

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ И ОБЪЕКТИВНОГО КОНТРОЛЯ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ ИЗМЕРЕНИИ ФУЗИОННЫХ РЕЗЕРВОВ

© 2023 г. А. С. Большаков¹, Н. Н. Васильева^{1,*}, Г. И. Рожкова¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
127051 Москва, Большой Каретный пер., д. 19, стр. 1, Россия

*E-mail: nn_vasilyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 18.04.2023 г.

После доработки 20.05.2023 г.

Принята к публикации 22.06.2023 г.

Как известно, основным показателем устойчивой работы механизмов фузии, составляющих физиологическую основу бинокулярного восприятия, являются фузионные резервы (ФР), точная оценка которых до сих пор остается проблематичной. Для измерения ФР вводят и постепенно увеличивают угловое рассогласование между настройками систем аккомодации и вергенции, доходя до критических углов, при которых механизмы фузии перестают функционировать, о чем судят по субъективным ощущениям испытуемых, сообщающих о распаде бинокулярного образа на два монокулярных. Субъективность таких оценок ФР, а также их слабо изученная зависимость от параметров тест-объектов и процедуры измерения, затрудняют определение нормативных значений и формирование баз данных по ФР. Для преодоления этих недостатков, свойственных традиционным методам измерения ФР, еще в конце прошлого века были предприняты попытки использовать компьютерные методы (Рожкова и др., 1996 а, б; 1998). В данной статье представлены результаты критической оценки компьютерного метода измерения ФР с использованием авторской интерактивной компьютерной программы ФУЗИЯ (Большаков, Рожкова, 2013), предусматривающей генерацию варьируемых тестовых изображений на специальном дисплее, рассчитанном на поляризационный метод сепарации левого и правого каналов предъявления тест-объектов. Цель данного исследования — оценка точности и воспроизводимости результатов измерений, а также проверка эффективности предложенного нами ранее способа программно обеспечить объективный контроль распада бинокулярного образа. Полученные данные подтверждают перспективность использованного подхода и позволяют уточнить конкретные формы его рационального применения.

Ключевые слова: бинокулярное зрение, фузионные резервы, компьютерные методы измерения, объективный контроль фузии, стандартизация измерений

DOI: 10.31857/S0235009223030034, EDN: WQLBYL

ВВЕДЕНИЕ

Все большее внедрение стереотехнологий в современную жизнь — производственную деятельность, медицину, образование, развлекательную индустрию и другие области — подразумевает наличие у пользователей нормального бинокулярного зрения. Физиологической основой, определяющей главные преимущества бинокулярного зрительного восприятия по сравнению с монокулярным, являются механизмы фузии. В литературе по зрительному восприятию термин *фузия* (от латинского *fusio* — сплавление) употребляется в двух значениях. С одной стороны, так называют сложный многоуровневый и гетерархический процесс совместной обработки в мозгу сенсорной информации, поступающей из двух глаз, а также информации, поступающей от вспомогательных

систем — глазодвигательной и аккомодационной. С другой стороны, этим же термином обозначают и успешное завершение такой совместной обработки информации — формирование единого видимого образа, который отличается более выраженной объемностью, чем каждый из монокулярных образов. В первом случае подразумевается *активность* (происходит *фузирование*), во втором — *достигнутый результат* этой активности (сформировался сфузированный образ). Из контекста обычно ясно, какой смысл имеется в виду.

Мониторинг состояния механизмов фузии должен быть обязательной составляющей системы охраны зрения, обеспечивающей профилактику нарушений развития бинокулярных механизмов и раннее выявление бинокулярных расстройств. Очевидно, что совершенствование

системы охраны зрения невозможно без повышения точности и достоверности получаемых количественных оценок базовых показателей функционирования различных зрительных механизмов. Одним из таких показателей являются фузионные резервы (ФР), характеризующие прочность фузионных механизмов бинокулярного зрения, их способность устойчиво функционировать при наличии отступлений от теоретически идеальных условий успешной работы.

Для измерения ФР используют методы, основанные на искусственном нарушении согласованного функционирования систем аккомодации и конвергенции при наблюдении тест-объекта. Теоретически, в случае нормальной фузии оси обоих глаз должны быть наведены на тест-объект и пересекаться в рассматриваемой точке (успешная конвергенция), а фокусировка (правильная аккомодация) должна точно соответствовать расстоянию до тест-объекта, т.е. до той же точки. Процедура измерения состоит в том, что экспериментатор или медицинский работник искусственно вводят и постепенно увеличивают рассогласование между настройками систем аккомодации и вергенции, доходя до критических углов избыточной конвергенции/дивергенции, при которых механизмы фузии перестают функционировать. Величину критического угла определяют на основании отчетов испытуемого о его субъективных ощущениях: он должен сообщить о наступившем распаде бинокулярного образа на два монокулярных.

В иностранной литературе для ФР используют не только термин *fusional reserves*, точно соответствующий русскоязычному термину, но и синонимы: *strength of fusional vergence* (сила фузионной вергенции), *fusional vergence amplitudes* (амплитуды фузионной вергенции), *fusional vergence ranges* (фузионные диапазоны вергенции) и ряд других выражений, употребляемых реже. В доступной нам литературе по бинокулярному зрению нам не удалось найти ни строгого определения ФР, ни четких указаний по условиям их измерения, что связано с зависимостью ФР от многих факторов. В немногочисленных справочных изданиях параметры тест-объектов и физических условий измерений ФР, к сожалению, как правило, не указываются, что затрудняет не только количественное сравнение приводимых значений, но и получение общего представления об их вариабельности, возрастной динамике и других характеристиках (см., например, Розенблюм, 1996; Рожков, Овсянникова, 2003; Федеральные клинические рекомендации по диагностике и лечению содружественного косоглазия, 2015; Cooper et al., 2000; American Optometric Association, 2020; Elliot, 2020).

Наиболее распространенные традиционные методы измерения ФР (при помощи призмных

линеек и синоптофоров) не очень годятся для сбора большого количества данных, необходимо для этих целей, так как изменение параметров тест-объектов и проведение процедуры тестирования осуществляются вручную, а возможности варьирования определяются имеющимся ограниченным набором тестовых изображений и режимов работы. Естественным способом преодоления этих ограничений является компьютеризация процедур измерения ФР, которая может одновременно решить проблемы варьирования параметров тест-объектов, стандартизации условий измерения, автоматической записи результатов и их предварительной обработки прямо во время тестирования для адаптации процедуры к особенностям испытуемого (пациента).

Для проверки возможностей и преимуществ компьютеризации измерений ФР ранее в ИППИ РАН было создано несколько компьютерных программ. В 1996 г. первая программа для измерения и развития ФР была включена в лечебно-диагностический комплекс программ “АКАДЕМИК”, который был сертифицирован и внедрен в практику (Рожкова и др., 1996 б; 1998). Этот комплекс использовался как для научных исследований (Рожкова и др., 1996 а; Красноперова, 2001; Ефимова, 2011; Дмитриева и др., 2018; Кононова, Сомов, 2018; Кононова, 2022; Podugolnikova et al., 1997 и др.), так и для функционального лечения расстройств бинокулярного зрения (косоглазия и амблиопии) в специализированных детских садах для детей с нарушениями зрения в Москве, Санкт-Петербурге и других городах (Рожкова и др., 1998; Ефимова, Сомов, 2011; Кашура и др., 2012; Тимошенко, Штилерман, 2013; Кононова, Сомов, 2020). Позднее была создана исследовательская программа ФУРОР, специально предназначенная для измерения и развития ФР, использование которой позволило изучить зависимость ФР от ряда факторов и влияние на ФР разных условий измерения (Васильева, Рожкова, 2009; 2011; 2020; Рожкова и др., 2009; Васильева, 2010; 2011; Vasilyeva, Rozhkova, 2008; Rozhkova, Vasilyeva, 2010; Bolshakov et al., 2013; Vasilyeva, 2014; 2016). В программе ФУРОР была впервые реализована система объективного контроля процесса измерения ФР: были введены специальные метки, меняющиеся по ходу процедуры и помогающие объективно оценить момент срыва (разрушения) фузии. Система этих меток может играть роль “детектора лжи” (или индикатора ошибки), позволяющего выявлять случаи, когда испытуемый (пациент) неверно указывает момент распада единого бинокулярного образа на два монокулярных, называя (или показывая на экране) не ту метку, которую он должен был видеть перед моментом нарушения фузии.

Общий анализ особенностей и результатов измерения ФР различными методами приведен в

нашей недавней работе (Васильева и др., 2022), где рассмотрены в сравнительном аспекте все три основных метода измерения ФР, которые применяются на современном этапе: призмный, синоптофорный и компьютерный. Настоящая статья посвящена только оценке точности компьютерного метода на основе показателей работы последней версии программ ИППИ РАН для измерения ФР – программы ФУЗИЯ (Большаков, Рожкова, 2013). Данная программа демонстрировалась в рамках мастер-класса “Современные 3D-технологии в компьютерном лечении нарушений бинокулярного зрения” на международной офтальмологической конференции “Невские горизонты” (2016 г., г. Санкт-Петербург) и на выставке “Парадоксы бинокулярного восприятия, бинокулярные эффекты и иллюзии; тесты для оценки стереозрения” в рамках X Международной научно-практической конференции “Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях” (2018 г., г. Москва). Программа также применялась для оценки ФР у офтальмохирургов, участвовавших в апробации 3D-платформы для глазной микрохирургии (Морозова и др., 2018). Во время проведения мастер-класса на конференции “Невские горизонты” было организовано обучение работе с программами для лечения амблиопии и развития фузии (из комплекса 3D-БИС), предусматривающими использование 3D-мониторов и стереочков, реализующих поляризационный метод сепарации изображений на основе круговой поляризации света.

При разработке программы ФУЗИЯ был учтен опыт работы с предыдущими программами, предназначенными для измерения ФР, так что она превосходит их по своим возможностям, поэтому для оценки перспективности компьютеризации была выбрана именно эта программа. Естественно, что она тоже может быть улучшена; в данной статье на основе опыта ее использования обсуждаются наиболее рациональные подходы к ее применению и целесообразные изменения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось в лаборатории “Зрительные системы” ИППИ РАН с использованием последней версии авторской программы ФУЗИЯ. Было проведено две серии экспериментов: для оценки воспроизводимости результатов (серия I – “тест–ретест”) и для оценки эффекта введения в тест-объекты специальных меняющихся меток для контроля момента нарушения фузии (серия II – “эффект метки”). В соответствии с характером задачи в первой серии экспериментов участвовало больше испытуемых.

Испытуемые

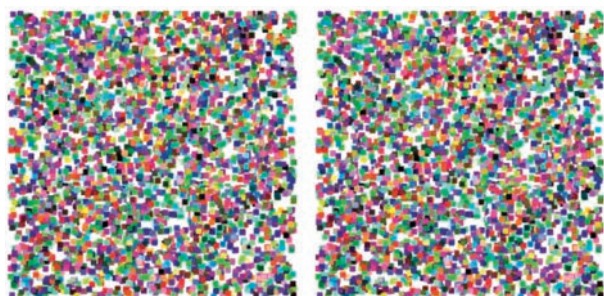
В экспериментах принял участие 21 человек в возрасте от 27 до 63 лет (средний возраст 40.2 года, 10 женщин, 11 мужчин) с нормальной или скорректированной до нормы остротой зрения. Из них в серии I – “тест–ретест” участвовали 20 человек (9 женщин и 11 мужчин), в серии II – “эффект метки” – 12 человек (6 женщин и 6 мужчин). Испытуемые участвовали в исследовании добровольно, от них было получено информированное согласие на проведение процедуры измерений. Большинство участников (16 человек) раньше не имели опыта работы с программой ФУЗИЯ. Условием участия в исследовании было нормальное функционирование механизмов стереопсиса на основе бинокулярной диспаратности. Отбор испытуемых был проведен по результатам успешности восприятия тестовых случайно-точечных стереограмм (СТС) из монографии Юлеша (Julesz, 1971). Все измерения были проведены одним и тем же экспериментатором.

Организация исследования соответствовала принципам биомедицинской этики, изложенным в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях (Declaration of Helsinki, 2013).

Характеристика и использование компьютерной программы ФУЗИЯ

Назначение интерактивной компьютерной программы ФУЗИЯ – количественная оценка, развитие и укрепление фузионных механизмов. В программе реализованы возможности выбрать метод сепарации левого и правого изображений (цветовой или поляризационный), задавать параметры тестовых объектов (угловой размер стимулов, угловой размер зерна СТС, скорость движения, диспаратность) и объективно контролировать субъективные показания пациентов о моментах нарушения и восстановления фузии (*break point* и *recovery point*) при измерении ФР без наблюдения за движениями глаз. Для реализации поляризационного метода сепарации необходим специальный монитор с противоположной круговой поляризацией излучения (по часовой стрелке и против часовой стрелки) в четных и нечетных горизонтальных строках пикселей дисплея.

В настоящем исследовании в качестве такого монитора использовали 3D-телевизор LG 32LF620U с соответствующим поляризационным экраном. Его параметры: диагональ 32", ширина экрана 70.84 см, размер пикселя 0.51 мм. В качестве измерительных тестовых стимулов использовали СТС, имеющие размеры 90 × 90 мм. СТС содержали закодированные диспаратностью контрольные стереообъекты (так называемые циклопические метки), слегка выступающие из фона за



Для левого глаза

Для правого глаза

Рис. 1. Пример СТС, используемой в программе ФУЗИЯ. Левая и правая части СТС показаны рядом, но в начальный момент они совмещены в центре экрана. Данная стереограмма кодирует крест, выступающий из фона.

счет диспаратности при наблюдении через стереоочки. Циклопические метки воспринимались только при условии объединения информации от двух глаз, т.е. при успешной фузии. Пример используемых в программе СТС с монокулярно неразличимыми стереообъектами приведен на рис. 1. Размер отдельных “точек” – элементов СТС – составлял 5×5 пикселей.

Скорость движения стимулов по экрану можно было варьировать. В данных экспериментах она равнялась 90 мм/мин. Зрительные стимулы для левого и правого глаза генерировались отдельно на четных и нечетных строках экрана и рассматривались через соответствующие поляризационные стереоочки. При генерации случайноточечных паттернов использовали разноцветные элементы.

Процедура проведения измерений

Процесс проведения измерений ФР с использованием программы ФУЗИЯ поясняется на рис. 2, где представлены основные этапы ознакомительного эксперимента. Испытуемого усаживали на стуле регулируемой высоты, а положение его головы фиксировали при помощи подбородника и налобника так, чтобы расстояние наблюдения составляло 50 см и не менялось.

Перед началом измерений экспериментатор проводил ознакомление испытуемого с процедурой оценки ФР. При этом на втором этапе отдельно показывались метки, которые испытуемому нужно было воспринимать внутри СТС в циклопическом виде. В дальнейшей работе этот этап не требовался.

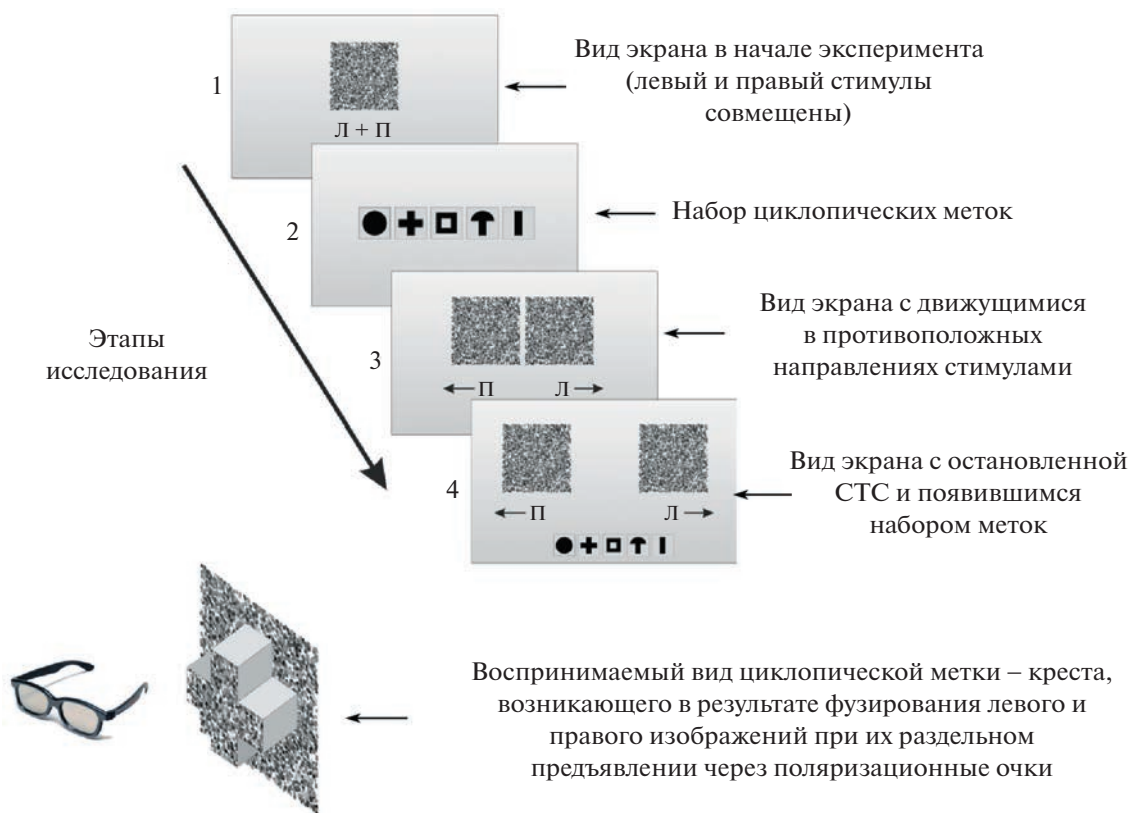


Рис. 2. Пояснение процесса проведения измерений.

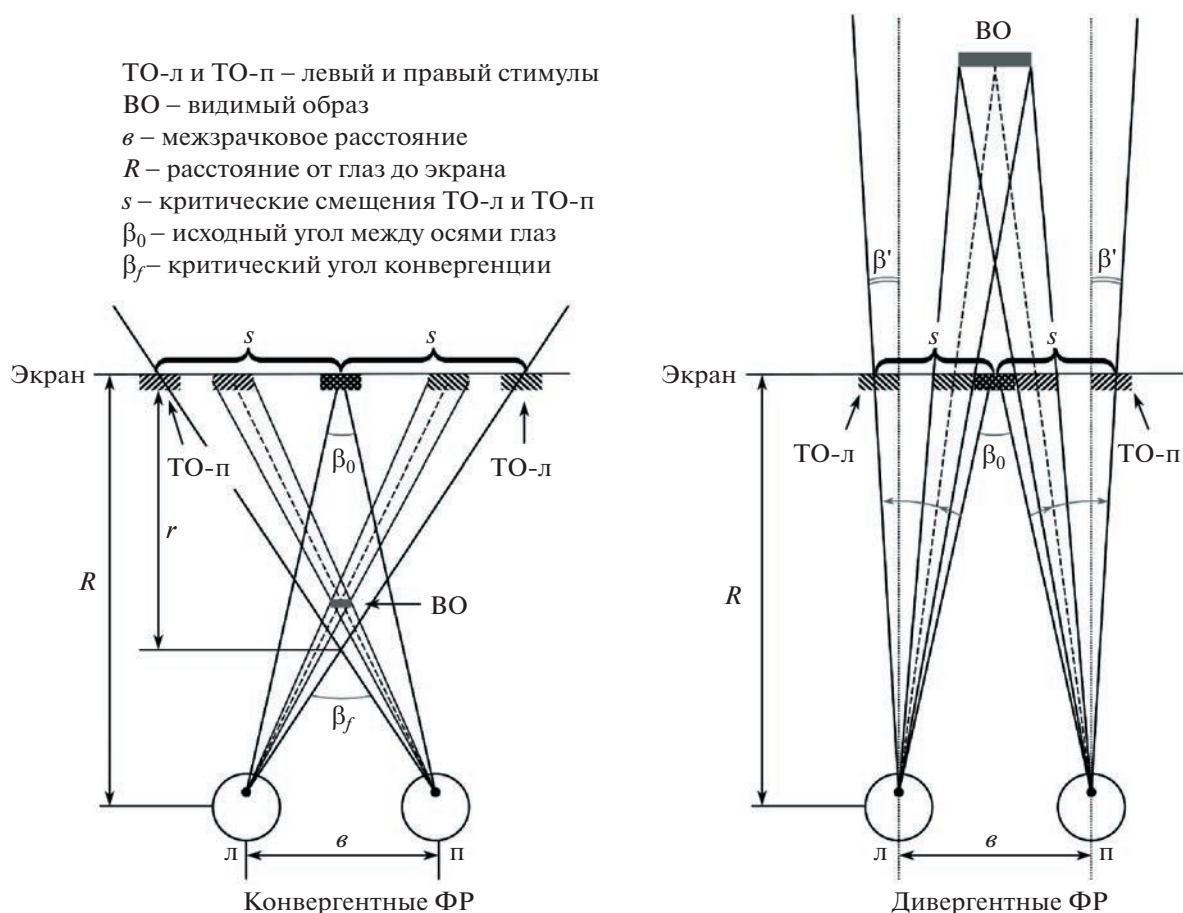


Рис. 3. Схемы измерения конвергентных и дивергентных ФР (пояснение в тексте).

В начале каждого измерения в центре экрана появлялась стереопара, при фузировании которой испытуемый видел тест-объект – квадрат со случайно-точечной текстурой и контрольный объект с этой же текстурой, отделяющийся от фона по глубине. Этот объект служил циклопической меткой, помогающей контролировать момент разрушения фузии. После подтверждения испытуемым успешного восприятия СТС и готовности к измерениям экспериментатор запускал программу медленного расхождения левого и правого стимулов. В процессе измерения ФР левое и правое изображения, исходно совмещенные в центре экрана, начинали двигаться по горизонтали в разные стороны, вызывая конвергентные или дивергентные движения глаз и приводя к рассогласованию аккомодации и конвергенции. Схемы измерения конвергентных и дивергентных ФР представлены на рис. 3.

На данном рисунке начальные и конечные позиции осей глаз показаны сплошными линиями, промежуточные позиции – штриховыми линиями. Для случая измерения конвергентных резервов указано критическое расстояние r до вирту-

ального бинокулярно воспринимаемого образа перед его распадом на два монокулярных в момент достижения предельно выносимой избыточной конвергенции. При измерении дивергентных ФР аналогичное расстояние можно указать только в случае малых ФР, поскольку при относительно больших ФР (как на чертеже) позиция виртуального видимого образа отразить невозможно: он формируется на разведенных осях, т.е. “дальше бесконечности”. По этой причине на схеме измерения дивергентных ФР позиция видимого образа показана не для критического, а для промежуточного смещения тест-объектов от центра экрана. Для больших дивергентных ФР не удастся отразить на схеме и критический угол дивергенции, вместо него на чертеже показаны углы β' , отражающие повороты осей глаз после достижения параллельности (“довороты” до критической позиции).

По ходу движения циклопические объекты-метки внутри тестовых стимулов менялись, что удерживало внимание испытуемого и позволяло точно установить момент распада бинокулярного образа. С увеличением рассогласования видимый

циклопический объект (ВО) начинал слегка подергиваться, расплываться и, наконец, исчезал вследствие нарушения фузии, а весь единый бинокулярный образ распадался на два монокулярных плоских компонента СТС.

Перед испытуемым ставилась задача: как можно дольше удерживать состояние фузии, внимательно следя за сменой меток, чтобы констатировать момент потери фузии и исчезновения бинокулярного образа. В момент распада виртуального бинокулярного образа щелчком мыши останавливали движение стимулов и выводили на экран полный набор контрольных объектов-меток. Испытуемому предлагалось выбрать объект-метку, воспринимаемый непосредственно перед моментом распада. При правильном ответе испытуемого на основании позиций стимулов на экране программа вычисляла ФР – избыточные углы конвергенции или дивергенции, при которых испытуемый еще был способен сохранять состояние фузии и видеть единый бинокулярный образ. Все результаты измерений регистрировали автоматически и после эксперимента выводили на экран.

При каждом измерении ФР испытуемому давали три попытки, результаты которых анализировали раздельно, и совместно.

Обработка полученных данных

Числовые значения ФР получали на основании оценки изменений угла между осями глаз от начальной позиции до позиции, соответствующей распаду бинокулярного образа. Для конвергентных и дивергентных ФР эти значения вычисляли по формулам.

Конвергентные ФР

$$\text{ФР} = \beta_f - \beta_o = 2\{\arctg(b + 2s)/2R - \arctgb/2R\}$$

Дивергентные ФР

При $2s < b$:

$$\text{ФР} = \beta_f - \beta_o = 2\{\arctg(b - 2s)/2R - \arctgb/2R\}$$

При $2s \geq b$:

$$\begin{aligned} \text{ФР} &= -(\beta_o + 2\beta') = \\ &= -2\{\arctgb/2R + \arctg(b - 2s)/2R\}. \end{aligned}$$

В последней формуле учтено, что оси глаз сначала разводятся до параллельного состояния (т.е. суммарно на угол β_o), а затем каждая ось поворачивается на дополнительный угол β' . Следует отметить, что в приведенных формулах присутствует только одна величина (s), регистрируемая в процессе измерения ФР. Две другие величины (b и R) вводятся заранее как параметры процедуры, причем параметр b (межзрачковое расстояние у испытуемого) вводится как постоянная величина,

на, хотя межзрачковое расстояние немного меняется при изменении позиции осей глаз.

В научных публикациях и руководствах для оптометристов нормативы по ФР выражаются в угловых градусах или призмённых диоптриях. При необходимости перевода значений силы призмы в углы отклонения лучей, и, наоборот, используют формулы:

$$\sigma = \arctg(W/100),$$

$$W = 100\text{tg}\sigma,$$

где σ – угол отклонения лучей в градусах, а W – сила призмы в призмённых диоптриях. Согласно определению, W численно равна расстоянию в сантиметрах, на которое световой луч, пройдя через призму, отклоняется в сторону на расстоянии 1 м (100 см) от нее (Сергиенко, 1991).

Статистический анализ полученных результатов проводили методами описательной и вариационной статистики с использованием программных пакетов “SPSS statistics, ver.25” (IBM, США) и “Microsoft Excel-2010” (Microsoft Office 2010, Microsoft, США). Для описания распределения вычисляли среднее арифметическое, стандартное отклонение, ошибку среднего, диапазон. Для сравнения средних результатов теста и ретеста и оценки эффекта циклопических меток использовали критерии сравнения средних при повторных измерениях и корреляционный анализ. Значимыми принимались различия на уровне $p < 0.05$. Взаимосвязь между изучаемыми показателями определяли при помощи коэффициентов линейной корреляции Пирсона. Согласованность результатов анализировали методом Бленда-Альтмана (для оценки 95%-ных границ согласованности использовали параметрические методы) (Bland, Altman, 1999; 2007).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты оценки воспроизводимости данных при измерениях ФР с использованием интерактивной компьютерной программы ФУЗИЯ и оценки эффективности применяемого объективного контроля приведены ниже отдельно для двух серий экспериментов: “тест-ретест” (серия I) и “эффект метки” (серия II).

I серия измерений: “тест-ретест”

В этой серии измерений использовали основную версию программы ФУЗИЯ с меняющимися циклопическими метками. Два сеанса измерений (тест и ретест) были разделены интервалом около суток. На надежность метода должна указывать схожесть результатов при повторении измерений. Соответствующие статистические показатели совокупностей данных, полученных для конвер-

Таблица 1. Статистические показатели результатов первого измерения ФР (теста)

Статистика $N = 20$	Конвергентные резервы (угловые градусы)				Дивергентные резервы (угловые градусы)			
	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам
Среднее значение	38.7	41.4	43.6	41.2	-10.4	-10.8	-10.7	-10.7
Стандартное отклонение	10.8	10.0	8.9	9.2	2.2	2.7	2.4	2.3
Стандартная ошибка	2.4	2.2	1.9	2.0	0.5	0.6	0.5	0.5
Диапазон	40.7	36.3	28.6	35.2	9.7	11.0	10.3	9.8
Минимум	11.0	23.7	27.8	20.8	-4.0	-3.5	-3.4	-3.7
Максимум	51.7	60.0	56.4	56.0	-10.4	-14.5	-13.7	-13.5

Таблица 2. Статистические показатели результатов повторного измерения ФР (ретеста)

Статистика $N = 20$	Конвергентные резервы (угловые градусы)				Дивергентные резервы (угловые градусы)			
	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам
Среднее значение	38.9	41.6	40.8	40.5	-10.0	-9.5	-9.8	-9.7
Стандартное отклонение	9.7	9.6	10.9	9.6	2.9	3.5	3.1	3.1
Стандартная ошибка	2.1	2.1	2.4	2.1	0.6	0.8	0.7	0.7
Диапазон	36.9	34.9	43.1	37.6	11.2	13.5	11.8	11.6
Минимум	20.4	22.7	12.8	19.3	-3.2	-1.7	-2.0	-2.3
Максимум	57.3	57.6	55.9	56.9	-14.4	-15.2	-13.8	-13.9

гентных и дивергентных ФР в двух последовательных сеансах измерений, тесте и ретесте, представлены в табл. 1 и 2 и на рис. 4 и 5.

Из сравнения табл. 1 и 2 видно, что для конвергентных ФР все сопоставляемые показатели, вычисленные по результатам измерений ФР в тесте и ретесте, оказались достаточно близкими. По средним данным на основе трех измерений при первичном и повторном тестировании конвергентные резервы составили $41.2 \pm 9.2^\circ$ и $40.5 \pm 9.6^\circ$. Различие между этими значениями по критерию Стьюдента не является статистически значимым ($p = 0.51$, тогда как для подтверждения значимости требуется $p < 0.05$). Коэффициент корреляции данных теста и ретеста для конвергентных ФР составил 0.844 (по Пирсону), что свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов.

Данные по дивергентным ФР оказались не столь однозначными. Для средних значений дивергентных ФР в тесте и ретесте были получены

как будто бы близкие значения: $-10.7 \pm 2.3^\circ$ и $-9.7 \pm 3.1^\circ$ соответственно. Однако разность между ними, хотя и была малой (1°), оказалась статистически значимой. Для дивергентных ФР расчет дал $p = 0.02$ (как по критерию Стьюдента, так и по критерию Вилкоксона), что свидетельствует о значимости различий между данными теста и ретеста ($p < 0.05$). При этом коэффициент корреляции Пирсона для значений дивергентных ФР, полученных при первичном и повторном измерении, оказался достаточно высоким (0.866), не ниже, чем для конвергентных ФР.

Существенное различие между данными по конвергентным и дивергентным ФР хорошо видно на бокс-плотах, приведенных на рис. 4, а также на графиках, построенных по методу Бленда-Альтмана (рис. 5).

На рис. 4 представлены бокс-плоты, отражающие средние значения и разброс результатов измерений ФР. Эти бокс-плоты наглядно демон-

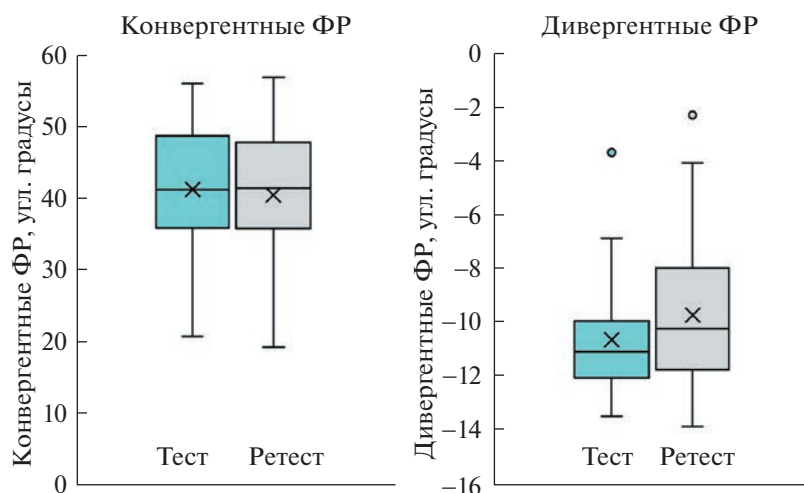


Рис. 4. Бокс-плоты для результатов оценки конвергентных и дивергентных ФР при первичном и повторном измерениях.

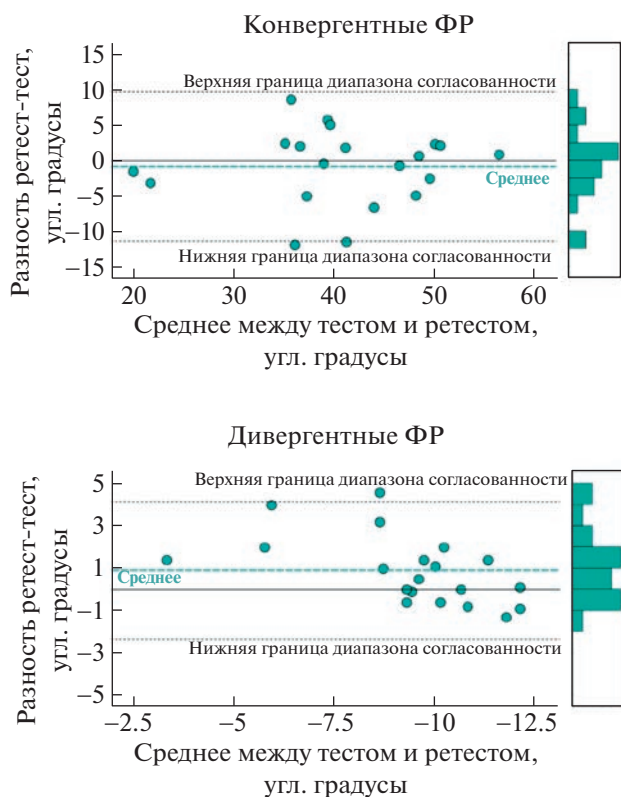


Рис. 5. Данные графического анализа воспроизводимости результатов при повторном измерении (по методу Бленда-Альтмана).

По оси абсцисс – средние значения между результатами измерений в тесте и ретесте для каждого испытуемого; по оси ординат – соответствующие значения разности между данными теста и ретеста. Штриховая линия – среднее значение разности; пунктирные линии – границы зоны согласованности. Гистограммы справа отражают количество испытуемых со значениями разности, попадающими в соответствующие интервалы.

стрируют хорошее соответствие данных теста и ретеста по конвергентным ФР и более сложную ситуацию в случае дивергентных ФР. В то время как бокс-плоты для данных по конвергентным ФР, полученным в тесте и ретесте, очень схожи между собой, на бокс-плотах для дивергентных ФР при повторном измерении явно заметно уменьшение абсолютной величины среднего значения и бросается в глаза увеличение разброса результатов. (Из-за того, что дивергентные ФР обычно в несколько раз меньше конвергентных, корректности сопоставления достичь трудно, поэтому на рис. 4 для наглядности мы ограничились примерным общим уравниванием величины рисунков). Кроме того, из бокс-плотов для дивергентных ФР видно, что при повторном измерении (ретесте) результаты, в среднем, оказались хуже, чем при первичном измерении, т.е. не было ожидаемого и обычно наблюдаемого эффекта обучения, а был некоторый негативный эффект, свидетельствующий о возрастании трудности выполнения задачи. Возможно, это связано с тем, что измерение дивергентных ФР психофизиологически более дискомфортно для испытуемых, чем измерение конвергентных ФР (о чем подробнее сказано ниже, при общем обсуждении результатов), и требует изменения режима проведения экспериментов для лучшего усвоения задачи и более полноценного отдыха в интервале между тестом и ретестом.

Аналогичное заключение можно сделать, проведя анализ полученных данных методом Бленда-Альтмана (рис. 5), основанным на отражении индивидуальных результатов. При таком анализе на графиках по горизонтальной оси откладываются средние значения двух результатов измерения для каждого испытуемого, а по вертикальной – раз-

ность этих результатов. Кроме точек, соответствующих отдельным испытуемым, горизонтальными линиями на панели отмечают уровни средних значений разности (штриховые линии) и так называемый диапазон согласованности результатов двух измерений. На рис. 5 пунктирными линиями обозначены верхняя и нижняя границы диапазона согласованности, в который попадает 95% всех разностей (Bland, Altman, 1999; 2007).

Метод Бленда-Альтмана позволяет выявить факторы, которые существенно влияют на результаты, но не выявляются при более общем анализе. Так, на рис. 5 видно, что самые большие (по модулю) разности между тестом и ретестом встречались в средней части диапазона полученных значений ФР, а для испытуемых с лучшими ФР были характерны небольшие различия между двумя измерениями. Для суждения об испытуемых с малыми ФР полученных данных недостаточно, но очевидно, что тут малые значения разностей определяются в основном малыми значениями самих ФР.

При дополнительном анализе индивидуальных данных были получены следующие результаты. Разность средних (по трем попыткам) индивидуальных значений конвергентных ФР по тесту и ретесту у 12 испытуемых оказалась в диапазоне от $|0.4|^\circ$ до $|3.1|^\circ$; у трех испытуемых от $|4.9|^\circ$ до $|5.8|^\circ$; у пяти — от $|5.8|^\circ$ до $|11.9|^\circ$. Разность средних индивидуальных показателей дивергентных ФР по тесту и ретесту у 11 испытуемых была в диапазоне от 0° до $|1|^\circ$; у семи испытуемых от $|1.4|^\circ$ до $|2|^\circ$; у двоих — $|3.2|^\circ$ и $|4.6|^\circ$ соответственно.

Чтобы получить представление об ожидаемой точности оценки ФР были также вычислены вероятные погрешности результата измерений. Для конвергентных ФР вероятная погрешность оказалась равной 1.39° и 1.44° в тесте и ретесте, что соответствует середине интервала для наиболее многочисленной первой подгруппы (12 из 20 человек) по разности индивидуальных значений в первом и повторном измерении. Для дивергентных ФР вероятная погрешность оказалась равной 0.34° и 0.46° в тесте и ретесте, что также соответствует самой многочисленной первой подгруппе.

Более точные оценки требуют большего числа испытуемых и систематического варьирования параметров тест-объектов для выбора условий измерения, обеспечивающих наилучшую стабильность результатов. При этом очевидно, что у разных испытуемых потенциальная точность измерений может значительно различаться не только из-за индивидуальных особенностей зрительной системы, но также и из-за возможного влияния различных психофизиологических факторов.

II серия измерений: “эффeкт метки”

Для оценки влияния наличия-отсутствия объективного контроля нарушения фузии с использованием циклопических меток сравнивали результаты двух сеансов экспериментов, отличающихся тем, что в одном из сеансов генерация меток была отключена. Статистические показатели измерений ФР, проведенных с использованием и без использования случайно меняющихся циклопических меток, приведены в табл. 3 и 4 для конвергентных и дивергентных ФР соответственно.

В табл. 5 представлены средняя разность, стандартные отклонения, стандартная ошибка среднего, границы 95%-ного доверительного интервала для разности и значение p для парных сравнений двух выборок значений ФР, полученных в сеансах с наличием и отсутствием объективного контроля нарушения фузии.

Коэффициенты корреляции результатов, полученных при измерениях в сеансах с наличием и отсутствием объективного контроля, составили 0.765 ($p = 0.004$) для конвергентных ФР и 0.599 ($p = 0.04$) для дивергентных ФР.

Анализ данных, представленных в табл. 3–5, демонстрирует, что наличие циклопических меток повлияло на разные показатели в различной степени. Влияния объективного контроля на средние и максимальные значения ФР не было обнаружено. Различия средних значений конвергентных (44.4° против 42.3°) и дивергентных (-10.9° против -11.3°) ФР, а также их максимальных значений (56.0° против 58.4° для конвергентных ФР и -13.2° в обоих сеансах — для дивергентных ФР) не достигало статистической значимости. Малое различие между средними значениями может свидетельствовать о том, что у большинства испытуемых СТС достаточно хорошо удерживали внимание и в отсутствие меняющихся меток, а малое различие между максимальными показателями может объясняться тем, что они отражают физиологический предел функционирования фузионной системы испытуемых.

В то же время остальные четыре показателя конвергентных ФР явно демонстрируют положительное влияние объективного контроля на результаты измерений: при введении контрольной циклопической метки стандартное отклонение и стандартная ошибка существенно уменьшались (с 11.4 до 6.8 и с 3.3 до 1.9), диапазон разброса результатов между попытками сужался (с 31.7 до 24.2), а минимальные регистрируемые значения увеличивались (с 26.7° до 31.8°). Уменьшение первых трех показателей — это разные проявления повышения точности измерений, связанного с более четкой регистрацией момента нарушения фузии. Изменение последнего показателя, хотя оно и имеет другой знак, тоже отражает повышение

Таблица 3. Данные статистической обработки значений конвергентных ФР, полученных в сеансах измерений с наличием и отсутствием объективного контроля нарушения фузии

Статистика $N = 20$	Значения конвергентных ФР (угловые градусы)							
	С объективным контролем				Без объективного контроля			
	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам
Среднее значение	43.4	44.2	45.6	44.4	40.8	42.4	43.5	42.3
Стандартное отклонение	6.3	8.9	7.8	6.8	14.1	11.6	9.4	11.4
Стандартная ошибка	1.8	2.5	2.5	1.9	4.0	3.3	2.7	3.3
Диапазон	18.7	31.3	24.4	24.2	39.6	37.0	26.7	31.7
Минимум	33.0	28.7	32.0	31.8	18.9	23.6	29.4	26.7
Максимум	51.7	60.0	56.4	56.0	58.5	60.6	56.1	58.4

Таблица 4. Данные статистической обработки значений дивергентных ФР, полученных в сеансах измерений с наличием и отсутствием объективного контроля нарушения фузии

Статистика $N = 20$	Значения дивергентных ФР (угловые градусы)							
	С объективным контролем				Без объективного контроля			
	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам	I попытка	II попытка	III попытка	Среднее по трем попыткам
Среднее значение	-11.0	-11.0	-10.6	-10.9	-11.4	-10.8	-11.6	-11.3
Стандартное отклонение	1.8	2.1	2.1	1.9	2.0	2.1	1.3	1.8
Стандартная ошибка	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.4	0.5
Диапазон	6.3	6.6	6.8	6.1	6.8	7.2	4.4	6.7
Минимум	-7.4	-7.5	-6.0	-7.1	-4.2	-6.0	-9.3	-6.5
Максимум	-13.7	-14.1	-12.8	-13.2	-13.9	-10.8	-13.7	-13.2

Таблица 5. Данные статистического анализа различий в результатах измерений с наличием и отсутствием объективного контроля нарушения фузии

Пара	Средняя разность	Стандартное. отклонение разности	Станд. ошибка среднего	Границы 95% доверительного интервала для разности		t	p
				Нижняя	Верхняя		
Конвергентные резервы (с меткой и без метки)	2.15	7.61	2.19	-2.68	6.98	0.97	0.34
Дивергентные резервы (с меткой и без метки)	-0.36	3.42	0.76	-0.43	-0.25	0.78	0.32

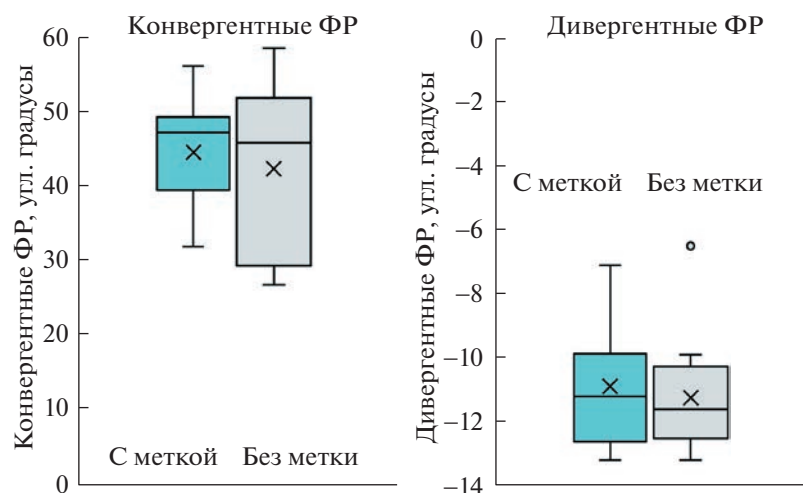


Рис. 6. Бокс-плоты для результатов оценки конвергентных и дивергентных ФР в условиях наличия и отсутствия метки для объективного контроля нарушения фузии.

ние точности, так как говорит о сужении диапазона разброса результатов за счет приближения минимальных значений к максимальным.

При анализе показателей дивергентных ФР аналогичного положительного влияния метки не обнаруживается, что можно связать с относительно малыми значениями дивергентных ФР, которые обычно в несколько раз меньше конвергентных ФР. По-видимому, на сравнительно коротком интервале времени от начала измерения дивергентных ФР до момента достижения критического угла (разрушения фузии) число смены случайных меток было слишком малым для проявления эффекта их наличия. Однако можно ли менять случайные метки чаще – это отдельный вопрос, который требует дополнительного изучения.

Для наглядного представления результатов, полученных при оценке эффекта наличия / отсутствия циклопических меток, на рис. 6 и 7 приведены соответствующие бокс-плоты и графики, построенные по методу Бленда-Альтмана.

Бокс-плоты (рис. 6) убедительно демонстрируют, что в случае измерения конвергентных ФР использование меток приводило к существенному снижению разброса получаемых результатов, и, значит, к повышению точности измерений. Однако в случае измерения дивергентных ФР метки не обеспечивали такого улучшения, и скорее наблюдалась обратная тенденция, т.е. метки несколько затрудняли испытуемым выполнение задачи.

В целом результаты двух проведенных серий исследования ФР показали, что использование компьютерного метода оценки конвергентных ФР может обеспечить хорошую воспроизводимость результатов измерения, а введение в про-

грамму циклопических меток для объективного контроля момента нарушения фузии позволяет существенно повысить точность измерения, снижая разброс результатов.

Что касается измерения дивергентных ФР, то аналогичных убедительных и однозначных результатов в данной работе не получено. К сожалению, оценку дивергентных ФР осложняют несколько принципиальных обстоятельств. Немаловажную роль здесь играет специфика психофизиологического механизма формирования бинокулярных видимых образов. Если при измерении конвергентных ФР видимые образы, теоретически (в рамках геометрической оптики), должны формироваться в предэкранном пространстве в области пересечения сходящихся зрительных осей двух глаз (как и в естественных условиях наблюдения), то при измерении дивергентных ФР бинокулярные видимые образы, теоретически, вообще в большинстве случаев (при $\text{ФР} \geq \beta_0$) не должны формироваться, так как пределы фузии соответствуют наблюдению на расходящихся зрительных осях, которые не пересекаются. Даже в случае малых значений дивергентных ФР, когда предельные позиции осей глаз не достигают состояния параллельности, есть специфические трудности: бинокулярные видимые образы теоретически должны формироваться на больших расстояниях за непрозрачным экраном дисплея, что противоречит повседневному опыту испытуемых при наблюдении естественных сцен.

Другое важное обстоятельство – это сравнительно малая величина дивергентных ФР, из-за которой на измерение влияют факторы, практически не отражающиеся на измерении конвергентных ФР. К числу таких факторов можно отнести несовпадение оптических и зрительных

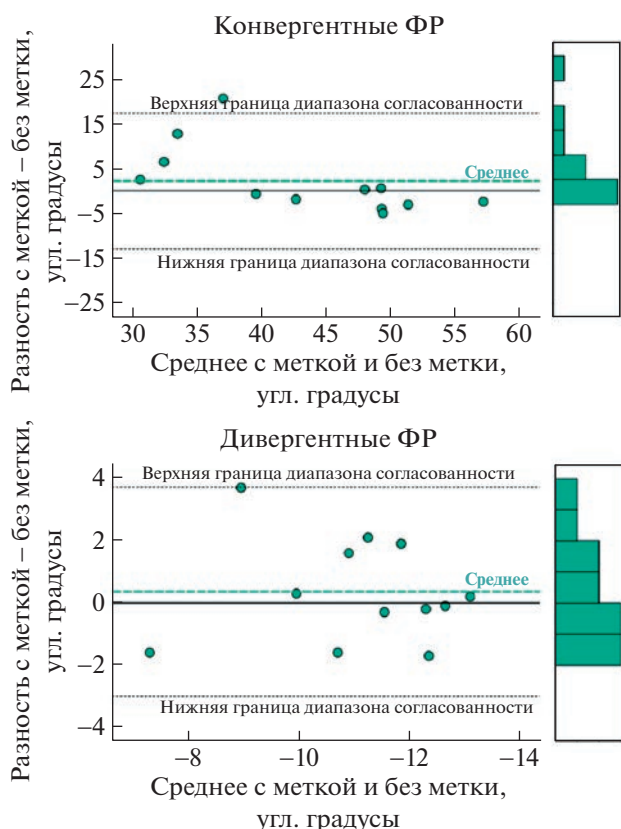


Рис. 7. Данные графического анализа (по методу Бленда-Альтмана) различий в результатах измерений ФР, проведенных в условиях наличия и отсутствия метки для объективного контроля момента нарушения фузии.

осей глаз (типичный угол расхождения составляет 5° , но может и превышать 10° (Кузнецов, 2009; Tscherning, 1924)), естественный хромостереопсис и другие особенности глазной оптики. К сожалению, их учет требует как теоретической проработки, так и дополнительного кропотливого исследования зрения испытуемых для адекватной трактовки результатов эксперимента.

В целом полученные результаты указывают на перспективность создания программ, аналогичных ФУЗИИ. Статьи, подтверждающие актуальность таких разработок из-за плохой воспроизводимости показателей как положительных, так и отрицательных ФР, при повторных измерениях появляются до последнего времени (Sassonov et al., 2010; Fray, 2013; Alrasheed, Aldakhil, 2022). Сравнение ФР, измеренных разными методами у испытуемых разного возраста, также однозначно свидетельствуют о необходимости более широкого внедрения компьютерных методов.

Интересно отметить, что используемый нами метод объективного контроля потери фузии при помощи исчезающих циклопических меток напоминает активно развиваемые с конца прошло-

го века методы “объективизации” измерений остроты зрения с использованием исчезающих опто типов (Frisen, 1986; Adoh et al., 1992; 2003; Shah et al., 2016; Hamm et al., 2018 ab; Коскин и др., 2007; Коскин, 2009). Этот подход базируется на создании опто типов с объектами, которые также перестают восприниматься на пределе разрешающей способности испытуемого.

Как положительные, так и отрицательные результаты проведенного исследования можно использовать в целях совершенствования программ для измерения ФР. Особенно это касается дивергентных ФР, для измерения которых, по-видимому, нужно использовать другие параметры измерительной процедуры. Учитывая трудности, возникающие у испытуемых при формировании бинокулярных образов на разведенных осях, можно, к примеру, опробовать режим ступенчатого движения стимулов, при котором будут остановки, облегчающие испытуемому сосредоточение на задаче. В традиционном призмном методе с использованием линейки призм с разной преломляющей силой реализовано именно ступенчатое изменение стимулов для конвергенции и дивергенции. Полученные в работе данные указывают на то, что для выбора оптимальных процедур измерения необходимо проведение дальнейшего более глубокого сравнительного анализа различных методов измерения фузионных способностей человека.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ экспериментов по измерению ФР с использованием интерактивной компьютерной программы ФУЗИЯ и полученного опыта работы с этой программой позволяет выделить следующие основные результаты и выводы.

- Сопоставление данных первичного и повторного измерений конвергентных ФР в серии экспериментов “тест-ретест” показало перспективность компьютерных методов в отношении обеспечения достаточной точности и воспроизводимости получаемых данных.

- Введение в тест-объекты случайно меняющихся циклопических меток для объективного контроля нарушения фузии, являющегося ключевым моментом измерения ФР, подтвердило возможность существенного уменьшения разброса получаемых данных при измерении конвергентных ФР.

- Обнаружено, что при использовании СТС в качестве тест-объектов введение меняющихся циклопических меток, уменьшающих разброс результатов измерения конвергентных ФР, не влияет на средние значения ФР, указывая, во-первых, на то, что и обычные неизменные тестовые СТС обеспечивают сравнительно прочную фузию, а

во-вторых, на то, что обычные СТС достаточно хорошо удерживают внимание испытуемых. Это означает, что при скрининговых обследованиях можно ограничиваться режимом без циклопических меток, который требует меньшего времени и участия медперсонала. В частности, такой режим может существенно ускорить сбор недостающих данных в исследованиях по возрастной физиологии при оценке конвергентных ФР у детей, а также формирование других баз данных.

– Использование объективного контроля с применением циклопических меток представляется целесообразным и перспективным в экспертной практике, где точность измерений критична, так как стоит задача выявлять симулянтов, аггравантов и диссимулянтов. Контроль особенно важен в тех случаях, когда испытуемого подозревают в намерении зависить свои результаты, например, для получения разрешения на работу.

Авторы выражают благодарность А.В. Белокопытову за техническую помощь.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаков А.С., Рожкова Г.И. *Интерактивная тестовая программа для оценки состояния и тренировки фузионных механизмов бинокулярного зрения ФУЗИЯ*. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610975 от 09.01.2013.
- Васильева Н.Н. Оценка бинокулярных зрительных функций у младших школьников с трудностями обучения чтению. *Новые исследования*. 2011. № 2 (27). С. 5–15.
- Васильева Н.Н. Фузионные резервы у детей 5–7 лет с различным биологическим возрастом. *Новые исследования*. 2010. № 2 (23). С. 24–30.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Возрастная динамика фузионных резервов, измеренных при помощи циклопических тест-объектов с маркерами. *Сенсорные системы*. 2009. Т. 23. № 1. С. 40–50.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Сравнение результатов оценки фузионных резервов различными методами. *Невские Горизонты-2020. Материалы научной конференции офтальмологов с международным участием*. СПб. ООО “Пиастр Плюс”. 2020. С. 92–93.
- Васильева Н.Н., Рожкова Г.И. Тренировка бинокулярных зрительных функций у младших школьников с трудностями в чтении как фактор коррекционной работы. *Новые исследования*. 2011. № 3 (28). С. 5–16.
- 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>
- Дмитриева С.В., Грачева М.А., Васильева Н.Н., Смолевский А.Е., Манько О.М. Оценка влияния условий имитации невесомости на зрительную работоспособность. *Известия Российской Военно-Медицинской Академии*. 2018. Т. 37 (2). С. 97–101.
- Ефимова Е.Л. *Компьютерные плеопто-ортоптические методы лечения вторичной амблиопии у детей*. Автореф. дисс. канд. мед наук. СПб. 2011. 20 с.
- Ефимова Е.Л., Сомов Е.Е. Современный способ лечения амблиопии вторичного генеза и его эффективность. *Офтальмологические ведомости*. 2010. Т. 3. № 3. С. 10–13.
- Кашура О.И., Егоров В.В., Смолякова Г.П. Эффективность функциональной реабилитации зрительных расстройств у школьников младших классов. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2012. № 1. С. 22–25.
- Кононова Н.Е. *Сенсорно-моторные нарушения в зрительной сфере детей дошкольного возраста при содружественном косоглазии*. Автореф. дисс. канд. мед наук. СПб. 2022. 25 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.
- Кононова Н.Е., Сомов Е.Е. Фузионные возможности здоровых детей различного возраста и страдающих содружественным косоглазием. *Невские Горизонты-2018. Материалы научной конференции офтальмологов*. СПб. Политехника-сервис, 2018. С. 151–152.
- Коскин С.А., Бойко Э.В., Шелепин Ю.Е. Система определения остроты зрения в целях врачебной экспертизы. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2007. № 3. С. 81–86.
- Коскин С.А. *Система определения остроты зрения в целях врачебной экспертизы*: Дис. ... докт. мед. наук. Санкт-Петербург, 2009. 178 с.
- Красноперова Н.А. Зрительная работоспособность у детей с нарушениями слуха. *Дефектология*. 2001. № 1. С. 11–17.
- Кузнецов Ю.В. *Назначение расстояния между оптическими центрами линз в очках*. СПб.: “ООО РА “Век””, 2009. 104 с.
- Морозова Т.А., Терентьева А.Е., Поздеева Н.А. 3D-технологии в офтальмологии: первый опыт. *Практическая медицина*. 2018. Т. 16. № 5. С. 144–150.
- Рожков С.Н., Овсянникова Н.А. *Стереоскопия в кино-, фото-, видеотехнике*. Терминологический словарь. М.: Парадиз, 2003. 136 с.
- Рожкова Г.И., Васильева Н.Н., Рожков С.Н. Фузионные способности человека и возможности расширения диапазона параллаксов в стереофильмах без нагрузки на зрительную систему. *Мир техники кино*. 2009. № 12. С. 11–15.
- Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Лешкевич И.А., Корнюшин М.А., Носов В.Н., Матвеев С.Г. Компьютерное лечение косоглазия и амблиопии с

- применением случайно-точечных стереограмм. *Вестник офтальмологии*. 1998. № 4. С. 28–32.
- Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Сисенгалиева Г.Ж. Компьютерное тестирование бинокулярной зрительной системы человека. II. Прямая оценка основных клинических показателей. *Сенсорные системы*. 1996а. Т. 10. № 1. С. 59–68.
- Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Токарева В.С., Воронцов Д.Д., Голубков М.Г., Дрыгин С.В. *Интегрированный лечебно-диагностический комплекс программ "АКАДЕМИК"*. 1996б. Сертификат соответствия "РОСС RU. СП07.Н00035".
- Розенблюм Ю.З. *Оптометрия*. СПб.: Гиппократ, 1996. 320 с.
- Сергиенко Н.М. *Офтальмологическая оптика*. М.: Медицина, 1991. 144 с.
- Тимошенко Т.А., Штилерман А.Л. Современные методы лечения амблиопии у детей. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2013. № 4. С. 59–62.
- Федеральные клинические рекомендации "Диагностика и лечение содружественного косоглазия". *Российская педиатрическая офтальмология*. 2015. № 2. С. 56–63.
- Adoh T.O., Woodhouse J.M., Oduwaiye K.A. The Cardiff Test: a new visual acuity test for toddlers and children with intellectual impairment. A preliminary report. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*. 1992. V. 69 (6). P. 427–432.
- Adoh T.O., Woodhouse J.M. The Cardiff acuity test used for measuring visual acuity development in toddlers. *Vision Research*. 2003. V. 34 (4). P. 555–560. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90168-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90168-6)
- Alrasheed S.H., Aldakhil S. Comparison of measured fusional vergence amplitudes using prism bar and synoptophore in Sudanese patients with near exophoria. *The Open Ophthalmology Journal*. 2022. V. 16. P. 1–7. <https://doi.org/10.2174/18743641-v16-e2209301>
- American Optometric Association. Evidence-based clinical practice guideline: comprehensive pediatric eye and vision examination. *Optometric clinical practice*. 2020. V. 2 (2). <https://doi.org/10.37685/uiwlibraries.2575-7717.2.2.1007>
- Bland J.M., Altman D.G. Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical methods in medical research*. 1999. V. 8 (2). P. 135–160.
- Bland J.M., Altman D.G. Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual. *Journal of biopharmaceutical statistics*. 2007. V. 17 (4). P. 571–582. <https://doi.org/10.1080/10543400701329422>
- Bolshakov A.S., Vasilyeva N.N., Gracheva M.A., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves with interactive software: Dependence of results on left-right image separation method. *Perception*. 2013. V. 42 (Supplementary). P. 224.
- Cooper J.S., Burns C.R., Cotter S.A., Daum K.M., Griffin J.R., Scheiman M.M. Care for the patient with accommodative and vergence dysfunction. *Optometric clinical practice guideline*. U.S.A. Healthy Vision, 2000. 83 p.
- Elliott D.B. *Clinical procedures in primary eye care E-Book*. Elsevier Health Sciences. 2020.
- Fray K.J. Fusional amplitudes: exploring where fusion falters. *Am Orthopt J*. 2013. V. 63. P. 41–54. <https://doi.org/10.3368/aoj.63.1.41>
- Frisén L. Vanishing optotypes. New type of acuity test letters. *Arch Ophthalmol*. 1986. V. 104 (8). P. 1194–1198. <https://doi.org/10.1001/archophth.1986.01050200100060>
- Hamm L.M., Yeoman J.P., Anstice N.S., Dakin S.C. The Auckland optotypes: an open-access pictogram set for measuring recognition acuity. *J Vis*. 2018a. V. 18 (3). Article 13. <https://doi.org/10.1167/18.3.13>
- Hamm L.M., Anstice N.S., Black J.M., Dakin S.C. Recognition acuity in children measured using the Auckland optotypes. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2018b. V. 38 (6). P. 596–608. <https://doi.org/10.1111/opo.12590>
- Julesz B. *Foundations of cyclopean perception*. Chicago. Univ. Chicago Press, 1971. 406 p.
- Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I., Kondakova I.S. Estimation of visual performance in children with and without binocular anomalies by means of a computerized coding test. *Perception*. 1997. V. 26 (Supplementary). P. 59.
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. A computer-aided method for the evaluation of fusional reserves with objective control of fusion break. *Human Physiology*. 2010. V. 36 (3). P. 364–366. <https://doi.org/10.1134/S0362119710030187>
- Sassonov O., Sassonov Y., Koslowe K., Shneur E. The effect of test sequence on measurement of positive and negative fusional vergence. *Optom Vis Dev*. 2010. V. 41. P. 24–27.
- Shah N., Dakin S.C., Dobinson S., Tufail A., Egan C.A., Anderson R.S. Visual acuity loss in patients with age-related macular degeneration measured using a novel high-pass letter chart. *British Journal of Ophthalmology*. 2016. V. 100. P. 1346–1352.
- Tscherning M. *Physiologic optics. Dioptrics of the eye, functions of the retina, ocular movements and binocular vision*. Philadelphia: Keystone Publishing Co. 1924. P. 150–154.
- Vasilyeva N.N. Correction of binocular visual mechanisms in primary school children with reading difficulties. *Perception*. 2014. V. 43 (Supplementary). P. 148.
- Vasilyeva N.N. The use of informational-communicational technologies in reading difficulties correction in children. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. V. 233. P. 292–296. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.132>
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Age dynamics of fusion capabilities assessed by means of RDS with markers for objective control of binocular image splitting. *Perception*. 2008. V. 37 (Supplementary). P. 102.
- World Medical Association. Declaration of Helsinki ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013. V. 310 (20). P. 2191–2194. <https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>

Providing Reproducibility and objective control in computer measurement of fusion reserves

A. S. Bolshakov^a, N. N. Vasilyeva^{a, #}, and G. I. Rozhkova^a

^a Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences
127051 Moscow, B. Karetny per. 19, Build. 1, Russia

[#]E-mail: nn_vasilyeva@mail.ru

As is known, the main indicators of the stable functioning of fusion mechanisms – the physiological basis of binocular perception – are the fusion reserves (FR), an accurate assessment of which is still problematic. To measure the FR, a small mismatch between the accommodation and vergence systems is introduced and gradually increasing to reach certain critical angles at which the fusion mechanisms cease to function, as judged by the subjective sensations of the subjects reporting the break of the binocular image into two monocular ones. The subjectivity of such assessments of FR, as well as poorly studied dependence of FR on the parameters of test objects and measurement procedures, make it difficult to determine standard values and to create databases on RF. To overcome these shortcomings inherent in traditional methods of measuring RF, at the end of the last century, attempts were made to use computer methods (Rozhkova et al., 1996 ab, 1998). This article presents the results of a critical evaluation of the computer method for measuring FR using the author's interactive computer program *FUZIYA* (Bolshakov, Rozhkova, 2013), which provides for the generation of variable test images on a special display designed for the polarization method of separating the left and right channels of test object presentation. The purpose of this study was to evaluate the accuracy and reproducibility of the measurement results, as well as to test the effectiveness of the previously proposed method to programmatically provide objective control of the binocular image break. The data obtained confirm the prospects of the approach used and make it possible to clarify the specific forms of its rational application.

Key words: binocular vision, fusion reserves, computer methods of measurement, objective control of fusion, standardization of measurements

REFERENCES

- Bolshakov A.S., Rozhkova G.I. *Interaktivnaya testovaya programma dlya otsenki sostoyaniya i trenirovki fuzionnykh mekhanizmov binokulyarnogo zreniya FUZIYA* [Interactive computer program “FUZIYA” for assessment and training of binocular vision fusional reserves]. State registration certificate № 2013610975, 09.01.2013.
- Vasilyeva N.N. Ocenka binokulyarnykh zritel'nykh funktsiy u mladshih shkol'nikov s trudnostyami obucheniya chteniyu [Evaluation of binocular visual functions in junior schoolchildren with difficulties in learning reading]. *Novye issledovaniya* [New Research]. 2011. V. 2 (27). P. 5–15. (in Russian).
- Vasilyeva N.N. Fuzionnyye rezervy u detej 5-7 let s razlichnym biologicheskim vozrastom [Fusion reserves in 57 year old children of different biological age]. *Novye issledovaniya* [New Research]. 2010. V. 2 (23). P. 24–30. (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Vozrastnaya dinamika fuzionnykh rezervov, izmerennykh pri pomoshchi tsiklopesicheskikh test-ob"ektov s markerami [Age dynamics of fusional reserves assessed by means of cyclopean stimuli with markers]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2009. V. 23 (1). P. 40–50. (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Sravnenie rezul'tatov ocenki fuzionnykh rezervov razlichnymi metodami [Comparison of the results of fusion reserves assessment by different methods]. *Conference proceedings “Nevskie gorizonty–2020”*. Saint-Petersburg. 2020. P. 92–93. (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Trenirovka binokulyarnykh zritel'nykh funktsiy u mladshih shkol'nikov s trudnostyami v chtenii kak faktor korrekcionnoy raboty [Binocular vision training as a correction technique for reading difficulties in early school children]. *Novye issledovaniya* [New Research]. 2011. V. 3 (28). P. 5–16. (in Russian).
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Gracheva M.A., Bolshakov A.S. Zavisimost' rezul'tatov ocenki fuzionnykh rezervov ot metoda izmereniya, instrumentariya i parametrov testovykh stimulov [Dependence of the results of the assessment of fusion reserves on the measurement method, tools and parameters of test stimuli]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2022. V. 36 (3). P. 199–217. (in Russian).
<https://doi.org/10.31857/S023500922203009X>
- Dmitriyeva S.V., Gracheva M.A., Vasilyeva N.N., Smoleevskiy A.E., Man'ko O.M. Ocenka vliyaniya usloviy imitatsii nevesomosti na zritel'nyuyu rabotosposobnost' [Simulation of weightlessness and assessment of its influence on visual performance]. *Izvestiya Rossijskoj VoЕННО-Medicinskoj Akademii* [Izvestia of the russian military medical academy]. 2018. V. 37 (2). P. 97–101. (in Russian).
- Efimova E.L. *Komp'yuternye pleopto-ortopticheskie metody lecheniya vtorichnoj ambliopii u detej* [Computer pleopto-orthoptic methods of treatment of secondary amblyopia in children]. Abstract of the PhD thesis. Saint-Petersburg. 2011. 20 p. (in Russian).
- Efimova E.L., Somov E.E. Sovremennyyi sposob lecheniya ambliopii vtorichnogo geneza i ego ehffektivnost' [A modern method for secondary amblyopia treatment, and its efficacy]. *Oftal'mologicheskie vedomosti* [Ophthalmology Reports]. 2010. V. 3 (3). P. 10–13. (in Russian).

- Kashura O.I., Egorov V.V., Smolyakova G.P. Effektivnost' funktsional'noi reabilitatsii zritel'nykh rasstroivstv u shkol'nikov mladshikh klassov [The efficacy of functional rehabilitation of visual disturbances in junior schoolchildren]. *Rossiiskaya Pediatricheskaya Oftal'mologiya* [Russian Pediatric Ophthalmology]. 2012. (1). P. 22–25. (in Russian).
- Kononova N.E. *Sensorno-motornye narusheniya v zritel'noj sfere detej doshkol'nogo vozrasta pri sodruzhestvennom kosoglazii* [Sensory-motor disorders in the visual sphere of preschool children with concomitant strabismus]. Abstract of the PhD thesis. Saint-Petersburg. 2022. 25 p. (in Russian).
- Koskin S.A., Boiko E.V., Shelepin YU.E. Sistema opredeleniya ostroty zreniya v tselyakh vrachebnoi ehkspertizy [System for determining visual acuity for the purpose of medical expertise]. *Vestnik Rossiiskoi voenno-meditsinskoi akademii*. 2007. №. 3. P. 81–86.
- Koskin S.A. *Sistema opredeleniya ostroty zreniya v tselyakh vrachebnoi ehkspertizy* [System for determining visual acuity for the purpose of medical expertise]. Dokt.med.sci.diss. Saint Petersburg. 2009. 178 p.
- Kononova N.E., Somov E.E. Klinika i lechenie detej doshkol'nogo vozrasta s monolateral'nym i al'terniruyushchim sodruzhestvennym kosoglaziem [Clinic and Treatment of Preschool Children with Monolateral and Alternating Concomitant Strabismus]. *Rossiiskaya detskaya oftal'mologiya* [Russian Ophthalmology of Children]. 2020. (2). 3. 7–11. (in Russian). <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2020-2-7-11>
- Kononova N.E., Somov E.E. Fuzionnye vozmozhnosti zdorovykh detei razlichnogo vozrasta i stradayushchikh sodruzhestvennym kosoglaziem [Fusion capabilities of healthy children of different ages and those suffering from concomitant strabismus]. *Conference proceedings "Nevskie gorizonty–2018"*. Saint-Petersburg. 2018. P. 152–152. (in Russian).
- Krasnoperova N.A. Zritel'naya rabotosposobnost' u detej s narusheniyami sluha [Visual performance in children with hearing impairments]. *Defektologiya* [Defectology]. 2001. (1). P. 11–17. (in Russian).
- Kuznetsov Y.V. *Naznachenie rasstoyaniya mezhdu opticheskimi tsestrami linz v ochkakh* [Assigning the distance between the optical centers of the lenses in glasses]. SPb: "OOO RA "Veko"". 2009. 104 p. (in Russian).
- Morozova T.A., Terentjeva A.E., Pozdeeva N.A. 3D-tekhnologii v oftal'mologii: pervyj opyt [3D Technologies for ophthalmosurgery: early experience]. *Prakticheskaya medicina* [Practical Medicine]. 2018. V. 16 (5). P. 144–150. (in Russian).
- Rozhkov S.N., Ovsyannikova N.A. *Stereoskopiya v kino-, foto-, videotekhnike. Terminologicheskii slovar'* [Stereoscopy in film, photo, video equipment. Terminological dictionary]. Moscow. Paradiz. 2003. 136 p. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N., Rozhkov S.N. Fuzionnye sposobnosti cheloveka i vozmozhnosti rasshireniya diapazona parallaksov v stereofil'mah bez nagruzki na zritel'nuyu sistemu [Human fusion abilities and the possibility of expanding the range of parallaxes in stereo films without burdening the visual system]. *Mir tekhniki kino* [World of Technique of Cinema]. 2009. (12). P. 11–15. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Leshkevich I.A., Korniyushin M.A., Nosov V.N., Matveev S.G. Komp'yuternoe lechenie kosoglaziya i ambliopii s primeneniem sluchajno-tochechnykh stereogram [Computer treatment of strabismus and amblyopia using random dot stereograms]. *Vestnik oftal'mologii* [The Russian Annals of Ophthalmology]. 1998. (4). P. 28–32. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Sisengalieva G.Z. Komp'yuternoe testirovanie binokulyarnoi zritel'noi sistemy cheloveka. II. Pryamaya otsenka osnovnykh klinicheskikh pokazatelei [Computer-based testing of human binocular vision system. II. Direct assessment of the main clinical indicators]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 1996a. V. 10 (1). P. 59–68. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Tokareva V.S., Vorontsov D.D., Golubkov M.G., Drygin S.V. *Integriruvannyyi lechebno-diagnosticskii kompleks programm "AKADEMIK"* [Integrated programs for diagnostics and treatment "AKADEMIK"]. 1996. State certificate "POCC RU. СП07.H00035".
- Rozenblyum Yu.Z. *Optometriya* [Optometry]. Saint-Petersburg. 1996. 320 p. (in Russian).
- Sergienko N.M. *Oftal'mologicheskaya optika* [Ophthalmological optics]. Moscow. Meditsina, 1991. 144 p. (in Russian).
- Timoshenko T.A., Shtilerman A.L. Sovremennyye metody lecheniya ambliopii u detej [Advanced methods of amblyopia treatment in children]. *Tihookeanskij medicinskij zhurnal* [Pacific medical journal]. 2013. (4). P. 59–62. (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).
- Adoh T.O., Woodhouse J.M., Oduwaiye K.A. The Cardiff Test: a new visual acuity test for toddlers and children with intellectual impairment. A preliminary report. *Optometry and vision science: official publication of the American Academy of Optometry*. 1992. V. 69 (6). P. 427–432.
- Adoh T.O., Woodhouse J.M. The Cardiff acuity test used for measuring visual acuity development in toddlers. *Vision Research*. 2003. V. 34 (4). P. 555–560. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90168-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90168-6)
- Alrasheed S.H., Aldakhil S. Comparison of measured fusional vergence amplitudes using prism bar and synoptophore in Sudanese patients with near exophoria. *The Open Ophthalmology Journal*. 2022. V. 16. P. 1–7. <https://doi.org/10.2174/18743641-v16-e2209301>
- American Optometric Association. *Evidence-based clinical practice guideline: comprehensive pediatric eye and vision examination. optometric clinical practice*. 2020. V. 2 (2). <https://doi.org/10.37685/uwlibraries.2575-7717.2.2.1007>
- Bland J.M., Altman D.G. Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical methods in medical research*. 1999. 8 (2). P. 135–160. <https://doi.org/10.1177/096228029900800204>
- Bland J.M., Altman D.G. Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual. *Journal of biopharmaceutical statistics*. 2007. 17 (4).

- P. 571–582.
<https://doi.org/10.1080/10543400701329422>
- Bolshakov A.S., Vasilyeva N.N., Gracheva M.A., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves with interactive software: Dependence of results on left-right image separation method. *Perception*. 2013. V. 42 (Supplementary). P. 224.
- Cooper J.S., Burns C.R., Cotter S.A., Daum K.M., Griffin J.R., Scheiman M.M. Care for the patient with accommodative and vergence dysfunction. *Optometric clinical practice guideline*. U.S.A. Healthy Vision, 2000. 83 p.
- Elliott D.B. *Clinical procedures in primary eye care E-Book*. Elsevier Health Sciences. 2020.
- Fray K.J. Fusional amplitudes: exploring where fusion falters. *Am Orthopt J*. 2013. V. 63. P. 41–54.
<https://doi.org/10.3368/aoj.63.1.41>
- Frisén L. Vanishing optotypes. New type of acuity test letters. *Arch Ophthalmol*. 1986. V. 104 (8). P. 1194–1198.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1986.01050200100060>
- Hamm L.M., Yeoman J.P., Anstice N.S., Dakin S.C. The Auckland optotypes: an open-access pictogram set for measuring recognition acuity. *J Vis*. 2018a. V. 18 (3). Article 13. <https://doi.org/10.1167/18.3.13>
- Hamm L.M., Anstice N.S., Black J.M., Dakin S.C. Recognition acuity in children measured using the Auckland optotypes. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2018b. V. 38 (6). P. 596–608. <https://doi.org/10.1111/opo.12590>
- Julesz B. *Foundations of cyclopean perception*. Chicago. Univ. Chicago Press, 1971. 406 p.
- Podugolnikova T.A., Rozhkova G.I., Kondakova I.S. Estimation of visual performance in children with and without binocular anomalies by means of a computerized coding test. *Perception*. 1997. V. 26 (Supplementary). P. 59.
- Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. A computer-aided method for the evaluation of fusional reserves with objective control of fusion break. *Human Physiology*. 2010. V. 36 (3). P. 364–366.
<https://doi.org/10.1134/S0362119710030187>
- Sassonov O., Sassonov Y., Koslowe K., Shneur E. The effect of test sequence on measurement of positive and negative fusional vergence. *Optom Vis Dev*. 2010. V. 41. P. 24–27.
- Shah N., Dakin S.C., Dobinson S., Tufail A., Egan C.A., Anderson R.S. Visual acuity loss in patients with age-related macular degeneration measured using a novel high-pass letter chart. *British Journal of Ophthalmology*. 2016. V. 100. P. 1346–1352.
- Tscherning M. *Physiologic optics. Dioptrics of the eye, functions of the retina, ocular movements and binocular vision*. Philadelphia: Keystone Publishing Co. 1924. P. 150–154.
- Vasilyeva N.N. Correction of binocular visual mechanisms in primary school children with reading difficulties. *Perception*. 2014. V. 43 (Supplementary). P. 148.
- Vasilyeva N.N. The use of informational-communicational technologies in reading difficulties correction in children. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2016. V. 233. P. 292–296.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.10.132>
- Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Age dynamics of fusion capabilities assessed by means of RDS with markers for objective control of binocular image splitting. *Perception*. 2008. V. 37 (Supplementary). P. 102.
- World Medical Association. Declaration of Helsinki ethical principles for medical research involving human subjects. *JAMA*. 2013. V. 310 (20). P. 2191–2194.
<https://doi.org/10.1001/jama.2013.281053>