оцениваемых функций

В офтальмологии многие функциональные показатели принято оценивать не точно, а с ограничением по условному уровню нормы — значению, обеспечивающему беспроблемное зрение в быту. К сожалению, это может привести к неверным заключениям. Покажем такую возможность на примере лечения амблиопии, выбрав исследование, в котором острота зрения измерялась точно (Подугольникова, 2012).

На рис. 9 приведены индивидуальные данные, полученные при лечении амблиопии на программе ЦВЕТОК. У трех пациентов (№№ 5; 7 и 8) острота зрения обоих глаз после лечения превысила уровень 1.0 дес. ед. (принимаемый за условную норму), что свидетельствует о некорректности оценки исходной степени амблиопии по этому уровню. Ориентируясь на этот уровень, всех указанных пациентов не долечили бы и не уравнили бы по истинной остроте зрения глаз.

Получается, что о степени амблиопии конкретного пациента невозможно судить до конца

лечения, так как о его потенциально достижимой на данном этапе развития остроте зрения можно только гадать. Да и в конце лечения нельзя быть уверенным, что потенциально возможный уровень остроты зрения достигнут, если показатели не стабилизировались на определенном уровне, а это требует дополнительного времени занятий. Совершенно очевидно, что обсуждаемая неопределенность служит принципиальным препятствием для корректного формирования больших массивов данных в целях сравнительного анализа: объединяя и усредняя результаты разных авторов, придерживающихся разных критериев, аналитики получают нечто аналогичное “средней температуре по больнице”.

Необходимость комплексной оценки эффектов лечения

В настоящем обзоре выше приведены данные, демонстрирующие, что лечение, направленное на нормализацию определенной функции, положительно сказывается и на других функциях, т.е. лечение дает не только ожидаемые положительные эффекты, но и “побочные” бонусы. На рис. 10 показано распределение пациентов по числу улучшенных показателей в результате курса лечения с использованием программы КЛАСС для развития стереоскопического зрения на основе СТС. Как видно из рисунка, число пациентов, у которых имело место улучшение более трех

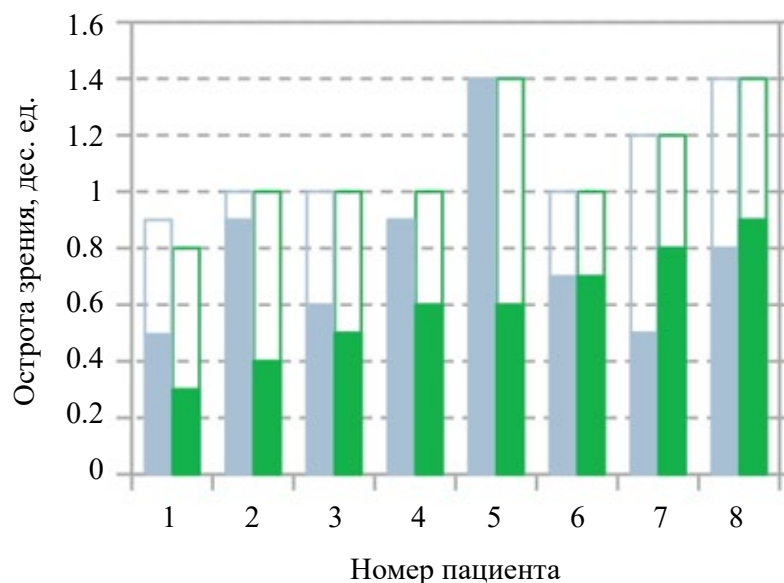


Рис. 9. Результаты точной оценки остроты зрения обоих глаз у 8 детей в возрасте от 4 до 7 лет до и после лечения с использованием компьютерной программы ЦВЕТОК. Сортировка по возрастанию исходной остроты зрения правого глаза пациентов (зеленые столбики); исходные значения остроты зрения левого глаза — серые столбики. Улучшение остроты зрения в результате тренировок обозначено соответствующими цветными контурами. Данные взяты из статьи (Подугольникова, 2012), с сокращением и пересортировкой.

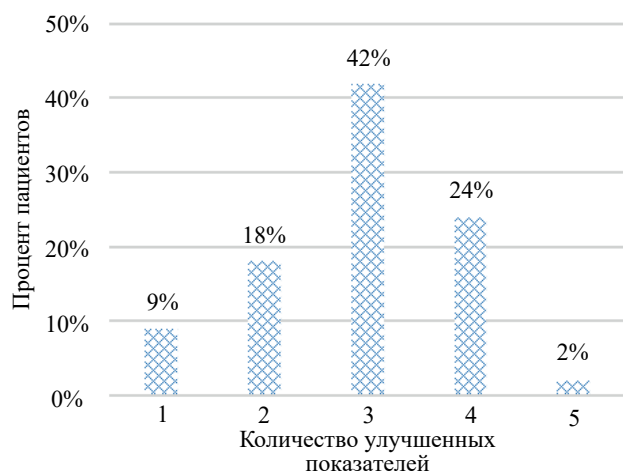


Рис. 10. Распределение пациентов с косоглазием и/или амблиопией (105 детей 3–10 лет) по числу показателей бинокулярного зрения, улучшенных в результате лечения с использованием программы КЛАСС при ее апробации.

показателей, составило 68% (42+24+2). В наглядной (“геометрической”) форме это показано выше.

Очевидно, что при сравнении эффективности разных методов лечения нужно учитывать суммарное позитивное изменение зрительных функций.

Необходимость формирования однородных по диагнозу и другим показателям групп пациентов

В последние десятилетия стали появляться работы, в которых авторы разделяют группы пациентов с разными видами амблиопии, что приводит к достоверному обнаружению различий в эффективности конкретных методов лечения для этих групп (Hamm et al., 2014; Levi et al., 2015; Deshpande et al., 2018). Кроме того, показано, что, используя более однородные группы, сформированные на основании точной диагностики вида амблиопии, можно выявлять закономерности, которые ранее не удавалось регистрировать в смешанных группах. Например, в работе (Горев и др., 2024) были обнаружены хорошо согласующиеся изменения в зрительных зонах коры головного мозга у всех исследованных пациентов с левосторонней анизотропической амблиопией по данным структурной МРТ и функциональной МРТ покоя. Современная МРТ-диагностика обеспечила значительный прогресс в диагностике амблиопии и ее типов (например, Joly, Frankó, 2014; Mendola et al., 2005; 2018; Miki et al., 2003; Wang et al., 2022).

Очевидно, что успешность сравнительного исследования существенно зависит от степени однородности групп пациентов.

ОБЩИЕ ЗАКЛЮЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРОВЕДЕННОГО АНАЛИЗА

Безосновательность сомнений относительно пользы компьютерного лечения

Прежде всего, в свете всей совокупности накопленных к настоящему времени данных, следует подчеркнуть безосновательность сомнений относительно пользы компьютерного лечения, высказываемых в докладах Американской академии офтальмологии и статьях отдельных авторов. Неоспоримые преимущества такого лечения активно обсуждались еще при его зарождении и формулировались в виде утверждений, против которых ничего возразить.

– ИКП могут успешно заменить целый комплект существующих приборов для реабилитации, восстановления и развития нарушенных бинокулярных зрительных функций, обеспечивая при этом мониторинг проводимого лечения путем оценки показателей состояния пациента на разных этапах лечения и регистрацию параметров процедур для последующего анализа наблюдаемых закономерностей.

– ИКП позволяют реализовать бесконечно разнообразные новые методы лечения, требующие сложных пространственно-временных паттернов зрительной стимуляции.

– ИКП обеспечивают возможность индивидуальной оптимизации процедур путем подбора наилучших для каждого пациента параметров стимуляции.

– Благодаря своему интерактивному характеру ИКП позволяют превращать процесс лечения в увлекательную игру.

– ИКП гарантируют каждому ребенку ощущение успеха за счет выбора посильных заданий, повышают его уверенность в себе, мотивацию, поддерживают желание продолжать тренировки.

– ИКП минимизируют отрицательные эмоции в случае неудач: компьютер бесконечно терпелив, не сердится, не ругает за ошибки.

– Задаваемый программами ритм и регламент упражнений дисциплинирует ребенка, во всех

случаях дополнительно развивает внимание и память.

— Лечение с использованием ИКП можно проводить не только в медицинских учреждениях, но и дома, что особенно важно для дошкольников и при интенсивных курсах лечения, предполагающих несколько сеансов в день.

Недостатки MEGA- и МЕТА-анализа публикаций

К сожалению, корректное сравнение эффективности различных методов лечения амблиопии по литературным источникам затруднено из-за неполноты и разноплановости приводимых данных относительно числа и длительности сеансов, продолжительности всего курса лечения и других деталей, определяющих возможность адекватной оценки результатов.

Даже для людей с нормальным бинокулярным зрением проблематично (а нередко и невозможно) привести корректные количественные средние данные по результатам выполнения конкретных зрительных и зрительно-моторных задач в условиях монокулярного и бинокулярного наблюдения. Принципиальной причиной этого является практическая невозможность достаточно полно охарактеризовать “качество” зрительной системы всех участников эксперимента (или обследования) при современном весьма невысоком качестве мониторинга бинокулярного зрения, которое пока не оценивается с необходимой точностью и регулярностью ни у детей, ни у взрослых ни в одной стране мира, даже в самых крупных офтальмологических центрах. Это связано как с чрезвычайной сложностью структурно-функциональной организации бинокулярной зрительной системы человека и продолжительным периодом ее развития, так и с отсутствием нормативных данных по каждому из десятков (если не сотен) доступных для измерения показателей, относительная информативность и важность которых пока не изучена в достаточной для практических рекомендаций степени.

В отношении пациентов с нарушенным бинокулярным зрением проблема достаточно полного описания состояния зрительной системы осложняется индивидуальными особенностями нарушений и их полимодальностью, что затрудняет разработку стандартных процедур оценки эффекта лечения. Это особенно заметно сказывается при внедрении новых методов лечения (в том числе относящихся

к МБТ), для которых информация об эффективности накапливается не так быстро.

Необходимость уточнения понятий на примере методов бинокулярной терапии

Рассматривая используемые в настоящее время традиционные и новые методы лечения амблиопии и косоглазия в свете появления терминов “методы бинокулярной терапии”, “дихоптическое лечение” и “дихоптические тренировки”, легко обнаружить некоторые отличительные признаки традиционных и новых методов, но они не вполне отвечают понятию четкого критерия. Эти признаки отражают не столько суть терапевтических процедур, сколько формулировки их назначения.

— Во-первых, нет причин рассматривать обсуждаемые современные МБТ как качественно отличающиеся от аналогичных традиционных методов лечения расстройств бинокулярного зрения, например, с использованием пенализации или синоптофора.

— Во-вторых, при детальном рассмотрении работы зрительной системы с двумя зрячими глазами (хотя и различающимися по качеству зрения) неизбежно следует вывод, что чисто монокулярной терапии не существует в принципе, то есть подавляющее большинство традиционных методов функционального лечения следует относить к МБТ, поскольку любой зрячий глаз, даже не подвергающийся специальному воздействию, всегда вносит вклад в процесс зрительного восприятия.

Необходимость нового подхода к оценке результативности функционального лечения

Как подчеркивалось выше, провести корректный сравнительный анализ результатов, полученных при функциональном лечении амблиопии и косоглазия в разных клиниках, представляется нереальным, поскольку практически невозможно уравнивать все условия, которые могут критически повлиять на показатели успеха лечения. Проблема корректного сопоставления данных разных исследований связана прежде всего с тем, что в публикациях либо нет всех необходимых сведений, либо они не заслуживают полного доверия.

При существующем неполном описании заболеваний нет смысла усреднять недоопределенные случаи, фактически смешивая очень удачные результаты лечения, неудачные и даже негативные вместо того, чтобы разделить их и попытаться найти причины удач и неудач для последующих

рекомендаций. Как показывает пример исследований, выполненных на группах пациентов, сформированных по принципу максимальной однородности (см., например, Горев и др. 2024; Levi, 2006; Levi et al., 2015), при этом удастся обнаружить явные закономерности и разобраться в особенностях патогенеза.

Необходимо принимать во внимание все позитивные изменения, получаемые в итоге функционального лечения, что требует постоянного взаимодействия между клиницистами и учеными. Чем дальше прогрессируют практическая медицина и научные исследования зрительной системы, тем очевиднее, что объем информации в каждой из этих областей становится слишком огромным для его полноценного усвоения, анализа и успешного применения без выполнения совместных проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нет никаких оснований сомневаться в эффективности компьютеризированных процедур функционального лечения амблиопии и косоглазия, которые с конца прошлого века уже более 30 лет успешно используются в лечебной практике.

К настоящему моменту в результате развития и совершенствования стереотехнологий накопилось много перспективных неиспользованных возможностей для более комфортной, эффективной и интересной реализации традиционных процедур функционального лечения амблиопии и косоглазия.

Проведенные рекогносцировочные исследования демонстрируют целесообразность внедрения новых технологий и неисчерпаемые возможности для творческой работы по созданию новых схем и нового дизайна диагностических и тренировочных процедур с вовлечением в процесс всех заинтересованных в положительном результате участников, включая пациентов.

Отдельные неудачи использования ИКП и неопределенность сделанных аналитиками выводов связаны либо с некорректным использованием программ, либо с неадекватной обработкой данных.

Современные стереотехнологии очень быстро модифицируются и имеют особенности, которые нужно учитывать, что подразумевает необходимость постоянного слежения за обновлениями,

обучения кадров и создания координационного научно-практического центра.

Для адекватной оценки эффективности лечения нужно использовать многомерные критерии, учитывающие всю совокупность полученных результатов (а не только повышение остроты зрения и достижение правильной установки глаз). Комплексные показатели эффективности разных методов имеет смысл сравнивать только при одинаковой патологии по характеру и степени нарушений, причем обращать внимание нужно не столько на средние, сколько на лучшие результаты.

По мнению клиницистов и исследователей, успешно работающих с сертифицированными и зарегистрированными в Реестре программами для ЭВМ, совершенствованию компьютерных методов на данном этапе больше всего мешает распространение некорректно работающих пиратских версий. Безрезультатные попытки их использования доверчивыми пациентами не только вызывают у них досаду, но и могут принести вред как самим лечащимся, так и разработчикам.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ НОРМ

Данный тип обзорного исследования не предполагал процедур, требующих этического одобрения.

ИНФОРМИРОВАННОЕ СОГЛАСИЕ

Информированное согласие не требовалось в связи с обзорным характером исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

УЧАСТИЕ АВТОРОВ

Концепция и идея работы – Г.И.Р.
Поиск и анализ литературы – Г.И.Р., М.А.Г., Н.Н.В., А.В.Б., Н.Е.К., И.Е.Х.
Создание иллюстраций – Г.И.Р., А.В.Б., Т.А.П.

Написание основного текста — Г.И.Р. и М.А.Г., добавления в отдельные разделы — Н.Н.В., Т.А.П., Б.А.В.

Вычитка и коррекция финальной версии текста — Г.И.Р., Т.А.П., М.А.Г., Н.Н.В., А.В.Б., Н.Е.К., И.Е.Х.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Тимониной Елене Владимировне и Кузнецовой Ирине Николаевне за техническую помощь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдеева А.А. *Восстановление зрительных функций при амблиопии и органических заболеваниях глаз методом активного биоуправления и саморегуляции в условиях обратной биологической связи*. Дис. ...канд. мед. наук. М., 2000. 195 с.
- Аветисов С.Э., Кашенко Т.П., Шамшинова А.М. *Зрительные функции и их коррекция у детей*. М.: Медицина, 2005. 872 с.
- Алексеев С.В., Шкорбатова П.Ю. Депривационная и дисбинокулярная амблиопия: нарушения в геникуло-корковых зрительных путях. *Альманах клинической медицины*. 2015. № 36. С. 97-100.
- Базарный В.Ф. *Зрение у детей. Проблемы развития*. Новосибирск: Наука, 1991. 138 с.
- Белозеров А.Е. Компьютерный метод исследования пространственно-частотных компонент стереопсиса. *Современные аспекты нейроофтальмологии. Материалы III Московской научно-практической нейроофтальмологической конференции*. М.: НИИ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко РАМН, 1999. С. 10-11.
- Белозеров А.Е. Компьютерные методы функциональной диагностики и лечения в офтальмологии. *Клиническая физиология зрения*. Под ред. А.М. Шамшиновой, А.А. Яковлева, Е.В. Романовой. М.: Научно-медицинская фирма МБН, 2002. С. 236-259.
- Белозеров А.Е. Компьютерные методы функциональной диагностики и лечения в детской офтальмологии. *Зрительные функции и их коррекция у детей: Руководство для врачей*. Под ред. С.Э. Аветисова, Т.П. Кашенко, А.М. Шамшиновой. 2005. М.: Медицина, 2005. С. 268-309.
- Белоусов Н.К., Арзамасцев А.А. Программный комплекс для обеспечения видео-компьютерной коррекции зрения у детей. *Вестник Тамбовского университета*. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18. № 5. С. 2946.
- Большаков А.С., Грачева М.А. *Интерактивная тестовая программа для оценки остроты стереозрения "СТЕРЕОПОРГ"*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012660683 от 28.11.2012.
- Большаков А.С., Грачева М.А., Рожкова Г.И. *Интерактивная программа для повышения остроты зрения и скорости зрительной работы при амблиопии "ПОИСК"*. 2013а. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610976 от 09.01.2013.
- Большаков А.С., Кочегарова Т.Д., Исакова Н.А. Об опыте лечения амблиопии при помощи программы "ПОИСК", входящей в состав компьютерного комплекса 3D-БИС. *XI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием "Федоровские чтения — 2013"*. М.: Офтальмология. 2013б. С. 60.
- Большаков А.С., Рожкова Г.И. *Интерактивная тестовая программа для оценки состояния и тренировки фузионных механизмов бинокулярного зрения "ФУЗИЯ"*. 2013. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610975 от 09.01.2013.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И., Грачева М.А., Большаков А.С. Зависимость результатов оценки фузионных резервов от метода измерения, инструментария и параметров тестовых стимулов. *Сенсорные системы*. 2022. Т. 36. № 3. С. 199-217. <https://doi.org/10.31857/S023500922203009X>
- Волков В.В. Показатели визо- и рефрактометрии в оценке зрительной работоспособности. *Офтальмол. журн.* 1986. № 8. С. 455-458.
- Волков В.В. Психофизиология зрительного процесса и методы его изучения. *Клиническая физиология зрения. Сборник научных трудов*. М.: РУСОМЕД, 1993. С. 158-179.
- Вульф Д.М. Скрытые зрительные процессы. *В мире науки*. 1983. № 4. С. 26-34.
- Глезер В.Д. Кусочный Фурье-анализ изображений и роль затылочной, височной и теменной коры в зрительном восприятии. *Физиол. журн. СССР им. И.М. Сеченова*. 1978. Т. 64. № 12. С. 1719-1730.
- Глезер В.Д. *Зрение и мышление*. Л.: Наука, 1985. 246 с.
- Глезер В.Д. О роли пространственно-частотного анализа, примитивов и межполушарной асимметрии в опознании зрительных образов. *Физиология человека*. 2000. Т. 26. № 5. С. 145-150.
- Гончарова С.А., Петруня А.М., Пантелеев Г.В., Тырлова Е.И. Вторичное косоглазие. *Офтальмологический журнал*. 2010. № 3. С. 25-29.
- Горев В.В., Горбунов А.В., Паникратова Я.Р., Томышев А.С., Хаценко И.Е., Кулешов Н.Н., Салмси Ж.М., Хасанова К.А., Балашова Л.М., Лобанова Е.И., Лебедева И.С. Изменения в зрительных зонах коры головного мозга у детей при левосторонней анизотропической амблиопии по данным структурной МРТ и функциональной МРТ покоя.

- Сенсорные системы*. 2024. Т. 38. № 1. С.30-44. <https://doi.org/10.31857/S0235009224010027>
- Грачева М.А. *Применение современных 3D-технологий для оценки стереозрения и его коррекции*. Автореф. канд. биол. наук. М., 2017. 26 с.
- Грачева М.А., Большаков А.С. Современные шлемы виртуальной реальности: причины появления дискомфорта и способы их исправления. *Киномеханик сегодня*. 2016. № 6. С. 30-35.
- Грачева М.А., Большаков А.С., Крутцова Е.Н., Николаев Д.П. Стереотехнологии: сепарация изображений, история развития методов, современные применения. *Стереозрение человека и стереотехнологии*. М.: ООО "КУНА", 2022. С. 24-36.
- Грачева М.А., Рожкова Г.И. Стереострота зрения: основные понятия, методы измерения, возрастная динамика. *Сенсорные системы*. 2012. Т. 26(4). С. 259–279.
- Ефимова Е.Л. *Компьютерные плеопто-ортоптические методы лечения вторичной амблиопии у детей*. Автореф. дис. ... канд. мед. наук, 14.00.07. СПб.; 2011. 20 с.
- Кононова Н.Е., Сомов Е.Е. Клиника и лечение детей дошкольного возраста с монолатеральным и альтернирующим содружественным косоглазием. *Российская детская офтальмология*. 2020. 2. С. 7–11. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2020-2-7-11>
- Кононова Н.Е., Сомов Е.Е., Ефимова Е.Л. К вопросу о клинической сути содружественного косоглазия, функциональных нарушениях и пространстве в популяции. *Российская детская офтальмология*. 2023. 2. С. 52–60. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-2-52-60>
- Кувшинова О.В., Уткина О.А., Дергачева Н.Н., Медведева А.И. Восстановление зрительных функций у пациентов с рефракционной амблиопией в условиях виртуальной окклюзии при использовании компьютерной программы, разработанной на базе 3D технологий. *Вестник совета молодых ученых и специалистов Челябинской области*. 2017. Т. 3. № 4(19). С. 61-63.
- Кузнецов Ю.В. *Назначение расстояния между оптическими центрами линз в очках*. СПб: ООО "РА "ВЕКО"", 2009. 104 с.
- Куман И.Г. *Исследование нейрофизиологических механизмов односторонней амблиопии*. Автореф. канд. биол. наук. М., 1984. 23 с.
- Лебедева И.С., Хаценко И.Е., Стуров Н.В., Гусева М.Р., Лобанова И.В., Выхристюк О.Ф., Кюн Ю.А., Томышев А.С. Структурные особенности головного мозга ребенка при односторонней амблиопии: МРТ-исследование. *Журнал неврологии и психиатрии им С.С. Корсакова*. Спецвыпуски. 2018. Т. 118. № 5-2. С. 69-74. <https://doi.org/10.17116/jnevro20181185269>
- Майоров Н.А. Самые первые в истории развития мирового кинематографа (часть 1). *Мир техники кино*. 2018а. Т. 12. № 2. С. 38-40.
- Майоров Н.А. Самые первые в истории развития мирового кинематографа (часть 2). *Мир техники кино*. 2018б. Т. 12. № 3. С. 37-40.
- Новицкая В.А., Карякина О.Е., Карякин А.А., Оруджова О.Н. Компьютерная программа для восстановления зрительных функций у детей с амблиопией. *Современные наукоемкие технологии*. 2022. № 4. С. 68-73.
- Пильман Н.И. *Функциональное лечение косоглазия у детей*. Киев: Здоров'я, 1964. 225 с.
- Пильман Н.И. *Исправление косоглазия у детей*. Киев: Здоров'я, 1979. 144 с.
- Подугольникова Т.А. Повышение остроты зрения при амблиопии с помощью перцептивного обучения. *Дефектология*. 2012. № 4. С. 31-37.
- Подугольникова Т.А., Рожкова Г.И., Кононов В.М. Использование компьютерного комплекса "Академик" для функционального лечения нарушений бинокулярного зрения. *Современные проблемы детской офтальмологии. Материалы юбилейной научной конференции, посвященной 70-летию кафедры детской офтальмологии Санкт-Петербургской государственной педиатрической медицинской академии Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию*. СПб., 2005. С. 145-147.
- Рожкова Г.И., Грачева М.А. Естественный хромостероопсис: причины и индивидуальные вариации бинокулярных пространственных цветовых эффектов. *Сенсорные системы*. 2014. Т. 28. № 1. С. 3-14.
- Рожкова Г.И., Кононов В.М. Оптико-физиологические основы использования интерактивных компьютерных программ в функциональном лечении косоглазия. *Современные проблемы детской офтальмологии. Материалы юбилейной научной конференции, посвященной 70-летию кафедры детской офтальмологии Санкт-Петербургской государственной педиатрической медицинской академии Федерального агентства по здравоохранению и социальному развитию*. СПб, 2005. С. 121-124.
- 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., Матвеев С.Г. *Зрение детей: проблемы оценки и функциональной коррекции*. М.: Наука, 2007. 315 с.
- 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., Подугольников Т.А., Лешкевич И.А., Носов В.Н., Матвеев С.Г. Компьютерное лечение косоглазия и амблиопии с применением случайно-точечных стереограмм. *Вестник офтальмологии*. 1998. Т. 114 (4). С. 28-32.
- Рожкова Г.И., Подугольников Т.А. Применение интерактивных компьютерных программ для восстановления и развития бинокулярных функций. *Актуальные проблемы социализации инвалидов по зрению*. СПб.: Издательство РГПУ им. А.И. Герцена, 1999. С. 73-78
- Рожкова Г.И., Подугольников Т.А., Токарева В.С. Компьютерные методы функционального лечения амблиопии и косоглазия: необходимость использования принципиально новых подходов и критериев. *Материалы международной научно-практической конференции: Охрана зрения детей Украины в рамках выполнения программы ВОЗ "Зрение-2020" с практическим семинаром "Живая хирургия"*. Киев, 2005. С. 261-264.
- Рожкова Г.И., Подугольников Т.А., Токарева В.С., Воронцов Д.Д., Голубков М.Г., Дрыгин С.В. *Интегрированный лечебно-диагностический комплекс программ "АКАДЕМИК"*. 1996. Сертификат соответствия "РОСС RU. СП07.Н00035".
- 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.
- 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.
- Рожкова Г.И., Токарева В.С., Ващенко Д.И., Васильева Н.Н. Возрастная динамика остроты зрения у школьников. I. Бинокулярная острота зрения для дали. *Сенсорные системы*. 2001. Т. 15. № 1. С. 54-60.
- Сенько И.В., Рычкова С.И., Грачева М.А., Тахчиди Х.П. Развитие бинокулярных функций у пациентов с косоглазием путем воздействия на функциональную скотому компьютерными методами. *Сенсорные системы*. 2016. Т. 30. № 4. С. 319-325.
- Сергиевский Л.И. *Содружественное косоглазие и гетерофории. Профилактика, диагностика, лечение без операции*. М.: Медгиз, 1951. 244 с.
- Сомов Е.Е. *Методы офтальмоэргоники*. Л.: Наука, 1989. 157 с.
- Тарутта Е.П., Хубиева Р.Р., Милаш С.В., Апаев А.В., Аклаева Н.А., Зольникова И.В. Новый метод лечения амблиопии у детей с неустойчивой центральной и нецентральной фиксацией с помощью биологической обратной связи. *Российский офтальмологический журнал*. 2022. Т. 15. № 2. С.109-119. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-109-119>
- Татаринев С.А., Кашенко Т.П., Амелянова С.Г., Авученкова Т.Н., Галич В.И., Белозерова А.Е., Тимохова Г.П., Шапиро В.М. *Восстановление зрительных функций при амблиопии и косоглазии с помощью программно-аппаратного комплекса "eYe". Методические рекомендации*. М.: МНИИ ГБ, 1996. 10 с.
- Тимошенко Т.А., Штилерман А.Л. Результаты лечения рефракционной амблиопии высокой степени у детей с использованием методов когнитивной модуляции остроты зрения и электростимуляции. *Российский офтальмологический журнал*. 2014. Т. 7 (1). С. 45-49.
- Туманова О.В., Медведев И.Б., Михайленок Е.Л. Лечение амблиопии методом когнитивной модуляции остроты зрения. *Глаз*. 2001. (6). С. 31-35.
- Туманян С.А., Кечек А.Г. *Способ коррекции зрительных функций*. Патент РФ А.С. № 2070011. БИ № 34. Дата публикации 10.12.1996.
- Туманян С.А., Богданов О.В., Михайленок Е.Л., Мовсисянц С.А. Использование приемов функционального биоуправления в комплексном лечении амблиопии. *Вестник офтальмологии*. 1993. Т. 109. № 4. С. 11-13.
- Федеральные клинические рекомендации "Диагностика и лечение содружественного косоглазия". *Российская педиатрическая офтальмология*. 2015. № 2. С. 56-63.
- Хаценко И.Е., Рожкова Г.И., Грачева М.А., Салмаси Ж.М., Балашова Л.М. Патогенез и описание амблиопии. Часть 1. Причины эволюции представлений. *Российская детская офтальмология*. 2023а. № 3. С. 37-47. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-3-37-47>
- Хаценко И.Е., Рожкова Г.И., Грачева М.А., Салмаси Ж.М., Балашова Л.М. Патогенез и описание амблиопии. Часть 2. Анализ определений. *Российская детская офтальмология*. 2023б. № 3. С. 48-54. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-3-48-54>
- Хватова Н.В., Слышалова А.Е., Вакурина А.Е. Амблиопия: зрительные функции, патогенез и принципы лечения. *Зрительные функции и их коррекция у детей*. Под ред. С.Э. Аветисова, Т.П. Кашенко, А.М. Шамшиновой. М.; 2005: 202— 220.
- Хьюбел Д. *Глаз, мозг, зрение*. Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 239 с.
- Чернышева С.Г., Самедова Д.Х. Структура и причины неудовлетворительных результатов хирургического лечения содружественного косоглазия. *Oftalmologiya*. 2013. Т. 1. № 11. С. 158-164.
- Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И. *Визо-контрастометрия*. Л.: Наука, 1985. 103 с.

- Achtman R., Green C., Bavelier D. Video games as a tool to train visual skills. *Restorative Neurology and Neuroscience*. 2008. V. 26(4-5). P. 435–446.
- Agarwal A. Axial angles of the eye. Textbook of ophthalmology. Jaypee Brothers Medical Publishers. 2002. P. 422–423.
- Andalib D., Nabie R., Poormohammad B. Factors Affecting Improvement of Stereopsis Following Successful Surgical Correction of Childhood Strabismus in Adults. *Strabismus*. 2015. V. 23(2). P. 80–84. <https://doi.org/10.3109/09273972.2015.1025985>. PMID: 26158474
- Asper L. Optical treatment of amblyopia: a systematic review and meta-analysis. *Clinical and Experimental Optometry*. 2018. P. 1–12.
- Astle A.T., McGraw P.V., Webb B.S. Can human amblyopia be treated in adulthood? *Strabismus*. 2011. V. 19 (3). P. 99–109. <https://doi.org/10.3109/09273972.2011.600420>
- Atkinson J. *The developing visual brain*. N.Y.: Oxford Univ. press, 2000. 211 p.
- Barry S.R. *Fixing my gaze: A scientist's journey into seeing in three dimensions*. 2009. 272 p.
- Barry S.R. Beyond the critical period: Acquiring stereopsis in adulthood. In: Steeves J.K.E., Harris L.R., eds. *Plasticity in Sensory Systems*. Cambridge University Press; 2012. P. 175–195. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139136907.010>
- Barry S.R., Bridgeman B. An assessment of stereovision acquired in adulthood. *Optom. Vis. Sci.* 2017. V. 94. P. 993–999. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001115>
- Bennett A.G., Rabbets R.B. *Clinical visual optics*. London: Butterworth-Heinemann, 1998. 451 p.
- Birch E.E., Gwiazda J., Held R. Stereoacuity development for crossed and uncrossed disparities in human infants. *Vision Res.* 1982. V. 22. P. 507–13.
- Birch E.E., Li S.L., Jost R.M., et al. Binocular iPad treatment for amblyopia in preschool children. *JAAPOS*. 2015. V. 19. P. 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2014.09.009>
- Bolshakov A., Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G., Amblyopia treatment: Advantages of virtual occlusion based on a contemporary 3D technique. *Perception*. 2016. V. 45, Suppl. P. 301–302.
- Bonfanti S., Gargantini A. Amblyopia rehabilitation by games for low-cost virtual reality visors. *International Workshop on ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research Techniques*. Cham : Springer International Publishing, 2015. P. 116–125.
- Braddick O., Atkinson J. Some recent findings on the development of human binocularity: A review. *Behav. Brain Res.* 1983. V. 10(1). P. 141–150. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(83\)90160-2](https://doi.org/10.1016/0166-4328(83)90160-2)
- Braddick O., Atkinson J., Julesz B., Kropfl W., Bodis-Wollner I., Raab E. Cortical binocularity in infants. *Nature*. 1980. V. 228. P. 363–365. <https://doi.org/10.1038/288363a0>
- Bridgeman B., Barry S.R. Survey of patients with stereopsis acquired as adults. *Vis Rev Rehabil.* 2015. V. (1). P. 13.
- Buffon Comte de (Leclerc G.L.). Dissertation sur la cause du strabisme ou deux yeux louches. *Memoires de Mathématique et de Physique de l'Académie Royale des Sciences*. 1743. P. 231–248.
- Campbell F.W., Hess R.F., Watson P.G., Banks R. Preliminary results of a physiologically based treatment of amblyopia. *Brit. J. Ophthalmol.* 1978. V. 62(11). P. 748–755.
- Campbell F.W., Robson J. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *J. Physiol.* 1968. V. 197(3). P. 551–561.
- Cleary M., Moody A.D., Buchanan A., Stewart H., Dutton G.N. Assessment of a computer-based treatment for older amblyopes: the Glasgow Pilot Study. *Eye (Lond)*. 2009. V. 23(1). P. 124–131. <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6702977>
- Deshpande P.G., Bhalchandra P.C., Nalgirkar A.R., Tathe S.R. Improvement of visual acuity in residual meridional amblyopia by astigmatic axis video games. *Indian J Ophthalmol.* 2018. V. 66(8). P. 1156–60.
- Gargantini A., Bana M., Fabiani F. Using 3D for rebalancing the visual system of amblyopic children. *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. 2011. P. 1–7.
- Gifford S.R. Some notes on the treatment of strabismus. *Br J Ophthalmol.* 1935. V. 19. P. 148–151.
- Hamm L.M., Black J., Dai S., Thompson B. Global processing in amblyopia: a review. *Front Psychol.* 2014. V. 5. Article 583. P. 1–21.
- 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. <https://doi.org/10.1038/eye.2013.113>
- Hess R.F., Thompson B., Black J.M., Machara G., Zhang P., Bobier W.R., Cooperstock J. An iPod treatment for amblyopia: An updated binocular approach. *Optometry*. 2012. V. 83 P. 88–94. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2011.08.013>
- Hess R.F., Mansouri B., Thompson B. A new binocular approach to the treatment of amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development. *Restor Neurol Neurosci.* 2010. V. 28. P. 793–802. <https://doi.org/10.3233/RNN-2010-0550>
- Hess R.F., Thompson B., Gole G., Mullen K.T. Deficient response from the lateral geniculate nucleus in humans with amblyopia. *The European Journal of Neuroscience*. 2009. V. 29(5). P. 1064–1070. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06650.x>
- Holmes J.M., Manh V.M., Lazar E.L. et al. Effect of a binocular iPad game vs part-time patching in children aged 5 to 12 years with amblyopia: a randomized clinical

- trial. *JAMA Ophthalmol.* 2016. V. 134. P. 1391-1400. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4262>
- Hubel D.H., Wiesel T.N. Brain mechanisms of vision. *Scientific American.* 1979. V. 241. P. 150-162.
- Joly O., Frankó E. Neuroimaging of amblyopia and binocular vision: A review. *Frontiers in Integrative Neuroscience.* 2014. V. 8. Article 62. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00062>
- Kelly K.R., Jost R.M., Dao L., Beauchamp C.L., Leffler J.N., Birch E.E. Binocular iPad game vs patching in children. A Randomized Clinical Trial. *JAMA Ophthalmol.* 2016. V. 134(12). P. 1402-1408. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4224>
- Koc I., Bagheri S., Chau R. K., Hoyek S., Shousha N.A., Mahmoudinezhad G., Falcone M.M., Oke I., Hunter D.G., Patel N.A. Cost-effectiveness Analysis of Digital Therapeutics for Amblyopia. *Ophthalmology.* 2025. V. 132(6). P. 654-660 <https://doi.org/10.1016/j.opthta.2024.12.037>
- Kononov V.M., Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I. Improvement of binocular vision by means of interactive software. *Perception.* 2006. V. 35. Suppl. P. 171-172.
- 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>
- Lang, J.I., Lang, T.J. Eye Screening with the Lang Stereotest. *American Orthoptic Journal.* 1988. V. 38(1). P. 48-50. <https://doi.org/10.1080/0065955X.1988.11981769>
- Leffler C.T., Vaziri K., Schwartz S.G., Cavuoto K.M., McKeown C.A., Kishor K.S., Janot A.C. Rates of reoperation and abnormal binocularity following strabismus surgery in children. *Am J Ophthalmol.* 2016. V. 162. P. 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2015.10.022>
- 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. 114. P. 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.002>
- Levi D.M. Rethinking Amblyopia 2020. *Vision Res.* 2020. V. 176. P. 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.07.014>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.01.059>
- 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 (Lond).* 2014. V. 28. P. 1246-1253. <https://doi.org/10.1038/eye.2014.165>
- 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>
- Manh V.M., Holmes J.M., Lazar E.L., Kraker R.T., Wallace D.K., Kulp M.T., Galvin J.A., Shah B.K., Davis P.L. A randomized trial of a binocular iPad game versus part-time patching in children aged 13 to 16 years with amblyopia. *Am. J. Ophthalmol.* 2018. V. 186. P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2017.11.017>
- Mallah K. El., Chakravarthy U., Hart P.M. Amblyopia: is visual loss permanent? *Br J Ophthalmol.* 2000. V. 84(9). P. 944-945. <https://doi.org/10.1136/bjo.84.9.952>
- Mendola J.D., Ian P., Conner I.P., Roy A., Chan S-T., Schwartz T.L., Odom J.V., Kwong K.K. Voxel-Based Analysis of MRI Detects Abnormal Visual Cortex in Children and Adults With Amblyopia. *Human Brain Mapping.* 2005. V. 25(2). P. 222-236. <https://doi.org/10.1002/hbm.20109>
- Mendola J.D., Lam J., Rosenstein M., Lewis L.B., Shmuel A. Partial correlation analysis reveals abnormal retinotopically organized functional connectivity of visual areas in amblyopia. *Neuroimage Clin.* 2018. V. 18. P. 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.01.022>
- Miki A., Liu G.T., Goldsmith Z.G., Liu C.-S.J., Haselgrove J.C. Decreased activation of the lateral geniculate nucleus in a patient with anisometric amblyopia demonstrated by magnetic resonance imaging. *Ophthalmologia.* 2003. V. 217 (5). P. 365-369. <https://doi.org/10.1159/000071353>
- Newsham D. Parental non-concordance with occlusion therapy. *Br. J. Ophthalmol.* 2000. V. 84(9). P. 957-962.
- Noah S., Bayliss J., Vedomurthy I., Nahum M., Levi, D., Bavelier D. Comparing dichoptic action video game play to patching in adults with amblyopia. *Journal of vision.* 2014. V. 14(10). P. 691-691. <https://doi.org/10.1167/14.10.691>
- Obukhov A., Kutimova E., Matrosova J., Teselkin D., Shilcin M. Medical VR Simulator for Pediatric Strabismus Treatment. *Technologies.* 2024. V. 12. P. 228. <https://doi.org/10.3390/technologies12110228>
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A comparison of atropine and patching treatments for moderate amblyopia by patient age, cause of amblyopia, depth of amblyopia, and other factors. *Ophthalmology.* 2003. V. 110 (8). P. 1632-1637. [https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(03\)00500-1](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(03)00500-1)
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A randomized trial of near versus distance activities while patching for amblyopia in children aged 3 to less than 7 years. *Ophthalmology.* 2008a. V. 115(11). P. 2071-2078. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2008.06.031>
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. Patching vs Atropine to Treat Amblyopia in Children Aged 7 to 12 Years: A Randomized Trial. *Arch Ophthalmol.* 2008b. V. 126(12). P. 1634-1642. doi:10.1001/archophthalmol.2008b.107

- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A randomized trial of atropine vs. patching for treatment of moderate amblyopia in children. *Arch Ophthalmol*. 2002. V. 120(3). P. 268-278. <https://doi.org/10.1001/archophth.120.3.268>
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. Pharmacological plus optical penalization treatment for amblyopia: results of a randomized trial. *Arch Ophthalmol*. 2009. V. 127(1). P. 22-30. [https://doi.org/10.1001/archophth.2008.520](https://doi.org/10.1001/archophth.120.3.268)
- 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>
- Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I. Restoration and improvement of stereovision by means of learning to perceive random-dot stereograms. *Perception*. 1998. V. 27 (Suppl.). P. 164.
- Polat U., Ma-Naim T., Belkin M., Sagi D. Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2004. V. 101(17). P. 6692-6697. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401200101>
- Qiu F., Wang L., Liu Y., Yu L. Interactive binocular amblyopia treatment system with full-field vision based on virtual reality. *1st International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Wuhan, China. 2007. P. 1257-1260. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2007.324>
- Repka M.X., Lum F., Burugapalli B. Strabismus, strabismus surgery, and reoperation rate in the United States from the IRIS Registry. *Ophthalmology*. 2018. V. 125(10). P. 1646-1653. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2018.04.024>
- Repka M.X., Kraker R.T., Beck R.W., Birch E., Cotter S.A., Holmes J.M., Hertle R.W., Hoover D.L. et al. Treatment of severe amblyopia with weekend atropine: results from 2 randomized clinical trials. *J AAPOS*. 2009. V. 13(3). P. 258-263. <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2009.03.002>
- Rozhkova G.I., Podugolnikova T.A., Vasiljeva N.N. Visual acuity in 5-7-year-old children: individual variability and dependence on observation distance. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2005. V. 25: 66-80.
- Sloper J. Answers and Questions about the Digital Dichoptic Treatment of Amblyopia. *Ophthalmology*. 2022. V. 129(1). P. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.08.015>
- Taylor V., Bossi M., Greenwood J.A., Dahimann-Noor A. Childhood amblyopia: current management and new trends. *Br Med Bull*. 2016. V. 119(1). P. 75-86. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldw030>
- 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*. 2011. V. 19(3). P. 280-289.
- Vaschenko D.I., Rozhkova G.I. Dynamics of visual acuity in schoolchildren. *Perception*. 1998. V. 27 (Suppl.). P. 203.
- Vedamurthy I., Nahum M., Huang S.J., Zheng F., Bayliss J., Bavelier D., Levi D.M. A dichoptic custom-made action video game as a treatment for adult amblyopia. *Vision Res*. 2015. V. 114. P. 173-187. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.04.008>
- Vitali A., Facoetti G., Gargantini A. An environment for contrast-based treatment of amblyopia using 3D technology. *IEEE 2013 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. 2013. P. 76-79. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2013.6662073>
- Waddingham P.E., Butler T.K.H., Cobb S.V., Moody A.D.R., Comaish I.F., Haworth S.M., Gregson R.M., Ash I.M., Brown S.M., Eastgate R.M., Griffiths G.D. Preliminary results from the use of the novel Interactive Binocular Treatment (I-BITTM) system, in the treatment of strabismic and anisometropic amblyopia. *Eye*. 2006. V. 20. P. 375-378. <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6701883>
- Wade N.J. Natural Historians. *Perception*. 2008. V. 37(4). P. 479-482. <https://doi.org/10.1068/p3704ed>
- Wang H., Liang M., Crewther S.G., Yin Z., Wang J., Crewther D.P., Yu T. Functional deficits and structural changes associated with visual attention network during resting state in adult strabismic and anisotropic amblyopes. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022. V. 16. Article 862703. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.862703>
- Webber A.L., Wood J. Amblyopia: prevalence, natural history, functional effects and treatment. *Clinical and Experimental Optometry*. 2005. V. 88(6). P. 365-375.
- Wei H., Zhao H., Dong F., Saleh G., X. Ye, and G. Clapworthy. A cross-platform approach to the treatment of amblyopia. *IEEE 13th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*. 2013. P. 1-4.
- Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol Rev*. 1986. V. 93(3). P. 262-282.
- Wolfe J.M., Held R. A purely binocular mechanism in human vision. *Vision Res*. 1981. V. 21(12). P. 1755-1759. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(81\)90208-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(81)90208-X)
- Wolfe J.M., Held R. Binocular adaptation that cannot be measured monocularly. *Perception*. 1982. V. 11(3). P. 287-295.
- Wolfe J.M., Held R. Shared characteristics of stereopsis and the purely binocular process. *Vision Res*. 1983. V. 23(3). P. 217-227. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90110-4)
- 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(5). P. 276-284.
- Xiao J.X., Xie S., Ye J.T., Liu H.H., Gan X.L., Gong G.L., Jiang X.X. Detection of abnormal visual cortex in children with amblyopia by voxel-based morphometry. *Am J Ophthalmol*. 2007. V. 143(3). P. 489-493. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2006.11.039>

Xiao S., Angjeli E., Wu H.C., Gaier E.D., Gomez S., Travers D.A., Binenbaum G., Langer R., Hunter D.G., Repka M.X. Randomized Controlled Trial of a Dichoptic

Digital Therapeutic for Amblyopia. *Ophthalmology*. 2022. V. 129(1). P. 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.opthta.2021.09.001>.

DEVELOPMENT OF COMPUTER METHODS IN BINOCULAR TREATMENT OF STRABISMUS AND AMBLYOPIA

G. I. Rozhkova^{1,*}, T. A. Podugolnikova¹, M. A. Gracheva¹, N. N. Vasilyeva¹, A. V. Belokopytov¹, N. E. Kononova², I. E. Khatsenko³

¹*Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich institute) RAS, Moscow, Russia*

²*Eye Diagnostic and Surgery Center, Vision Laboratory, Saint Petersburg, Russia*

³*"Morozov Children's Clinical Hospital", Moscow, Russia*

*E-mail: gir@iitp.ru

Computer methods were introduced into the practice of strabismus and amblyopia treatment in the 1990s. In Russian ophthalmological institutes, several independent groups of specialists were organized to create interactive computer programs (ICP) for diagnosis and treatment of these binocular vision disorders. This resulted in the emergence of a variety of equipment based on ICPs differing in purpose, technology of left and right image separation, and design. The main factors determining the prospects of these computer methods are achievements of the fundamental researches of the visual system, the results of using ICPs in practice, and technical innovations. However, the realization of this potential is hindered by a number of marketing and social factors that impede the exchange of important information between different groups which develop and use ICPs, as well as the lack of theoretical discussion of the general methodology, methods of ICP optimization, and conditions of using different ICPs. Due to the emergence of fundamentally new data concerning the pathogenesis and treatment of amblyopia and the possibility of successful activation of long-blocked ("dormant") binocular mechanisms in adult patients, the need to revise the current situation is acutely felt. Opinions regarding the effectiveness of computerized binocular therapy (BT) methods are contradictory: some researchers estimate it very high, while others see little or no specific benefit from BT compared to the traditional methods. In this article, some reasons explaining the lack of consensus are discussed: vague criteria of the methods belonging to the "BT class", differences in technical implementation of BT, specificity of visual stimuli and conditions of BT application, differences in patient groups and interaction with patients (such as training, instruction, assistance, encouragement, involvement in the choice of working material, etc.). The requirements for adequate expertise of each method and comparative assessment of different methods are discussed.

Keywords: binocular vision, amblyopia, strabismus, functional treatment, binocular therapy methods, dichoptic trainings

REFERENCES

- Avdeeva A.A. *Vosstanovlenie zritel'nykh funktsii pri ambliopii i organicheskikh zabolevaniyakh glaz metodom aktivnogo bioupravleniya i samoregulyatsii v usloviyakh obratnoi biologicheskoi svyazi* [Restoration of visual functions in amblyopia and organic eye diseases by active biocontrol and self-regulation in biofeedback conditions.]. PhD Thesis. Moscow, 2000. 195 p. (in Russian)
- Avetisov S.E.H., Kashchenko T.P., Shamshinova A.M. *Zritel'nye funktsii i ikh korektsiya u detei*. [Visual functions and their correction in children]. Moscow: Meditsina, 2005. 872 p. (in Russian)
- 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)
- Bazarnyi V.F. *Zrenie u detei. Problemy razvitiya* [Vision in children. Problems of development]. Novosibirsk: Nauka, 1991. 138 p. (in Russian)
- Belozerov A.E. Komp'yuternyi metod issledovaniya prostranstvenno-chastotnykh komponent stereopsisa. [Computer method of investigation of spatial-frequency components of stereopsis] *Sovremennye aspekty neurooftal'mologii. Materialy III Moskovskoi nauchno-prakticheskoi neurooftal'mologicheskoi konferentsii. M.: NII neirokhirurgii imeni akademika N.N. Burdenko RAMN*, 1999. P. 10-11. (in Russian)
- Belozerov A.E. Komp'yuternye metody funktsional'noi diagnostiki i lecheniya v oftal'mologii. [Computer methods of functional diagnostics and treatment in ophthalmology.] *Klinicheskaya fiziologiya zreniya*. Eds. A.M. Shamshinovi, A.A. Yakovleva, E.V. Romanovi. M.: Nauchno-meditsinskaya firma MBN, 2002. P. 236-259. (in Russian)
- Belozerov A.E. Komp'yuternye metody funktsional'noi diagnostiki i lecheniya v detskoj oftal'mologii. [Computer methods of functional diagnostics and treatment in

- pediatric ophthalmology] *Zritel'nye funktsii i ikh korrektsiya u detei: Rukovodstvo dlya vrachei*. Eds. S.EH. Avetisova, T.P. Kashchenko, A.M. Shamshinovoi. 2005. M.: Meditsina, 2005. P. 268-309. (in Russian)
- Belousov N.K., Arzamastsev A.A. Programmnyi kompleks dlya obespecheniya video-komp'yuternoi korrektsii zreniya u detei [Program complex for video-computer correction of vision in children]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2013. V. 18(5). P. 2946. (in Russian)
- Bol'shakov A.S., Gracheva M.A. *Interaktivnaya testovaya programma dlya otsenki ostroty stereozreniya "STEREOPOROG"* [Interactive test program for assessing stereo vision acuity "STEREOPOROG"]. Certificate of state registration of computer program № 2012660683, 28.11.2012. (in Russian)
- Bol'shakov A.S., Gracheva M.A., Rozhkova G.I. *Interaktivnaya programma dlya povysheniya ostroty zreniya i skorosti zritel'noi raboty pri ambliopii "POISK"* [Interactive program to improve visual acuity and speed of visual work in amblyopia "POISK"] 2013a. Certificate of state registration of computer program № 2013610976, 09.01.2013. (in Russian)
- Bol'shakov A.S., Kochegarova T.D., Isakova N.A. Ob opyte lecheniya ambliopii pri pomoshchi programmy "POISK", vkhodyashchei v sostav komp'yuternogo kompleksa 3D-BIS [On the experience of amblyopia treatment using the program "POISK", which is part of the 3D-BIS computer complex]. *XI Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Fedorovskie chteniya — 2013"*. M.: Oftal'mologiya. 2013b. P. 60. (in Russian)
- Bol'shakov A.S., Rozhkova G.I. *Interaktivnaya testovaya programma dlya otsenki sostoyaniya i trenirovki fuzionnykh mekhanizmov binokulyarnogo zreniya "FUZIYA"* [Interactive test program for assessing the state and training of fusional mechanisms of binocular vision "FUSIA"]. 2013. Certificate of state registration of computer program № 2013610975 ot 09.01.2013. (in Russian)
- Vasil'eva N.N., Rozhkova G.I., Gracheva M.A., Bol'shakov A.S. Zavisimost' rezul'tatov otsenki fuzionnykh rezervov ot metoda izmereniya, instrumentariya i parametrov testovykh stimulov [Dependence of the results of estimation of fusion reserves on the method of measurement, instrumentation and parameters of test stimuli]. *Sensornye sistemy*. 2022. V. 36(3). P. 199-217. <https://doi.org/10.31857/S023500922203009X> (in Russian)
- Volkov V.V. Pokazateli vizo- i refraktometrii v otsenke zritel'noi rabotosposobnosti [Indices of viso- and refractometry in estimation of visual performance]. *Oftal'mol. zhurn*. 1986. (8). P. 455-458. (in Russian)
- Volkov V.V. Psikhofiziologiya zritel'nogo protsessa i metody ego izucheniya [Psychophysiology of the visual process and methods of its study]. *Klinicheskaya fiziologiya zreniya. Sbornik nauchnykh trudov*. M.: RUSOMED, 1993. P. 158-179. (in Russian)
- Vul'f D.M. Skrytye zritel'nye protsessy [Hidden visual processes]. *V mire nauki*. 1983. (4). P. 26-34. (in Russian)
- Glezer V.D. Kusochnyi Fur'e-analiz izobrazhenii i rol' zatylochnoi, visochnoi i temennoi kory v zritel'nom vospriyatii [Piecewise Fourier analysis of images and the role of occipital, temporal and parietal cortex in visual perception.]. *Fiziol. zhurn. SSSR im. I. M. Sechenova*. 1978. V. 64. (12). P. 1719-1730. (in Russian)
- Glezer V.D. *Zrenie i myshlenie* [Vision and thinking]. L.: Nauka, 1985. 246 p. (in Russian)
- Glezer V.D. O roli prostranstvenno-chastotnogo analiza, primitivov i mezhpolutsharnoi asimmetrii v opoznanii zritel'nykh obrazov [On the role of spatial-frequency analysis, primitives and interhemispheric asymmetry in the recognition of visual images.]. *Fiziologiya cheloveka*. 2000. V. 26. (5). P. 145-150. (in Russian)
- Goncharova S.A., Petrunya A.M., Pantelev G.V., Tyrlova E.I. Vtorichnoe kosoglazie [Secondary strabismus.]. *Oftal'mologicheskii zhurnal*. 2010. (3). P. 25-29. (in Russian)
- Gorev V.V., Gorbunov A.V., Panikratova YA.R., Tomyshev A.S., Khatsenko I.E., Kuleshov N.N., Salmasi ZH.M., Khasanova K.A., Balashova L.M., Lobanova E.I., Lebedeva I.S. Izmeneniya v zritel'nykh zonakh kory golovnogo mozga u detei pri levostoronnei anizometropicheskoi ambliopii po dannym strukturnoi MRT i funktsional'noi MRT pokoya [Changes in visual cortical areas of the brain in children with left-sided anisometropic amblyopia according to structural MRI and functional resting MRI]. *Sensornye sistemy*. 2024. V. 38(1). P.30-44. <https://doi.org/10.31857/S0235009224010027> (in Russian)
- Gracheva M.A. *Primenenie sovremennykh 3D-tekhnologii dlya otsenki stereozreniya i ego korrektsii* [Application of modern 3D-technologies for estimation of stereo vision and its correction]. PhD Thesis Abstract. M., 2017. 26 p. (in Russian)
- Gracheva M.A., Bol'shakov A.S. Sovremennye shlemy virtual'noi real'nosti: prichiny poyavleniya diskomforta i sposoby ikh ispravleniya [Modern virtual reality helmets: causes of discomfort and ways to correct them]. *Kinomekhanik segodnya*. 2016. (6). P. 30-35. (in Russian)
- Gracheva M.A., Bol'shakov A.S., Krutsova E.N., Nikolaev D.P. Stereotekhnologii: separatsiya izobrazhenii, istoriya razvitiya metodov, sovremennye primeneniya [Stereotechnologies: image separation, history of methods development, modern applications]. *Stereozrenie cheloveka i stereotekhnologii*. M.: OOO "KUNA", 2022. P. 24-36. (in Russian)
- Gracheva M.A., Rozhkova G.I. Stereoostrota zreniya: osnovnye ponyatiya, metody izmereniya, vozrastnaya dinamika [Stereoacuity of vision: basic concepts, methods of measurement, age dynamics]. *Sensornye Sistemy*. 2012. V. 26(4). P. 259-279. (in Russian)

- Efimova E.L. Komp'yuternye pleopto-ortopticheskie metody lecheniya vtorichnoj ambliopii u detej [Computerized pleopto-orthoptic techniques for the treatment of secondary amblyopia in children]. Avtoref. dis. ... kand. med. nauk, 14.00.07. SPb.; 2011. 20 p. (In Russian)
- Kononova N.E., Somov E.E. Clinic and treatment of preschool children with monolateral and alternating concomitant strabismus [Clinic and treatment of preschool children with monolateral and alternating sopic strabismus]. *Rossiyskaya detskaya oftalmologiya*. 2020. V. 2. P. 7–11. (In Russian) <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2020-2-7-11>
- Kononova N.E., Somov E.E., Efimova E.L. K voprosu o klinicheskoi suti sodruzhestvennogo kosoglaziya, funktsional'nykh narusheniyakh i rasprostraneni v populyatsii [To the question about the clinical essence of the concomitant strabismus, functional disorders and distribution in the population]. *Rossiiskaya detskaya oftal'mologiya*. 2023. (2). P. 52–60. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-2-52-60> (in Russian)
- Kuvshinova O.V., Utkina O.A., Dergacheva N.N., Medvedeva A.I. Vosstanovlenie zritel'nykh funktsii u patsientov s refraktsionnoi ambliopiei v usloviyakh virtual'noi okklyuzii pri ispol'zovanii komp'yuternoï programmy, razrabotannoi na baze 3D tekhnologii [Restoration of visual functions in patients with refractive amblyopia in conditions of virtual occlusion using a computer program developed on the basis of 3D technologies.]. *Vestnik sovetov molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoi oblasti*. 2017. V. 3(4(19)). P. 61–63. (in Russian)
- Kuznetsov YU.V. *Naznachenie rasstoyaniya mezhdu opticheskimi tsestrami linz v ochkakh* [Appointment of distance between optical centers of lenses in glasses]. SPb: OOO "RA "VEKO", 2009. 104 p. (in Russian)
- Kuman I.G. *Issledovanie neirofiziolgicheskikh mekhanizmov odnostonnei ambliopii* [Study of neurophysiologic mechanisms of unilateral amblyopia]. Avtoref. kand. biol. nauk. M., 1984. 23 p. (in Russian)
- Lebedeva I.S., Khatsenko I.E., Sturov N.V., Guseva M.R., Lobanova I.V., Vykhristyuk O.F., Kyun YU.A., Tomyshv A.S. Strukturnye osobennosti golovnoy mozga rebenka pri odnostonnei ambliopii: MRT-issledovanie [Structural features of the child's brain in unilateral amblyopia: an MRI study.]. *Zhurnal nevrologii i psikiatrii im S.S. Korsakova*. Spetsvypuski. 2018. V. 118(5-2). P. 69–74. <https://doi.org/10.17116/jnevro20181185269> (in Russian)
- Maiorov N.A. Samye pervye v istorii razvitiya mirovogo kinematografa [The very first in the history of world cinematography development (part 1)]. *Mir tekhniki kino*. 2018a. V. 12 (2). P. 38–40. (in Russian)
- Maiorov N.A. Samye pervye v istorii razvitiya mirovogo kinematografa [The very first in the history of world cinematography development (part 2)]. *Mir tekhniki kino*. 2018b. V. 12. (3). P. 37–40. (in Russian)
- Novitskaya V.A., Karyakina O.E., Karyakin A.A., Orudzhova O.N. Komp'yuternaya programma dlya vosstanovleniya zritel'nykh funktsii u detei s ambliopiei [A computer program to restore visual function in children with amblyopia.]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2022. (4). P. 68–73. (in Russian)
- Pil'man N.I. *Funktsional'noe lechenie kosoglaziya u detei* [Functional treatment of strabismus in children.]. Kiev: Zdorov'ya, 1964. 225 p. (in Russian)
- Pil'man N.I. *Ispravlenie kosoglaziya u detei* [Correction of strabismus in children.]. Kiev: Zdorov'ya, 1979. 144 p. (in Russian)
- Podugol'nikova T.A. Povyshenie ostroty zreniya pri ambliopii s pomoshch'yu perseptivnogo obucheniya [Increase of visual acuity in amblyopia with the help of perceptual learning]. *Defektologiya*. 2012. (4). P. 31–37. (in Russian)
- Podugol'nikova T.A., Rozhkova G.I., Kononov V.M. Ispol'zovanie komp'yuternogo kompleksa "AkademiK" dlya funktsional'nogo lecheniya narushenii binokulyarnogo zreniya [Use of computer complex "Akademik" for functional treatment of binocular vision disorders.]. *Sovremennye problemy detskoï oftal'mologii. Materialy yubileinoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu kafedry detskoï oftal'mologii Sankt-Peterburgskoi gosudarstvennoi pediatricheskoï meditsinskoï akademii Federal'nogo agentstva po zdravookhraneniyu i sotsial'nomu razvitiyu*. SPb., 2005. P. 145–147. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Gracheva M.A. Estestvennyi khromostereopsis: prichiny i individual'nye variatsii binokulyarnykh prostranstvennykh tsetovyykh ehffektov [Natural chromostereopsis: causes and individual variations of binocular spatial color effects]. *Sensornye sistemy*. 2014. V. 28. (1). P. 3–14. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Kononov V.M. Optiko-fiziologicheskie osnovy ispol'zovaniya interaktivnykh komp'yuternykh programm v funktsional'nom lechenii kosoglaziya [Optico-physiological bases of using interactive computer programs in functional treatment of strabismus. Modern problems of pediatric ophthalmology]. *Sovremennye problemy detskoï oftal'mologii. Materialy yubileinoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi 70-letiyu kafedry detskoï oftal'mologii Sankt-Peterburgskoi gosudarstvennoi pediatricheskoï meditsinskoï akademii Federal'nogo agentstva po zdravookhraneniyu i sotsial'nomu razvitiyu*. SPb, 2005. P. 121–124. (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*. 2015. V. 29. (2). P. 99–121. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Matveev S.G. *Zrenie detei: problemy otsenki i funktsional'noi korrektsii* [Vision of children: problems of

- assessment and functional correction]. M.: Nauka, 2007. 315 p. (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., Leshkevich I.A., Nosov V.N., Matveev S.G. Komp'yuternoe lechenie kosoglaziya i ambliopii s primeneniem sluchaino-tochechnykh stereogramm [Computerized treatment of strabismus and amblyopia using random-point stereograms. *Vestnik oftalmologii*. 1998. V. 114 (4). P. 28-32. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A. Primenenie interaktivnykh komp'yuternykh programm dlya vosstanovleniya i razvitiya binokulyarnykh funktsii [Application of interactive computer programs for restoration and development of binocular functions.]. *Aktual'nye problemy sotsializatsii invalidov po zreniyu*. SPb.: Izdatel'stvo RGPU im. A.I. Gertsena, 1999. P. 73-78 (in Russian)
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Tokareva V.S. Komp'yuternye metody funktsional'nogo lecheniya ambliopii i kosoglaziya: neobkhodimost' ispol'zovaniya printsipial'no novykh podkhodov i kriteriev [Computer methods of functional treatment of amblyopia and strabismus: the necessity of using fundamentally new approaches and criteria.]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: Okhrana zreniya detei Ukrainy v ramkakh vypolneniya programmy VOZ "Zrenie-2020" s prakticheskimi seminarom "Zhivaya khirurgiya"*. Kiev, 2005. P. 261-264. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Tokareva V.S., Vorontsov D.D., Golubkov M.G., Drygin S.V. *Integrirovannyi lechebno-dagnosticheskii kompleks programm "AKADEMIK"* [Integrated medical-diagnostic complex of programs "AKADEMIK"]. 1996. Sertifikat sootvetstviya "ROSS RU. SP07.N00035". (in Russian)
- Rozhkova G.I., Rychkova S.I., Gracheva M.A., Takhchidi H.P. Individualnaya optimizatsiya funktsionalnoi korrektsii narushennogo binokulyarnogo zreniya [Individual optimization of functional treatment in the cases of impaired binocular vision]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2015. V. 29(4). P. 341-353 (in Russian).
- Rozhkova G.I., Rychkova S.I., Naumova O.I., Gracheva M.A., Bykova T.A., Effektivnost' lecheniya ambliopii s primeneniem virtual'noi okklyuzii na baze 3D tekhnologii [Effectiveness of amblyopia treatment using virtual occlusion based on 3D technology]. *"Nevskie gorizonty-2016". Materialy nauchnoi konferentsii oftalmologov. SPBGPMU*. SPb.: Politekhnik-servis, 2016. P. 222-223. (in Russian)
- Rozhkova G.I., Tokareva V.S., Vashchenko D.I., Vasil'eva N.N. Vozrastnaya dinamika ostroty zreniya u shkol'nikov. I. Binokulyarnaya ostrota zreniya dlya dali [Age dynamics of visual acuity in schoolchildren. I. Binocular visual acuity for far]. *Sensornye sistemy*. 2001. V. 15. (1). P. 54-60. (in Russian)
- Sen'ko I.V., Rychkova S.I., Gracheva M.A., Takhchidi H.P. Razvitie binokulyarnykh funktsii u patsientov s kosoglaziem putem vozdeistviya na funktsional'nyu skotomu komp'yuternymi metodami [Development of binocular functions in patients with strabismus by influence on functional scotoma by computer methods]. *Sensornye sistemy*. 2016. V. 30. (4). P. 319-325. (in Russian)
- Sergievskaia L.I. *Sodruzhestvennoe kosoglazie i geteroforii. Profilaktika, diagnostika, lechenie bez operatsii* [Concomitant strabismus and heterophoria. Prophylaxis, diagnostics, treatment without surgery.]. M.: Medgiz, 1951. 244 p. (in Russian)
- Somov E.E. *Metody oftalmoehtonomiki* [Methods of ophthalmic ergonomics]. L.: Nauka, 1989. 157 p. (in Russian)
- Tarutta E.P., Khubieva R.R., Milash S.V., Apaev A.V., Aklaeva N.A., Zol'nikova I.V. Novyi metod lecheniya ambliopii u detei s neustoiichivoi tsentral'noi i netsentral'noi fiksatsiei s pomoshch'yu biologicheskoi obratnoi svyazi [A new method of amblyopia treatment in children with unstable central and non-central fixation using biofeedback]. *Rossiiskii oftalmologicheskii zhurnal*. 2022. V. 15. (2). P. 109-119. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2022-15-2-109-119> (in Russian)
- Tatarinov S.A., Kashchenko T.P., Amel'yanova S.G., Avuchenkova T.N., Galich V.I., Belozerovala A.E., Timokhova G.P., Shapiro V.M. Vosstanovlenie zritel'nykh funktsii pri ambliopii i kosoglazii s pomoshch'yu programmno-apparatnogo kompleksa "eYe" [Restoration of visual functions in amblyopia and strabismus with the help of software and hardware complex "eYe"]. *Metodicheskie rekomendatsii*. M.: MNII GB, 1996. 10 p. (in Russian)
- Timoshenko T.A., Shtilerman A.L. Rezul'taty lecheniya refraktsionnoi ambliopii vysokoi stepeni u detei s ispol'zovaniem metodov kognitivnoi modulyatsii ostroty zreniya i ehlektrostimulyatsii [Results of treatment of high degree refractive amblyopia in children using methods of cognitive modulation of visual acuity and electrical stimulation]. *Rossiiskii oftalmologicheskii zhurnal*. 2014. V. 7 (1). P. 45-49. (in Russian)
- Tumanova O.V., Medvedev I.B., Mikhailenok E.L. Lechenie ambliopii metodom kognitivnoi modulyatsii ostroty zreniya [Treatment of amblyopia by cognitive modulation of visual acuity]. *Glaz*. 2001. (6). P. 31-35. (in Russian)
- Tumanyan S.A., Kechek A.G. Sposob korrektsii zritel'nykh funktsii [Method of correction of visual functions]. Patent RF A.S.№2070011. BI № 34. 10.12.1996. (in Russian)
- Tumanyan S.A., Bogdanov O.V., Mikhailenok E.L., Movsisyants S.A. Ispol'zovanie priemov funktsional'nogo bioupravleniya v kompleksnom lechenii ambliopii [Use of functional biocontrol methods in complex treatment of amblyopia.]. *Vestnik oftalmologii*. 1993. V. 109. (4). P. 11-13. (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).
- Khatsenko I.E., Rozhkova G.I., Gracheva M.A., Salmasi ZH.M., Balashova L.M. Patogenez i opisanie ambliopii. Chast' 1. Prichiny ehvolyutsii predstavlenii [Pathogenesis and description of amblyopia. Part 1. Reasons for the evolution of representations.]. Rossiiskaya detskaya oftal'mologiya. 2023a. (3). P. 37-47. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-3-37-47> (in Russian)
- Khatsenko I.E., Rozhkova G.I., Gracheva M.A., Salmasi ZH.M., Balashova L.M. Patogenez i opisanie ambliopii. Chast' 2. Analiz opredelenii [Pathogenesis and description of amblyopia. Part 2. Analysis of definitions.]. Rossiiskaya detskaya oftal'mologiya. 2023b. (3). P. 48-54. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2023-3-48-54> (in Russian)
- Khvatova N.V., Slyshalova A.E., Vakurina A.E. *Ambliopiya: zritel'nye funktsii, patogenez i printsipy lecheniya. Zritel'nye funktsii i ikh korrektsiya u detei* [Amblyopia: visual functions, pathogenesis and principles of treatment. Visual functions and their correction in children.]. Eds. S.EH. Avetisova, T.P. Kashchenko, A.M. Shamshinovoi. M.; 2005. P. 202–220. (in Russian)
- Kh'yubel D. Glaz, mozg, zrenie [Eye, Brain, Vision]. Per. s angl. M.: Mir, 1990. 239 p. (in Russian)
- Chernysheva S.G., Samedova D.KH. Struktura i prichiny neudovletvoritel'nykh rezul'tatov khirurgicheskogo lecheniya sodruzhestvennogo kosoglaziya [Structure and reasons of unsatisfactory results of surgical treatment of concomitant strabismus]. *Oftalmologiya*. 2013. V. 1(11). P. 158-164. (in Russian)
- Shelepin YU.E., Kolesnikova L.N., Levkovich YU.I. *Vizokонтрастometriya* [Visocontrastometry]. L.: Nauka, 1985. 103 p. (in Russian)
- Achtman R., Green C., Bavelier D. Video games as a tool to train visual skills. *Restorative Neurology and Neuroscience*. 2008. V. 26(4-5). P. 435–446,
- Agarwal A. Axial angles of the eye. Textbook of ophthalmology. Jaypee Brothers Medical Publishers. 2002. P. 422-423.
- Andalib D., Nabie R., Poormohammad B. Factors Affecting Improvement of Stereopsis Following Successful Surgical Correction of Childhood Strabismus in Adults. *Strabismus*. 2015. V. 23(2). P. 80-84. <https://doi.org/10.3109/09273972.2015.1025985>. PMID: 26158474
- Asper L. Optical treatment of amblyopia: a systematic review and meta-analysis. *Clinical and Experimental Optometry*. 2018. P. 1-12.
- Astle A.T., McGraw P.V., Webb B.S. Can human amblyopia be treated in adulthood? *Strabismus*. 2011. V. 19 (3). P. 99-109. <https://doi.org/10.3109/09273972.2011.600420>
- Atkinson J. The developing visual brain. N.Y.: Oxford Univ. press, 2000. 211 p.
- Barry S.R. *Fixing my gaze: A scientist's journey into seeing in three dimensions*. 2009. 272 p.
- Barry S.R. Beyond the critical period: Acquiring stereopsis in adulthood. In: Steeves J.K.E., Harris L.R., eds. *Plasticity in Sensory Systems*. Cambridge University Press; 2012. P. 175-195. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139136907.010>
- Barry S.R., Bridgeman B. An assessment of stereovision acquired in adulthood. *Optom. Vis. Sci*. 2017. V. 94. P. 993-999. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001115>
- Bennett A.G., Rabbets R.B. *Clinical visual optics*. London: Butterworth-Heinemann, 1998. 451 p.
- Birch E.E., Gwiazda J., Held R. Stereoacuity development for crossed and uncrossed disparities in human infants. *Vision Res*. 1982. V. 22. P. 507–13.
- Birch E.E., Li S.L., Jost R.M., et al. Binocular iPad treatment for amblyopia in preschool children. *JAAPOS*. 2015. V. 19. P. 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2014.09.009>
- Bolshakov A., Gracheva M., Rychkova S., Rozhkova G., Amblyopia treatment: Advantages of virtual occlusion based on a contemporary 3D technique. *Perception*. 2016. V. 45, Suppl. P. 301-302.
- Bonfanti S., Gargantini A. Amblyopia rehabilitation by games for low-cost virtual reality visors. *International Workshop on ICTs for Improving Patients Rehabilitation Research Techniques*. Cham : Springer International Publishing, 2015. P. 116-125.
- Braddick O., Atkinson J. Some recent findings on the development of human binocularity: A review. *Behav. Brain Res*. 1983. V. 10(1). P. 141-150. [https://doi.org/10.1016/0166-4328\(83\)90160-2](https://doi.org/10.1016/0166-4328(83)90160-2)
- Braddick O., Atkinson J., Julesz B., Kropfl W., Bodis-Wollner I., Raab E. Cortical binocularity in infants. *Nature*. 1980. V. 228. P. 363-365. <https://doi.org/10.1038/288363a0>
- Bridgeman B., Barry S.R. Survey of patients with stereopsis acquired as adults. *Vis Rev Rehabil*. 2015. V. (1). P. 13.
- Buffon Comte de (Leclerc G.L.). Dissertation sur la cause du strabisme ou deux yeux louches. *Memoires de Mathématique et de Physique de l'Académie Royale des Sciences*. 1743. P. 231-248.
- Campbell F.W., Hess R.F., Watson P.G., Banks R. Preliminary results of a physiologically based treatment of amblyopia. *Brit. J. Ophthalmol*. 1978. V. 62(11). P. 748-755.
- Campbell F.W., Robson J. Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. *J. Physiol*. 1968. V. 197(3). P. 551-561.
- Cleary M., Moody A.D., Buchanan A., Stewart H., Dutton G.N. Assessment of a computer-based treatment for older amblyopes: the Glasgow Pilot Study. *Eye (Lond)*. 2009. V. 23(1). P. 124-131. <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6702977>

- Deshpande P.G., Bhalchandra P.C., Nalgirkar A.R., Tathe S.R. Improvement of visual acuity in residual meridional amblyopia by astigmatic axis video games. *Indian J Ophthalmol.* 2018. V. 66(8). P. 1156-60.
- Gargantini A., Bana M., Fabiani F. Using 3D for rebalancing the visual system of amblyopic children. *International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR)*. 2011. P. 1-7.
- Gifford S.R. Some notes on the treatment of strabismus. *Br J Ophthalmol.* 1935. V. 19. P. 148-151.
- Hamm L.M., Black J., Dai S., Thompson B. Global processing in amblyopia: a review. *Front Psychol.* 2014. V. 5. Article 583. P. 1-21.
- 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. <https://doi.org/10.1038/eye.2013.113>
- Hess R.F., Thompson B., Black J.M., Machara G., Zhang P., Bobier W.R., Cooperstock J. An iPod treatment for amblyopia: An updated binocular approach. *Optometry.* 2012. V. 83 P. 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2011.08.013>
- Hess R.F., Mansouri B., Thompson B. A new binocular approach to the treatment of amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development. *Restor Neurol Neurosci.* 2010. V. 28. P. 793-802. <https://doi.org/10.3233/RNN-2010-0550>
- Hess R.F., Thompson B., Gole G., Mullen K.T. Deficient response from the lateral geniculate nucleus in humans with amblyopia. *The European Journal of Neuroscience.* 2009. V. 29(5). P. 1064-1070. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06650.x>
- Holmes J.M., Manh V.M., Lazar E.L. et al. Effect of a binocular iPad game vs part-time patching in children aged 5 to 12 years with amblyopia: a randomized clinical trial. *JAMA Ophthalmol.* 2016. V. 134. P. 1391-1400. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4262>
- Hubel D.H., Wiesel T.N. Brain mechanisms of vision. *Scientific American.* 1979. V. 241. P. 150-162.
- Joly O., Frankó E. Neuroimaging of amblyopia and binocular vision: A review. *Frontiers in Integrative Neuroscience.* 2014. V. 8. Article 62. <https://doi.org/10.3389/fnint.2014.00062>
- Kelly K.R., Jost R.M., Dao L., Beauchamp C.L., Leffler J.N., Birch E.E. Binocular iPad game vs patching in children. A Randomized Clinical Trial. *JAMA Ophthalmol.* 2016. V. 134(12). P. 1402-1408. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2016.4224>
- Koc I., Bagheri S., Chau R. K., Hoyek S., Shousha N.A., Mahmoudinezhad G., Falcone M.M., Oke I., Hunter D.G., Patel N.A. Cost-effectiveness Analysis of Digital Therapeutics for Amblyopia. *Ophthalmology.* 2025. V. 132(6). P. 654-660. <https://doi.org/10.1016/j.opthta.2024.12.037>
- Kononov V.M., Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I. Improvement of binocular vision by means of interactive software. *Perception.* 2006. V. 35. Suppl. P. 171-172.
- 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>
- Lang, J.I., Lang, T.J. Eye Screening with the Lang Stereotest. *American Orthoptic Journal.* 1988. V. 38(1). P. 48-50. <https://doi.org/10.1080/0065955X.1988.11981769>
- Leffler C.T., Vaziri K., Schwartz S.G., Cavuoto K.M., McKewon C.A., Kishor K.S., Janot A.C. Rates of reoperation and abnormal binocularity following strabismus surgery in children. *Am J Ophthalmol.* 2016. V. 162. P. 159-166. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2015.10.022>
- 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. 114. P. 17-30. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.01.002>
- Levi D.M. Rethinking Amblyopia 2020. *Vision Res.* 2020. V. 176. P. 118-129. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.07.014>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.01.059>
- 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 (Lond)*. 2014. V. 28. P. 1246-1253. <https://doi.org/10.1038/eye.2014.165>
- 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>
- Manh V.M., Holmes J.M., Lazar E.L., Kraker R.T., Wallace D.K., Kulp M.T., Galvin J.A., Shah B.K., Davis P.L. A randomized trial of a binocular iPad game versus part-time patching in children aged 13 to 16 years with amblyopia. *Am. J. Ophthalmol.* 2018. V. 186. P. 104-115. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2017.11.017>
- Mallah K. El., Chakravarthy U., Hart P.M. Amblyopia: is visual loss permanent? *Br J Ophthalmol.* 2000. V. 84(9). P. 944-945. <https://doi.org/10.1136/bjo.84.9.952>
- Mendola J.D., Ian P., Conner I.P., Roy A., Chan S-T., Schwartz T.L., Odom J.V., Kwong K.K. Voxel-Based Analysis of MRI Detects Abnormal Visual Cortex in Children and Adults With Amblyopia. *Human Brain Mapping.*

2005. V. 25(2). P. 222–236. <https://doi.org/10.1002/hbm.20109>.
- Mendola J.D., Lam J., Rosenstein M., Lewis L.B., Shmuel A. Partial correlation analysis reveals abnormal retinotopically organized functional connectivity of visual areas in amblyopia. *Neuroimage Clin.* 2018. V. 18. P. 192–201. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.01.022>.
- Miki A., Liu G.T., Goldsmith Z.G., Liu C.-S.J., Haselgrove J.C. Decreased activation of the lateral geniculate nucleus in a patient with anisometric amblyopia demonstrated by magnetic resonance imaging. *Ophthalmologia.* 2003. V. 217 (5). P. 365–369. <https://doi.org/10.1159/000071353>.
- Newsham D. Parental non-concordance with occlusion therapy. *Br. J. Ophthalmol.* 2000. V. 84(9). P. 957–962.
- Noah S., Bayliss J., Vedamurthy I., Nahum M., Levi, D., Bavelier D. Comparing dichoptic action video game play to patching in adults with amblyopia. *Journal of vision.* 2014. V. 14(10). P. 691–691. <https://doi.org/10.1167/14.10.691>
- Obukhov A., Kutimova E., Matrosova J., Teselkin D., Shilcin M. Medical VR Simulator for Pediatric Strabismus Treatment. *Technologies.* 2024. V. 12. P. 228. <https://doi.org/10.3390/technologies12110228>
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A comparison of atropine and patching treatments for moderate amblyopia by patient age, cause of amblyopia, depth of amblyopia, and other factors. *Ophthalmology.* 2003. V. 110 (8). P. 1632–1637. [https://doi.org/10.1016/S0161-6420\(03\)00500-1](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(03)00500-1)
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A randomized trial of near versus distance activities while patching for amblyopiain children aged 3 to less than 7 years. *Ophthalmology.* 2008a. V. 115(11). P. 2071–2078. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2008.06.031>.
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. Patching vs Atropine to Treat Amblyopia in Children Aged 7 to 12 Years: A Randomized Trial. *Arch Ophthalmol.* 2008b. V. 126(12). P. 1634–1642. doi:10.1001/archophthalmol.2008b.107
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. A randomized trial of atropine vs. patching for treatment of moderate amblyopiain children. *Arch Ophthalmol.* 2002. V. 120(3). P. 268–278. <https://doi.org/10.1001/archophth.120.3.268>
- Pediatric Eye Disease Investigator Group. Pharmacological plus optical penalization treatment for amblyopia: results of a randomized trial. *Arch Ophthalmol.* 2009. V. 127(1). P. 22–30. <https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2008.520>
- 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>
- Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I. Restoration and improvement of stereovision by means of learning to perceive random-dot stereograms. *Perception.* 1998. V. 27 (Suppl.). P. 164.
- Polat U., Ma-Naim T., Belkin M., Sagi D. Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2004. V. 101(17). P. 6692–6697. <https://doi.org/10.1073/pnas.0401200101>
- Qiu F., Wang L., Liu Y., Yu L. Interactive binocular amblyopia treatment system with full-field vision based on virtual reality. *1st International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Wuhan, China. 2007. P. 1257–1260. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2007.324>
- Repka M.X., Lum F., Burugapalli B. Strabismus, strabismus surgery, and reoperation rate in the United States from the IRIS Registry. *Ophthalmology.* 2018. V. 125(10). P. 1646–1653. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2018.04.024>
- Repka M.X., Kraker R.T., Beck R.W., Birch E., Cotter S.A., Holmes J.M., Hertle R.W., Hoover D.L. et al. Treatment of severe amblyopia with weekend atropine: results from 2 randomized clinical trials. *J AAPOS.* 2009. V. 13(3). P. 258–263. <https://doi.org/10.1016/j.jaapos.2009.03.002>
- Rozhkova G.I., Podugolnikova T.A., Vasiljeva N.N. Visual acuity in 5–7-year-old children: individual variability and dependence on observation distance. *Ophthal. Physiol. Opt.* 2005. V. 25: 66–80.
- Sloper J. Answers and Questions about the Digital Dichoptic Treatment of Amblyopia. *Ophthalmology.* 2022. V. 129(1). P. 86. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2021.08.015>
- Taylor V., Bossi M., Greenwood J.A., Dahimann-Noor A. Childhood amblyopia: current management and new trends. *Br Med Bull.* 2016. V. 119(1). P. 75–86. <https://doi.org/10.1093/bmb/ldw030>
- 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.* 2011. V. 19(3). P. 280–289.
- Vaschenko D.I., Rozhkova G.I. Dynamics of visual acuity in schoolchildren. *Perception.* 1998. V. 27 (Suppl.). P. 203.
- Vedamurthy I., Nahum M., Huang S.J., Zheng F., Bayliss J., Bavelier D., Levi D.M. A dichoptic custom-made action video game as a treatment for adult amblyopia. *Vision Res.* 2015. V. 114. P. 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2015.04.008>
- Vitali A., Facoetti G., Gargantini A. An environment for contrast-based treatment of amblyopia using 3D technology. *IEEE 2013 International Conference on Virtual Rehabilitation (ICVR).* 2013. P. 76–79. <https://doi.org/10.1109/ICVR.2013.6662073>
- Waddingham P.E., Butler T.K.H., Cobb S.V., Moody A.D.R., Comaish I.F., Haworth S.M., Gregson R.M., Ash I.M., Brown S.M., Eastgate R.M., Griffiths G.D.

- Preliminary results from the use of the novel Interactive Binocular Treatment (I-BITTM) system, in the treatment of strabismic and anisometropic amblyopia. *Eye*. 2006. V. 20. P. 375-378. <https://doi.org/10.1038/sj.eye.6701883>
- Wade N.J. Natural Historians. *Perception*. 2008. V. 37(4). P. 479-482. <https://doi.org/10.1068/p3704ed>
- Wang H., Liang M., Crewther S.G., Yin Z., Wang J., Crewther D.P., Yu T. Functional deficits and structural changes associated with visual attention network during resting state in adult strabismic and anisometropic amblyopes. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2022. V. 16. Article 862703. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.862703>
- Webber A.L. Wood J. Amblyopia: prevalence, natural history, functional effects and treatment. *Clinical and Experimental Optometry*. 2005. V. 88(6). P. 365–375.
- Wei H., H. Zhao H., Dong F., Saleh G., X. Ye, and G. Clapworthy. A cross-platform approach to the treatment of amblyopia. *IEEE 13th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*. 2013. P. 1–4.
- Wolfe J.M. Stereopsis and binocular rivalry. *Psychol Rev*. 1986. V. 93(3). P. 262-282.
- Wolfe J.M., Held R. A purely binocular mechanism in human vision. *Vision Res*. 1981. V. 21(12). P. 1755-1759. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(81\)90208-X](https://doi.org/10.1016/0042-6989(81)90208-X)
- Wolfe J.M., Held R. Binocular adaptation that cannot be measured monocularly. *Perception*. 1982. V. 11(3). P. 287-295.
- Wolfe J.M., Held R. Shared characteristics of stereopsis and the purely binocular process. *Vision Res*. 1983. V. 23(3). P. 217-227. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(83\)90110-4](https://doi.org/10.1016/0042-6989(83)90110-4)
- 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(5). P. 276-284.
- Xiao J.X., Xie S., Ye J.T., Liu H.H., Gan X.L., Gong G.L., Jiang X.X. Detection of abnormal visual cortex in children with amblyopia by voxel-based morphometry. *Am J Ophthalmol*. 2007. V. 143(3). P. 489-493. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2006.11.039>
- Xiao S., Angjeli E., Wu H.C., Gaier E.D., Gomez S., Travers D.A., Binenbaum G., Langer R., Hunter D.G., Repka M.X. Randomized Controlled Trial of a Dichoptic Digital Therapeutic for Amblyopia. *Ophthalmology*. 2022. V. 129(1). P. 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.opthta.2021.09.001>