

ЗАВИСИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ФУЗИОННЫХ РЕЗЕРВОВ ОТ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ, ИНСТРУМЕНТАРИЯ И ПАРАМЕТРОВ ТЕСТОВЫХ СТИМУЛОВ

© 2022 г. Н. Н. Васильева^{1,*}, Г. И. Рожкова¹, М. А. Грачева¹, А. С. Большаков¹

¹ Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН
127994 Москва, Большой Каретный пер., д. 19/1, Россия

*E-mail: nn_vasilyeva@mail.ru

Поступила в редакцию 16.03.2022 г.

После доработки 11.04.2022 г.

Принята к публикации 25.04.2022 г.

Среди офтальмологов и специалистов по зрительному восприятию до сих пор нет единого мнения относительно различных методов и процедур измерения фузионных резервов (ФР), хотя ФР входят в число базовых показателей для оценки состояния бинокулярного зрения у пациентов и для дифференциальной диагностики его нарушений. Это объясняется сложностью взаимодействия сенсорных, аккомодационных и окуломоторных механизмов зрения в процессе реализации теста и особенностями этого взаимодействия при проведении тестирования с использованием различных инструментов и процедур измерения. Тем не менее разбираться в этих сложностях необходимо, поскольку для эффективного и корректного использования показателей ФР с целью совершенствования методов их оценки и диагностических критериев нужно четко понимать суть тестирования и степень влияния различных факторов на результаты измерений. Одним из способов продвижения в этом направлении является сравнение данных оценки ФР, полученных разными методами на одних и тех же испытуемых или одним и тем же методом в разных группах. Такие работы ведутся, но число их пока невелико. В настоящей статье проведен сравнительный анализ результатов, полученных при помощи традиционных измерений ФР на синоптофоре и на компьютеризированных установках с использованием специальных интерактивных программ. Обсуждаются преимущества и недостатки различных методов, перспективы их улучшения и стандартизации.

Ключевые слова: бинокулярное зрение, фузионные резервы, аккомодация, вергенция, синоптофор, призмная линейка, компьютерные методы оценки зрительных функций, способы сепарации частей стереопары

DOI: 10.31857/S023500922203009X

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, объемно-пространственный зрительный образ рассматриваемого окружения является результатом функционирования сенсорных, окуломоторных, аккомодационных и проприоцептивных механизмов, связанных с органами зрения, а также последующей многоуровневой интегративной обработки информации, поступающей от них в мозговые отделы зрительной системы. При этом следует отметить, что в бинокулярных условиях восприятия, т.е. при наблюдении объекта двумя глазами с двух разных точек зрения, у человека в норме формируется более полный трехмерный образ, чем при монокулярном восприятии. Это достигается благодаря механизмам бинокулярной фузии, обеспечивающим процесс совместной обработки двух потоков монокулярной информации, включающий оцен-

ку их соответствия одним и тем же объектам и формирование единого видимого образа.

Функциональным показателем, количественно характеризующим совместную работу окуломоторных, аккомодационных и сенсорных механизмов фузии, прочность и помехоустойчивость сфузированных образов, являются фузионные резервы (ФР). Оценка ФР в комплексе с другими показателями функционирования зрительной системы имеет большое значение для прогнозирования успехов в овладении учебными навыками в детском возрасте, поддержания зрительной работоспособности при выполнении учебных и профессиональных задач, достижения физиологического комфорта при использовании современными 3D технологиями (Васильева, Рожкова 2009; Корнюшина, 2014; Клокова и др., 2019; Васильева, 2021; Vasilyeva, Rozhkova, 2008; Anderson

et al., 2011; Sreenivasan et al., 2016; Rucker, Phillips, 2018; Alrasheed, 2020b).

Недостаточность ФР может проявляться астенопическими явлениями, возникновением спазма аккомодации, развитием и прогрессированием миопии (Гули-Заде, 1979; Балабаева, Матросова, 2020; Jorge et al., 2008; Piano, O'Connor, 2013; Alrasheed, 2020a). Типичные симптомы астенопии: ощущение усталости глаз, двоение, потеря резкости воспринимаемой сцены, искажение формы и величины воспринимаемых объектов и, как следствие, — снижение зрительной работоспособности. Соответственно, увеличение ФР посредством специальных тренировок проявляется в уменьшении астенопических жалоб и повышении качества жизни пациентов (Евсеева, Кузнецов, 2012; Кашура и др., 2012; Овечкин, 2015; 2019; Тарутга и др., 2018; Корнюшина, 2019; Балабаева, Матросова, 2020; Aziz et al., 2006; Ajezo et al., 2016; Rucker, Phillips, 2018).

В функциональной диагностике задача адекватного измерения ФР у детей и взрослых приобретает все большую актуальность для создания оптимальных режимов зрительной работы в процессе обучения и профессиональной деятельности, разработки офтальмоэргономических рекомендаций и обоснования подходов к тренировке ослабленных зрительных функций. Принцип измерения ФР подразумевает оценку способности зрительной системы сохранять единый сфокусированный бинокулярный образ объекта при постепенном искусственном увеличении рассогласования между аккомодацией и конвергенцией. Рассогласование достигается отклонением угла между зрительными осями от значения, соответствующего точной бификсации физического стимула. Наиболее прямой способ получить такое рассогласование — это поставить перед глазами призмы, отклоняющие входящие в глаз лучи к виску или к носу. Если при этом дается задание сохранять фиксацию взора на исходном объекте, т.е. удерживать его изображение на фовеа, человеку приходится повернуть каждый глаз в соответствии с отклонением лучей и рассматривать объект в условиях избыточной конвергенции или дивергенции зрительных осей. В таких условиях сохранение сфокусированного единого бинокулярного образа объекта возможно лишь в пределах определенного интервала углов конвергенции и дивергенции, за границами которого наступает нарушение фузии и двоение — распад бинокулярного образа на два монокулярных. Предельно выносимые до нарушения фузии конвергентные и дивергентные нагрузки и принято называть фузионными резервами — конвергентными (положительными) и дивергентными (отрицательными) соответственно.

В научной работе и клинической практике исследователи применяют различные способы измерения ФР (Кашенко, 1966; Сомов, 1989; 2014; Cooper et al., 2000; Antona, 2008; Oganyan et al., 2009; Rozhkova, Vasilyeva, 2010; Conway et al., 2012; Elliott, 2020; Askarizadeh et al., 2022). Общепринятых стандартных тестов для оценки ФР в настоящее время нет, наибольшее применение получили три метода: призмный, синоптофорный и компьютерный. Особенности этих методов более подробно рассматриваются в разделе “Материалы и методы”.

Для развития современных представлений о зрительных механизмах, создания основ стандартизации измерений и отбора методов для массовых скрининговых либо комплексных лонгитюдных исследований, одними из важных задач являются систематизация имеющихся данных, сравнительный анализ результатов измерений ФР разными методами и исследование влияния различных факторов на работу механизмов фузии. Корректное и эффективное использование результатов оценки ФР требует их правильной интерпретации и понимания различий, обусловленных различиями инструментов и процедур измерения. В настоящее время это осознают как врачи, так и исследователи зрительного восприятия, что приводит к увеличению числа публикаций по сопоставлению разных методов. Зарубежные публикации большей частью посвящены влиянию условий тестирования на результаты оценки ФР, а также сравнению результатов, полученных при помощи призмного метода и синоптофора (Antona et al., 2008; Goss, Becker, 2011; Conway et al., 2012; Fu et al., 2015; Lança, Rowe, 2016; 2019; Fray, 2017).

В настоящей статье проведен анализ различных методов измерения ФР: призмного, синоптофорного и компьютерного, которые применяются на современном этапе. Анализ подкрепляется сравнением данных оценки ФР человека, полученных нами при помощи классической процедуры с использованием синоптофора, и при помощи интерактивных компьютерных программ, позволяющих проводить измерения с использованием цветовой и поляризационной сепарации левого и правого тестовых изображений. Проанализировано влияние методов измерения на получаемые результаты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сравнение существующих методов измерения фузионных резервов

Для понимания причин расхождения в результатах, получаемых при использовании различных методов измерения ФР, сначала необходимо более конкретно проанализировать различия в схе-

мах соответствующих процедур. В этом разделе проведен анализ не только синоптофорного и компьютерного методов, которые использовались нами в экспериментальной работе, но и призмного метода — исторически более раннего и более понятного. В основе всех методов лежит существенное нарушение соответствия между аккомодацией и конвергенцией, которые в нормальных условиях взаимосвязаны, обеспечивая оптимальные условия фокусировки и проецирование рассматриваемого объекта на фoveальные области обоих глаз. В естественных условиях рассогласование вызывает аккомодативную конвергенцию или конвергентную аккомодацию: рефлекторное изменение конвергенции при изменении аккомодации и рефлекторное изменение аккомодации при изменении конвергенции.

Анализ процедур измерения ФР. Схемы проведения измерений ФР различными методами представлены на рис. 1.

1. Призмный метод (рис. 1, а). Рабочий инструмент — набор призм нарастающей силы, скомпонованных в одной рамке (призмная линейка) и позволяющих осуществлять ступенчатые изменения вергенции за счет быстрого сдвига линейки вверх либо вниз для смены одной призмы на другую. Оптометристы, имеющие интерес к этой области, предпочитают использовать вращающуюся призму Risley (для градуального изменения вергенции) либо в монокулярных условиях, либо бинокулярно на фороптере.

Данный метод применим для любых расстояний тестирования, но обычно ФР измеряют в условиях наблюдения тестового объекта (ТО), расположенного вблизи (на расстояниях 33 или 40–50 см) либо вдали (на расстояниях 5 или 6 м). В качестве ТО используют простые изображения: вертикальные отрезки; буквенные оптоотипы для остроты зрения 0.1 (по десятичной шкале); небольшие трехмерные предметы.

Перед измерением ФР испытуемому ставят задачу: фиксировать ТО двумя глазами и сохранять единый видимый образ при установке призм нарастающей силы перед одним из глаз или перед обоими глазами. В процессе измерения, увеличивая силу призм, поставленных основаниями к носу или к виску, отмечают моменты появления размытости образа (*blur-point*) и разрушения фузии — распада бинокулярного образа (*break point*), а затем, уменьшая силу призм, — момент восстановления фузии (*recovery point*). Точка размытости соответствует моменту, когда насильно изменяемая при помощи призм конвергенция приводит к значительному изменению аккомодации и тест-объект расплывается. Точка потери фузии соответствует моменту, когда рассогласование между аккомодацией и вергенцией становится

запредельным для возможности сохранения единства образа, и он распадается на два.

Физический ТО, бинокулярный образ которого нужно удерживать, реально неподвижен, а призмы меняют направление лучей от него, заставляя глаза поворачиваться, менять угол вергенции и формировать видимый образ на другом расстоянии от глаз (предположительно в точке пересечения зрительных осей). Отсчет поворотов осей (из-за установки перед глазами призм) идет от исходного положения глаз, соответствующего фиксации ТО. Углы поворота вычисляются по оптической силе призм. Максимальное значение силы призм (или соответствующий угол отклонения лучей), при котором человек способен сохранять единый бинокулярный образ, принимают за меру фузионных резервов.

2. Синоптофорный метод (рис. 1, б). Измерения проводятся на синоптофоре — гаплоскопическом приборе, обеспечивающем раздельное предъявление левого и правого изображений. В клинической практике синоптофор применяется на протяжении нескольких десятилетий. Спектр исследовательских и офтальмологических задач, которые можно решать с его помощью, достаточно широк: оценка способности к бифовеальному слиянию, измерение угла косоглазия, фузионных резервов, выявление и ликвидация функциональной скотомы, проведение лечебных ортоптических упражнений.

В приборе имеются отдельные каналы наблюдения для левого и правого глаза, через которые ТО могут демонстрироваться в трех режимах: стационарное предъявление, колебания в горизонтальном направлении и мелькания. В стандартной комплектации синоптофор снабжается слайдами с парными ТО, которые представлены тремя группами:

— объекты на совмещении, не имеющие общих элементов (например, окружность и вписываемая в нее звезда, цыпленок и яйцо, автомобиль и гараж);

— объекты на слиянии — силуэтные фигурки с центральным общим элементом (например, две кошки, одна из которых имеет уши, но не имеет хвоста, а вторая имеет хвост, но не имеет ушей);

— объекты для наблюдения стереоскопического объема и блеска (например, стереопары с различной диспаратностью и пары картинок, в которых детали левого и правого изображений различаются по яркости/контрасту).

Для измерения ФР в офтальмологии обычно применяют объекты на слиянии. Соответствующие слайды с ТО вставляются в гнезда (отверстия), расположенные в оптических головках прибора. Оптически ТО находятся в бесконечности. Необходимые измерения ФР достигаются плавными изменениями положения оптических

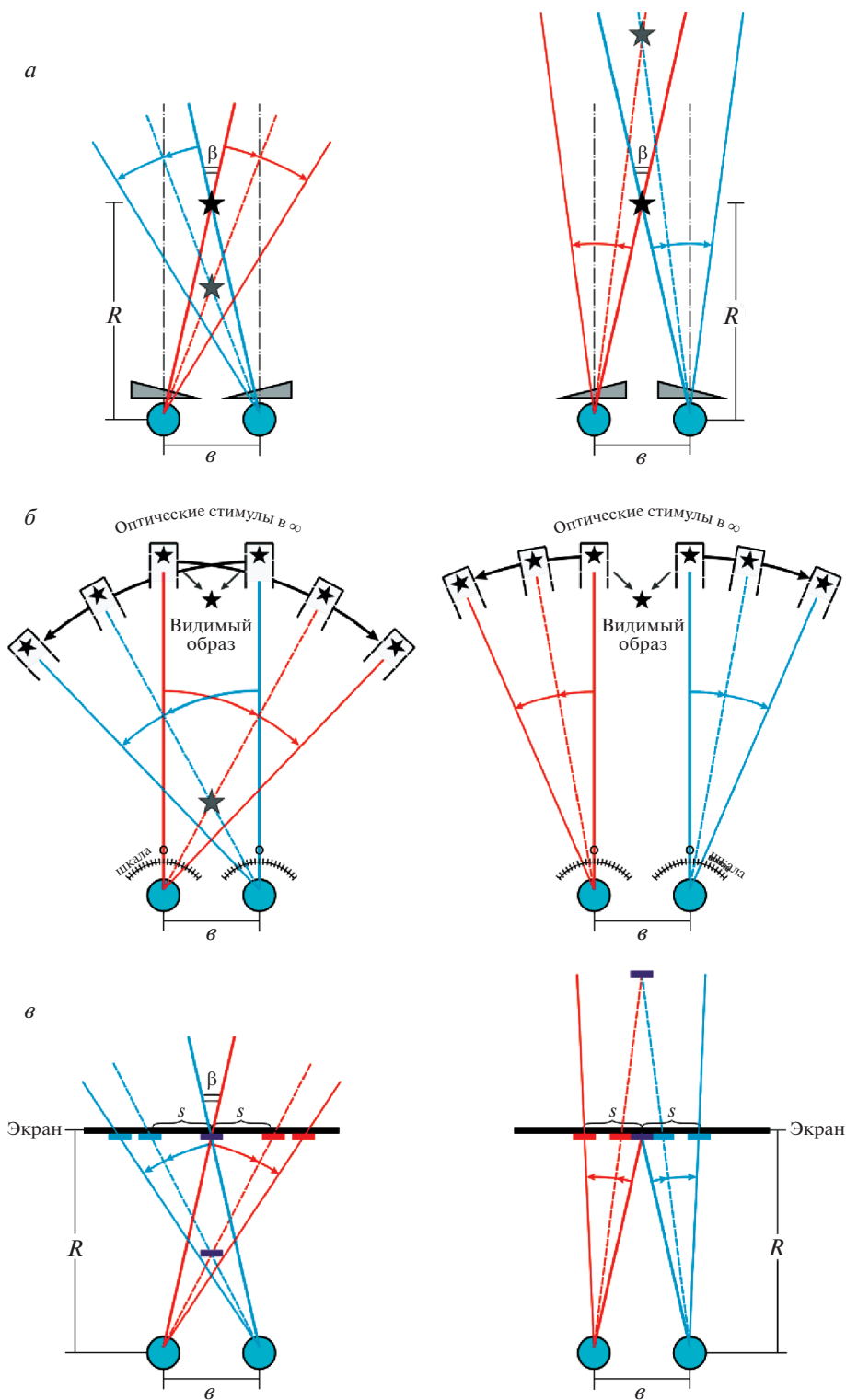


Рис. 1. Схемы измерения конвергентных (левый столбец) и дивергентных (правый столбец) ФР с использованием трех различных методов: призмного – *a*; синоптофорного – *б*; компьютерного – *в*. R – расстояние до ТО; β – начальный угол конвергенции; ϑ – межзрачковое расстояние (базис); s – смещение левой и правой частей стереопары.

осей – поворотами оптических головок со слайдами в горизонтальной плоскости, вызывающими сведение либо разведение зрительных осей, и соответственно, избыточную конвергенцию/ди-

вергенцию. Таким образом, при измерении ФР расстояние до ТО не меняется, но они движутся по дугам влево-вправо, заставляя поворачиваться за ними глаза и менять угол вергенции. На рис. 1, б

Таблица 1. Различия в условиях наблюдения тест-объектов при разных методах измерения ФР

Метод измерения ФР	Угловой размер физического тест-объекта	Позиция физического тест-объекта	Расстояние для аккомодации	Сепарация левого и правого изображений
Призмный Синоптофорный	Неизменный Неизменный	Неизменная Меняется в соответствии с углом поворота оптических головок	Неизменное Неизменное (оптическая бесконечность)	Оптическая Механическая
Компьютерный	Уменьшается с удалением от 0° – позиции оси глаза	Меняется в соответствии с движением тест-объекта по экрану	Увеличивается с удалением от позиции параллельности осей глаз	Цветовая или поляризационная

ТО показаны как звездочки в конце труб-каналов, как бы находящиеся в бесконечности на зрительных осях. Исходный видимый образ показан как сфузурованный при параллельных осях и располагающийся “несколько ближе бесконечности”. Отсчет поворотов осей идет от их исходного параллельного положения. Для измерения поворотов осей прибор имеет шкалы на окружностях, центры которых теоретически совпадают с центрами вращения глаз. Предусмотренной конструкцией синоптофора оптическое удаление ТО в бесконечность позволяет измерять фузионные резервы только для дали.

Современные модели синоптофоров значительно усовершенствованы и имеют расширенный функционал, в них встроен электронный блок управления, имеется удобная клавиатура с подсветкой, что позволяет сделать работу более комфортной и неустойчивой.

3. *Компьютерный метод* (рис. 1, в). Интерактивные компьютерные программы на основе того или иного метода сепарации изображений для левого и правого глаза позволяют генерировать на дисплеях самые разнообразные ТО и проводить оценку ФР, наблюдая образы, формирующиеся при симметричном расхождении левого и правого стимулов по горизонтали, и отмечая моменты появления размытости и раздвоения видимого образа. Программируемое расхождение тестовых стимулов имитирует установку перед глазом призмы, отклоняющих световые лучи (точнее – призмы Risley, позволяющих делать это градуально). Расстояние до стимулов несколько увеличивается при их удалении от позиции, соответствующей параллельности осей глаз. Отсчет поворотов осей идет от исходного положения бификсации ТО в центре экрана.

В существующих интерактивных компьютерных программах применяется большой набор ТО (геометрические фигуры, изображения животных и предметов, случайно-точечные стереограммы) и предусмотрены разные методы сепарации –

цветовая или поляризационная. Использование в качестве стимулов случайно-точечных стереограмм (СТС) позволяет контролировать сохранение у испытуемых способности к формированию полноценных стереообразов на основе бинокулярной диспаратности на всем протяжении измерения до момента распада сфузурованного образа при достижении критических углов конвергенции/дивергенции.

В настоящее время в офтальмологии большое распространение получили методы, основанные на временной (затворной, эклипсной) технологии сепарации изображений. Например, технология shutter glasses подразумевает использование двух фильтров на основе жидких кристаллов, обеспечивающих попеременное открывание/закрывание левого и правого каналов стимуляции под действием управляющего сигнала, синхронизированного с попеременным предъявлением левого и правого изображений. Однако использовать такую технологию при измерении ФР проблематично.

В отечественной клинической практике широкое применение получила программа “Клинок”, основанная на цветовой сепарации и созданная в начале 90-х годов XX в. для замены синоптофора. Она входит в состав интегрированного лечебно-диагностического комплекса “Академик” (Рожкова и др., 1996). Программа “Клинок” в отличие от синоптофора имеет большее количество ТО и позволяет расширить временной и скоростной диапазоны традиционных измерительных и тренировочных аппаратных процедур (Рожкова и др., 1996; Ефимова, Сомов, 2010; Кононова, Сомов, 2018).

Особенности обсуждаемых методов измерения ФР, существенные для анализа различий в получаемых результатах, кратко суммированы в табл. 1.

В научных публикациях и руководствах для оптометристов нормативы по фузионным резервам выражаются в угловых градусах или призмных

ных диоптриях. Перевод значения силы призмы в угол отклонения лучей при измерении ФР осуществляется по формуле:

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

где σ – угол отклонения лучей, а W – сила призмы в призмённых диоптриях, поскольку, согласно определению, W численно равна расстоянию в сантиметрах, на которое отклоняется световой луч на расстоянии 1 м (100 см) от призмы (Сергиенко, 1991).

Данные о ФР офтальмологически здоровых детей и взрослых, представленные в научных публикациях и справочных пособиях, свидетельствуют, что единого мнения о возрастных нормах и возрастной динамике в литературе нет. В Федеральных клинических рекомендациях по диагностике и лечению содружественного косоглазия (2015) для всех детей приводятся единые средние значения ФР, измеряемых на синоптофоре для

теста № 2 (кошки): конвергентные резервы – $16 \pm 8^\circ$; дивергентные – $5 \pm 2^\circ$.

Для удобства читателей приведем нормативы по ФР, выраженные в призматических диоптриях и угловых градусах, из отечественной и зарубежной литературы. Хотя по нашим данным ФР существенно зависят от возраста, в имеющихся публикациях приводятся обобщенные данные для определенных возрастных групп детей и взрослых.

Соответствующие примеры приведены в табл. 2 и 3.

Условия проведения собственных измерений

Испытуемые. В процессе сбора данных было обследовано 354 человека в возрасте от 7 до 39 лет. Работа проводилась в период с 2009 по 2021 гг. в лаборатории “Зрительные системы” ИППИ РАН и на базе образовательных учреждений г. Чебоксары и Москвы.

Таблица 2. Нормативные данные по фузионным резервам из руководства по оптометрической клинической практике (Cooper et al., 2000)

Англоязычная терминология / Перевод	Среднее (призм. дптр)	Стандартное отклонение (призм. дптр)	Диапазон (призм. дптр)	Среднее значение (угл.град.)
для дали				
Base-in blur / дивергентные ФР – появление размытости образа	–	–	–	–
Base-in break / дивергентные ФР – разрушение фузии	7	3	5–9	4
Base-in recovery / дивергентные ФР – восстановление фузии	4	2	3–5	2.5
Base-out blur / конвергентные ФР – появление размытости образа	9	4	7–11	5
Base-out break / конвергентные ФР – разрушение фузии	19	8	15–23	11
Base-out recovery / конвергентные ФР – восстановление фузии	10	4	8–12	6
для близи				
Base-in blur / дивергентные ФР – появление размытости образа	13	4	11–15	7.5
Base-in break / дивергентные ФР – разрушение фузии	21	4	19–23	12
Base-in recovery / дивергентные ФР – восстановление фузии	13	5	10–16	7.5
Base-out blur / конвергентные ФР – появление размытости образа	17	5	14–20	10
Base-out break / конвергентные ФР – разрушение фузии	21	6	18–24	12
Base-out recovery / конвергентные ФР – восстановление фузии	11	7	7–15	6.5

Таблица 3. Нормативные значения конвергентных и дивергентных ФР (КФР и ДФР) по критерию срыва фузии (распада единого образа на два) для офтальмологически здоровых людей по данным разных авторов

Возраст, годы	Кашенко, 1966 синоптофорный метод – ТО для слияния (угл.град)		Кашенко, 1966 синоптофорный метод – ТО для стереоскопии (угл.град)		Хенкин, Зубарев, 1973 синоптофорный метод (призм.дптр)		Хенкин, Зубарев, 1973 призм.метод – ФР для дали (призм.дптр)		Гули-Заде, 1979 призм.метод – ФР для близи (призм.дптр)	
	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР	КФР	ДФР
5–7	–	–	–	–	–	–	–	–	18	12
8–9	–	–	–	–	4.9	3.2	15.1	5.4	19	12
10–11	–	–	–	–	4.4	2.8	17.5	5.9	22	14
12–13	–	–	–	–	3.9	3.2	19.0	6.5	26	14
14–15	–	–	–	–	4.6	2.7	17.6	0.5	–	–
14–18	–	–	–	–	–	–	–	–	29	14
Взрослые	16.1	5.1	22.3	6.0	–	–	–	–	–	–

Организация проведения исследования соответствовала принципам биомедицинской этики, представленным в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях (Declaration of Helsinki, 2013). Участие в исследованиях было добровольным. От совершеннолетних испытуемых было получено информированное согласие на проведение процедуры измерений. Родители (законные представители) несовершеннолетних были проинформированы о проводившемся исследовании и дали письменное согласие на участие в нем детей.

Перед измерением ФР у испытуемых оценивали показатели рефракции при помощи авторефрактометра, остроту монокулярного и бинокулярного зрения на близком (0.5 м) и дальнем (4.0 м) расстояниях наблюдения, способность к стереоскопическому восприятию по результатам тестирования случайно-точечными стереограммами (СТС). Испытуемые с аномалиями рефракции проходили тестирование в условиях оптимальной оптической коррекции.

Аппаратура, использованная в экспериментальных исследованиях

Измерение фузионных резервов на синоптофоре

В работе был применен синоптофор СИФ-1. Для оценки ФР были использованы ТО двух типов.

– Входящий в стандартную комплектацию прибора традиционный ТО на слияние в виде сидящей кошки. Угловые размеры ТО составляли около 8°. Каждый слайд пары содержал монокулярное изображение с одним отсутствующим элементом фигуры: в левом кошка была с ушами, но без хвоста, в правом – с хвостом, но без ушей. Целостный образ кошки формировался при усло-

вии успешной фузии левого и правого монокулярных образов.

– Оригинальные слайды с СТС, содержащими закодированный диспаратностью стереообъект. Угловые размеры ТО составляли около 8°. Левое и правое изображения поодиночке не содержали никакой информации о форме ТО, и монокулярно оба слайда воспринимались одинаково как плоские поля из случайных точек. Форма стереообъекта в виде месяца была закодирована относительными сдвигами точек левого и правого изображений (диспаратностью), и только в результате сопоставления одного изображения с другим испытуемый с нормально функционирующими механизмами бинокулярного стереопсиса видел циклопический стереообъект – месяц, находящийся на иной глубине, чем фоновая плоскость.

Процедура измерений. Перед началом измерений определяли межзрачковое расстояние для глаз испытуемого при помощи линейки с миллиметровой шкалой и соответственно устанавливали оптические головки. Оптические каналы (головки) синоптофора устанавливали соответственно нулевому положению всех шкал.

Испытуемый размещался на стуле регулируемой высоты. При обследовании под ногами детей размещали специальную подставку для их опоры. Голову испытуемого фиксировали при помощи регулируемых по высоте подбородника и налобника.

Парные ТО вставляли в соответствующие кассеты. После подтверждения испытуемым того, что он правильно воспринимает бинокулярный образ при исходном (нулевом) положении оптических каналов (одна кошка с хвостом и ушами либо месяц, выступающий из фона) начинали медленно сводить/разводить оптические головки

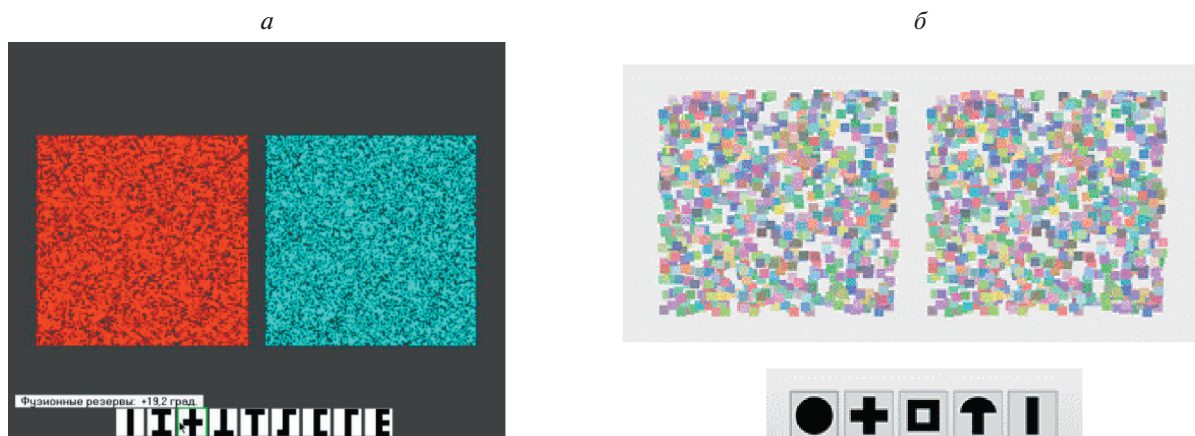


Рис. 2. Случайно-точечные стереограммы и контрольные стереообъекты-метки, используемые в программах “Фурор” – а и “Фузия” – б. Контрольные объекты видны только при успешной фузии левого и правого изображений.

синоптофора. После сообщения испытуемого о двоении кошки или исчезновении месяца с одновременным двоением фонового квадрата движение оптических головок прекращали и фиксировали значения углов их поворота по соответствующим шкалам. Углы конвергенции и дивергенции вычисляли путем сложения показаний левой и правой шкал прибора.

Правильность показаний испытуемых контролировали путем наблюдения за положением глазных яблок – в момент двоения ТО происходил возврат глазных яблок в положение, близкое к первоначальному, и наблюдалась серия поисковых движений глаз.

Измерение фузионных резервов на компьютеризированных установках

В разных сериях экспериментов были использованы разработанные в ИППИ РАН интерактивные компьютерные программы “Фурор” и “Фузия”. Программа “Фурор” была написана В.С. Токаревой, программа “Фузия” – А.С. Большаковым.

Характеристика интерактивных программ и стимулов. Программа “Фурор” рассчитана на применение анаглифного (цветового) метода сепарации левого и правого изображений. Программа была установлена на ноутбуке ASUS с размерами экрана 210 × 330 мм. Тестовыми стимулами служили СТС на поле 140 × 140 мм (17 × 17°), генерируемые на экране ноутбука и кодирующие простые стереообъекты, общим элементом которых была вертикальная полоса размером 114 × 26 мм (рис. 2, а). В процессе измерений стереообъекты менялись в случайном порядке. Размер отдельных “точек” – элементов СТС – составлял 4 × 4 пикселя, а размер пикселя был равен 0.25 мм. Скорость движения стимулов по экрану составляла

50 мм/мин. Подробное описание и результаты апробации данной программы отражены в публикации (Rozhkova, Vasilyeva, 2010).

Программа “Фузия” обеспечивает возможность отдельного предъявления зрительных стимулов левому и правому глазу на основе любого из двух методов сепарации: цветового или поляризационного (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013610975). Для обеспечения возможности реализации второго метода использовали 3D монитор (LG Flatron D2342P-PN, диагональ 23”, ширина экрана 51 см) и 3D телевизор (LG 32LF620U, диагональ 32”, ширина экрана 71 см) с противоположной круговой поляризацией четных и нечетных строк. В качестве тестовых стимулов применялись СТС, которые имели размеры 90 × 90 мм (10 × 10°) и кодировали простые стереообъекты, слегка выступающие из фона за счет диспаратности при наблюдении через стереоочки (рис. 2, б). Размер отдельных “точек” – элементов СТС – составлял 5 × 5 пикселей, размер пикселя был равен 0.51 мм. Скорость движения стимулов по экрану можно было варьировать. В наших экспериментах она составляла 90 мм/мин.

Принцип работы программ основан на стандартных подходах к измерению ФР: движение стимулов по экрану от центра вызывает конвергентные/дивергентные движения глаз и приводит к рассогласованию аккомодации и конвергенции. С увеличением рассогласования фузия нарушается, бинокулярный образ начинает расплываться и бинокулярный ТО перестает восприниматься. Таким образом, в программах реализована возможность объективно контролировать субъективные показания испытуемых при измерении ФР без наблюдения за движениями глаз.

В разных сериях исследований экспериментальная установка включала ноутбук, 3D монитор, 3D телевизор, анаглифические и поляризационные очки, подставку-подбородник для фиксации головы испытуемого.

Процедура измерений. Измерения проводили на расстоянии 50 см от экрана в условиях дихоптического предъявления стимулов. При использовании анаглифического метода сепарации тестирование проводили в красно-зеленых очках, при использовании поляризационного метода — в поляризационных очках. Испытуемый располагался на стуле регулируемой высоты, его голову фиксировали на подставке-подбороднике таким образом, чтобы глаза находились на уровне центра экрана.

В начале измерений в центре экрана появлялась стереопара, при фузирании которой испытуемый видел ТО — квадрат со случайно-точечной текстурой и контрольный объект-метку, отделяющийся от фона. Затем испытуемого знакомили с полным набором меток, используемых в эксперименте. Когда испытуемый сообщал о своей готовности к измерениям, экспериментатор запускал программу медленного движения левого и правого стимулов в направлении от центра. При измерении конвергентных ФР правый стимул двигался влево, а левый — вправо, вызывая постепенное увеличение угла конвергенции. При измерении дивергентных ФР правый стимул двигался вправо, а левый — влево, что приводило к дивергенции зрительных осей.

По ходу движения циклопические стереообъекты-метки внутри тестовых стимулов менялись, это удерживало внимание испытуемого и позволяло точно установить момент распада бинокулярного образа. Регистрацию момента распада виртуального бинокулярного образа осуществляли щелчком мыши на основании субъективного отчета испытуемого, что приводило к остановке движения стимулов и выводу на экран полного набора контрольных объектов-меток. Испытуемому предлагалось выбрать объект-метку, воспринимаемый непосредственно перед моментом распада.

Испытуемому ставили задачу: как можно дольше удерживать состояние фузии, следя за сменой стереообъектов и констатируя момент потери фузии.

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение фузионных резервов, измеренных разными методами у испытуемых разного возраста

На рис. 3 и 4 приведены гистограммы распределения значений конвергентных и дивергент-

ных ФР, измеренных на синоптофоре для испытуемых разных возрастных групп. В двух колонках представлены данные, полученные на одних и тех же испытуемых с использованием двух принципиально различающихся тест-объектов — традиционного (ТО ТНС) и стереоскопического (ТО СТС). Всего при помощи данного метода было обследовано 304 школьника в возрасте от 7 до 17 лет.

Об общем характере возрастных изменений конвергентных ФР можно судить по суммарным гистограммам, полученным для групп детей 7–8 лет, 9–10 лет, 11–12 лет, 13–14 лет и 15–17 лет. Наряду с отсутствием выраженной и однозначной возрастной динамики хорошо заметно устойчивое различие гистограмм для стимулов двух типов по форме. Форма гистограмм для ТО СТС соответствует нормальному распределению. Гистограммы, полученные для ТО ТНС, сложные, двумодальные, указывают на неоднородность возрастных групп по ФР.

Гистограммы для дивергентных ФР, измеренных с использованием двух ТО, согласуются между собой. Теоретически, при разведении зрительных осей от состояния параллельности воспринимаемый бинокулярный образ должен распасться на два монокулярных, так как построение правдоподобного бинокулярного образа невозможно. Однако в действительности бинокулярный образ обычно еще сохраняется и при разведенных осях в пределах небольших углов отклонения от параллельности. С функциональной точки зрения это можно объяснить тем, что в определенных условиях при формировании видимого образа сенсорные механизмы фузии могут работать, игнорируя сигналы о позиции осей глаз. Таким образом, измеряемые на синоптофоре дивергентные ФР отражают только функционирование сенсорных механизмов фузии.

Хорошо известно, что ФР зависят от возраста, условий исследования, параметров ТО (размеров, вертикальной или горизонтальной ориентации, скорости движения стимулов), правильного понимания субъективных зрительных ощущений и скорости реакции при формулировании ответов испытуемым (Sassonov et al., 2010; Fray, 2013). Некоторые авторы также отмечают плохую воспроизводимость показателей как положительных, так и отрицательных ФР при повторных измерениях.

В процессе измерения ФР важно как можно точнее установить момент распада бинокулярного образа. В ходе медленного сдвига изображений и соответствующего поворота зрительных осей процесс распада единого бинокулярного образа на два монокулярных у разных людей может протекать по-разному, длиться различное время и сопровождаться колебаниями от частичной раздво-

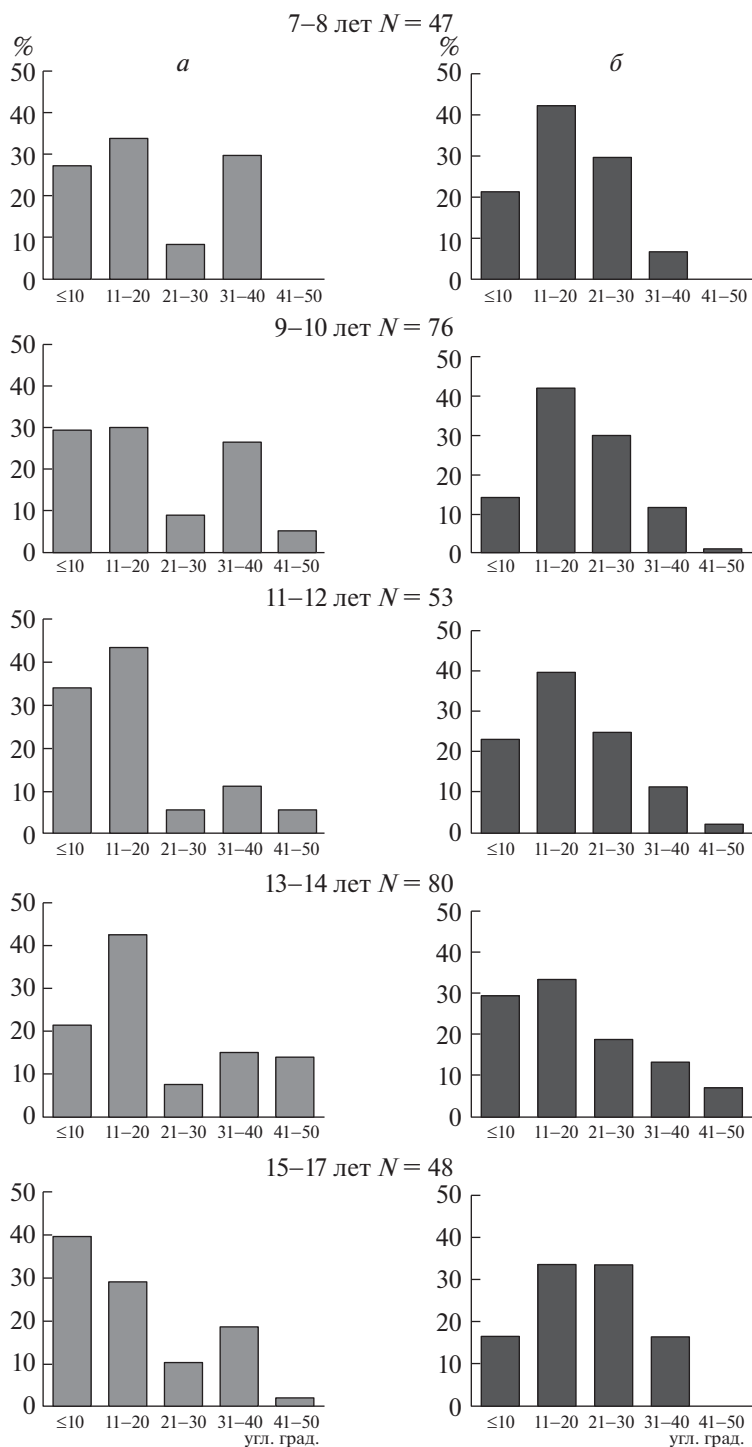


Рис. 3. Гистограммы распределения значений конвергентных ФР у детей и подростков разного возраста, полученные при измерении на синоптофоре: *а* – данные для ТО ТНС; *б* – данные для ТО СТС.

енности к обратному слиянию, потерей резкости изображения, искажением формы ТО.

Значительную степень неопределенности ТО ТНС допускают в установлении момента достижения критического угла конвергенции или дивергенции, при котором единый видимый об-

раз раздваивается, так как испытуемый может использовать разные критерии появления двоения – от слегка заметного расхождения ТО до полного разделения двух образов. Так, одни испытуемые отмечают этот момент как незначительное смещение ушей и хвоста объекта “кошка”, другие –

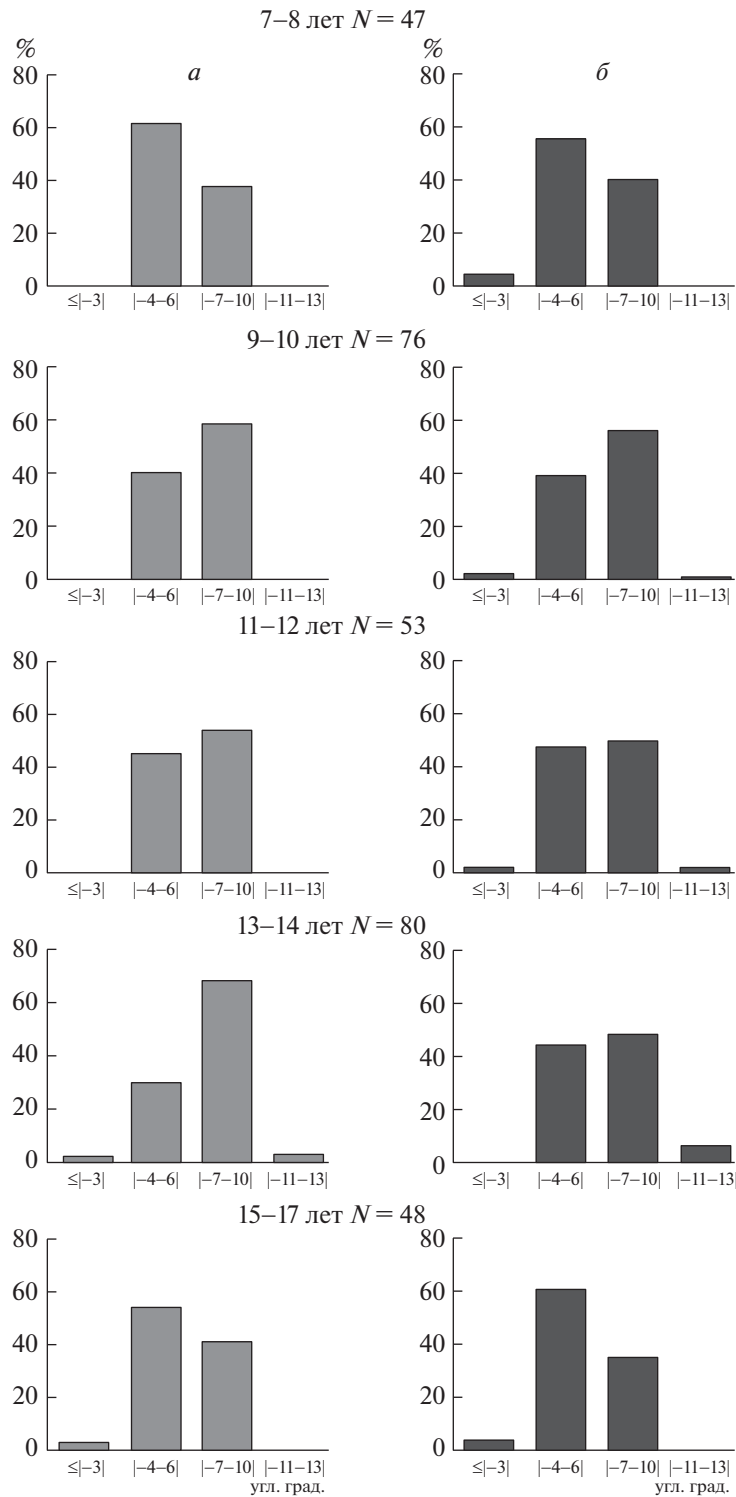


Рис. 4. Гистограммы распределения значений дивергентных ФР у детей и подростков разного возраста, полученные при измерении на синоптофоре: *a* – данные для ТО ТНС; *б* – данные для ТО СТС.

как полный распад фигуры на два образа, что выражается в недооценке или переоценке величины ФР. При работе с СТС такая неопределенность полностью исключена. Обработка СТС

осуществляется в чисто бинокулярной зрительной подсистеме, испытуемый может видеть стереобъект только за счет действия механизмов бинокулярной фузии. Монокулярные механизмы

Таблица 4. Процентное соотношение числа испытуемых, у которых индивидуальные значения ФР, измеренные на синоптофоре при помощи двух типов ТО, равны или различаются

Возраст и число испытуемых	Конвергентные ФР			Дивергентные ФР		
	ТНС = СТС, %	ТНС > СТС, %	ТНС < СТС, %	ТНС = СТС, %	ТНС > СТС, %	ТНС < СТС, %
7–8 лет ($N = 47$)	15.0	51.0	34.0	36.0	30.0	34.0
9–10 лет ($N = 76$)	18.4	39.5	42.1	56.6	23.7	19.7
11–12 лет ($N = 53$)	24.5	34.0	41.5	47.2	32.0	20.8
13–14 лет ($N = 77$)	20.8	48.0	31.2	40.3	38.9	20.8
15–17 лет ($N = 48$)	25.0	33.3	41.7	35.3	48.0	16.7

Таблица 5. Данные о процентных соотношениях испытуемых с разными значениями разности в результатах измерения ФР на синоптофоре при помощи двух типов ТО

Возраст и число испытуемых	Разница между двумя индивидуальными значениями							
	Конвергентные ФР					Дивергентные ФР		
	0–2°	3–5°	6–10°	11–15°	≥16°	0–2°	3–4°	5–6°
7–8 лет ($N = 47$)	29.8	17.1	21.2	12.8	19.1	95.8	4.2	–
9–10 лет ($N = 76$)	26.3	13.2	32.9	6.6	21.0	84.3	10.5	5.2
11–12 лет ($N = 53$)	32.1	24.5	17.0	15.1	11.3	83.0	11.3	5.7
13–14 лет ($N = 77$)	35.0	10.4	26.0	9.1	19.5	71.4	24.7	3.9
15–17 лет ($N = 48$)	25.0	20.8	25.0	12.5	16.7	81.2	12.5	6.3

позволяют испытуемому видеть лишь случайно-точечный паттерн. Это дает возможность испытуемому точнее констатировать момент срыва фиксации.

Фактором, оказывающим влияние на результаты измерения ФР, также является скорость сведения/разведения оптических головок синоптофора, задаваемая исследователем. Она не всегда может быть оптимальной для времени реакции испытуемого, что неизбежно сказывается на результатах оценки и проявляется в значительной вариабельности данных и различных систематических отклонениях реальных гистограмм для ТО ТНС от искомой кривой распределения.

Так как при измерении ФР на синоптофоре с использованием двух принципиально различающихся ТО были получены разные результаты, необходимо проанализировать, как в разных возрастных группах и в целом в обследованной выборке испытуемых соотносятся эти показатели. В табл. 4 представлены данные о процентном соотношении числа испытуемых, у которых индивидуальные значения ФР, измеренные на синоптофоре при помощи двух типов ТО, равны или различаются.

Как видно из табл. 4, в разных возрастных группах доля испытуемых с одинаковыми оценками конвергентных ФР, измеренных при помощи ТО ТНС и ТО СТС, находится в диапазоне от 15 до 25%. С возрастом количество таких случаев

увеличивается, что вполне естественно и может быть связано с процессами созревания механизмов регуляции и контроля произвольной деятельности, обеспечивающих более четкий ответ при установке момента пропадания бинокулярного образа. В отношении оценок дивергентных ФР можно заключить, что число случаев с одинаковыми показателями максимально в возрастной группе 9–10 лет и составляет более 50%. В остальных группах таких случаев меньше, однако их доля не ниже 35%.

В связи с тем, что в каждой возрастной группе число испытуемых с различающимися оценками конвергентных и дивергентных ФР в условиях предъявления двух типов ТО было значительным, проанализируем разницу в показателях. В табл. 5 приведены данные о процентных соотношениях испытуемых с разными значениями разности в результатах измерения ФР на синоптофоре при помощи двух типов ТО.

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что разница в индивидуальных показателях ФР могла достигать 16° и более для конвергентных ФР и 5° и более – для дивергентных ФР.

Индивидуальные значения ФР, измеренные при помощи одного метода, но с применением принципиально различающихся ТО, могут существенно различаться даже у испытуемых старших возрастных групп.

Таблица 6. Медианы конвергентных (КФР) и дивергентных (ДФР) фузионных резервов, измеренных при помощи разных методов. Для синоптофора в скобках указаны типы тестовых объектов: традиционные – ТО ТНС и стереоскопические – ТО СТС. Для компьютерных методов в скобках указано название использованной компьютерной программы (“Фурор” или “Фузия”) и метод сепарации

Возраст, годы	Метод измерения							
	Синоптофор				Компьютерный метод, анаглифическая сепарация		Компьютерный метод, поляризационная сепарация	
	КФР (ТО ТНС)	ДФР (ТО ТНС)	КФР (ТО СТС)	ДФР (ТО СТС)	КФР (“Фурор”)	ДФР (“Фурор”)	КФР (“Фузия”)	ДФР (“Фузия”)
7–8	+15°	–6°	+17°	–6°	+14°	–6.5°	+25.9°	–8.6°
9–10	+18°	–7°	+20°	–7°	+15.9°	–7.6°	+25.8°	–10.7°
11–12	+14°	–7°	+20°	–6.5°	+17.8°	–8.2°	+39.9°	–9.9°
13–14	+16°	–7°	+16°	–7°	+18.2°	–8.6°	+30.7°	–9.9°
15–17	+14°	–6°	+20°	–6°	+16.8°	–8.4°	+29.5°	–9.4°

Оценка ФР, проведенная на компьютерных установках, показала, что в целом результаты согласуются с данными, полученными на синоптофоре, отражая процессы гетерохронного созревания исследованных механизмов, достижения состояния зрелости и снижения их пластичности в процессе возрастного развития и адаптации зрительной системы к средовым факторам. В то же время, как внутри возрастных групп, так и у одних и тех же испытуемых, ФР, измеренные на синоптофоре и на компьютерных установках, могут существенно различаться. Совокупность всех полученных результатов отражена в табл. 6. Так как распределение показателей ФР в возрастных группах не всегда можно было отнести к нормальному, в таблице приведены значения медиан.

Полученные данные указывают не только на внутригрупповые и индивидуальные различия в оценке ФР разными методами, но и на различия в показателях, полученных на компьютеризированных установках с использованием двух методов сепарации изображений – анаглифного и поляризационного.

Влияние метода сепарации изображений на результаты измерения фузионных резервов

В диагностике и лечении нарушений бинокулярного зрения часто используют цветовой метод сепарации левого и правого изображений. Очевидно, что различие фузируемых изображений по цвету может затруднять их слияние, провоцировать преждевременный срыв фузии и вызывать бинокулярную конкуренцию, приводя к неправильной оценке измеряемых показателей или снижению эффективности лечебных процедур.

Ранее проведенные опыты на синоптофоре с использованием специально изготовленных зеленых и красных ТО, имеющих разную степень

насыщенности, указывали на негативное влияние сильного различия левого и правого стимулов по цвету на результаты измерений ФР (Рожкова и др., 1996). Также было установлено, что ненасыщенные цветные ТО дают результаты, значительно превышающие результаты, полученные на насыщенных.

Задача следующего этапа исследования состояла в сравнении результатов оценки ФР в условиях использования цветового и поляризационного методов сепарации левого и правого изображений. В данной серии исследований приняли участие 50 человек в возрасте от 18 до 39 лет. Измерения ФР осуществляли при помощи интерактивной компьютерной программы “Фузия”. При реализации обоих методов сепарации использовали один и тот же 3D монитор. Тестовыми стимулами служили СТС одинаковой структуры для обоих методов сепарации. В одном режиме ТО, предназначенные для левого и правого глаза, имели разные цвета, в другом режиме – разные направления круговой поляризации света. По окончании серии экспериментов испытуемых просили дать субъективные оценки комфортности измерительных процедур при каждом из использованных методов сепарации изображений в 10-балльной шкале.

Анализ совокупности всех полученных данных выявил у большинства испытуемых существенную зависимость ФР от метода сепарации изображений. При оценке конвергентных ФР пики распределения значений, полученных в условиях цветовой и поляризационной сепарации, приходились на интервалы 15–20° и 30–35° соответственно (рис. 5), а при измерении дивергентных ФР – на интервалы |–2–4°| и |–10–12°| соответственно (рис. 6).

На рис. 7 представлены индивидуальные соотношения значений ФР, полученных в разных условиях сепарации. В 25% случаев для конвер-

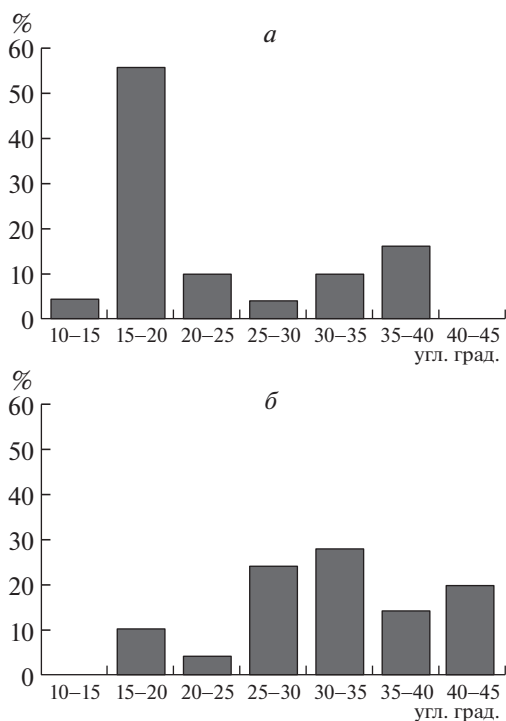


Рис. 5. Гистограммы значений конвергентных ФР, полученных в условиях цветовой – *a* и поляризационной – *б* сепарации.

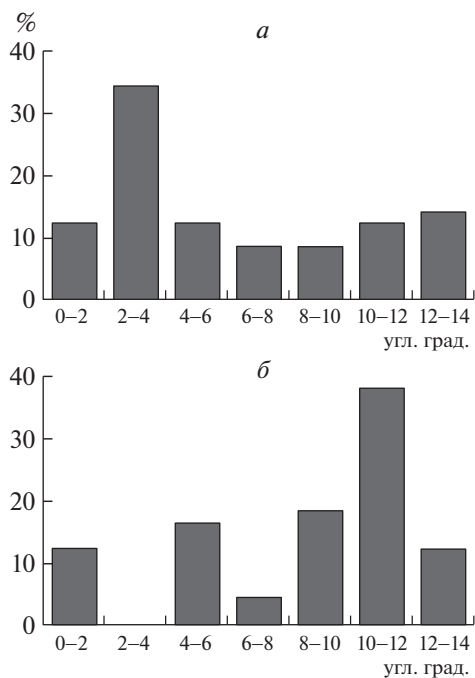


Рис. 6. Гистограммы значений дивергентных ФР, полученных в условиях цветовой – *a* и поляризационной – *б* сепарации.

гентных ФР и 38% случаев для дивергентных в условиях двух методов сепарации были получены близкие результаты – разница составляла не более 2° . На рис. 7 синие прямые линии соответствует равенству показателей в условиях обоих методов. Примерно в 60% случаев для конвергентных ФР и 30% случаев для дивергентных ФР значения, полученные в условиях поляризационной сепарации, были больше в 1.5–2 раза, чем в условиях цветовой. Также следует отметить, что в процессе анализа данных было установлено, что у одного испытуемого значения конвергентных ре-

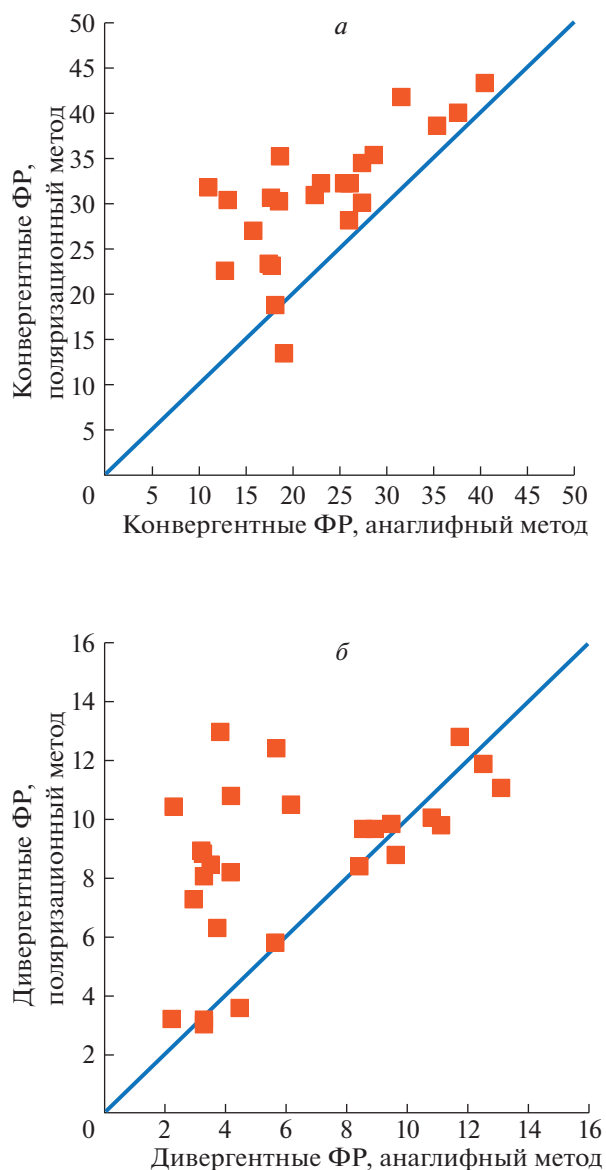


Рис. 7. Индивидуальные соотношения значений конвергентных – *a* и дивергентных – *б* ФР, полученных в условиях поляризационного и цветowego (анаглифного) методов сепарации. Синие линии соответствуют равенству значений ФР, измеренных при использовании обоих указанных методов сепарации.

зервов и у четверых испытуемых значения дивергентных в условиях цветовой сепарации были несколько выше, чем при поляризационной.

Анализ субъективных оценок комфортности процедур в условиях поляризационного и цветowego методов показывает, что в среднем поляризационный метод сепарации получил больше баллов: 9.2 против 7.1 балла. При этом 30% респондентов поставили примерно одинаковые оценки за комфортность обоих методов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– Полученный нами экспериментальный материал позволяет сделать заключение о значительной вариабельности и гетерогенности результатов оценки ФР у детей и взрослых, полученных с использованием разных методов измерения. Данное обстоятельство связано как со сложной гетерархической организацией бинокулярной зрительной системы человека и существованием нескольких автономных систем переработки изображений, так и с влиянием условий и параметров процедуры на результаты измерений ФР. Для измерений на синоптофоре характерны низкая контролируемость оценки и высокая зависимость получаемых данных от субъективных критериев нарушения фузии, применяемых испытуемыми. Использование компьютерной техники и соответствующего программного обеспечения дает возможность стандартизировать процедуру измерений и контролировать “честность” ответов испытуемых, что повышает точность и объективность измерений.

– Исследование ФР при помощи синоптофорного метода у испытуемых разного возраста с использованием двух принципиально различающихся тест-объектов – традиционного на слияние (ТНС) и стереоскопического (СТС) показало, что применение СТС в качестве тестовых стимулов позволяет рассчитывать на получение достаточно хорошо воспроизводимых данных о состоянии ФР.

– При использовании компьютерного метода получаемые значения ФР зависят от того, какой способ сепарации применяется – цветовой/англифный или поляризационный. Различие по цвету может возбуждать механизм бинокулярной конкуренции и быть фактором, затрудняющим объединение информации от двух глаз в зрительных отделах мозга, существенно влияя на результаты диагностических процедур. При одинаковых условиях измерений, но различных способах сепарации, в среднем, более высокие показатели ФР регистрируются при применении поляризационного метода, хотя у некоторых испытуемых оба способа дают одинаковые значения ФР.

– Проведенные исследования показали, что не может быть единого метода оценки ФР на все случаи жизни. В одних случаях требуется стандартный достаточно простой метод, дающий стабильно повторяемые результаты у разных исследователей. В других – необходимы методы, позволяющие измерять ФР в разных условиях и оценивать пределы фузионных способностей. При выборе метода оценки необходимо учитывать условия, в которых осуществляются зрительная работа (выполнение зрительных задач на начальном этапе обучения, работа за компьютером, дистанционное управление, профессиональный отбор для автовождения, пилотирования воздушных и космических аппаратов) и потенциальный запрос (скрининговый осмотр, комплексное изучение, динамическое наблюдение в ходе коррекционной работы).

Авторы выражают благодарность Е. Н. Крутцовой за техническую помощь при подготовке рисунков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Балабаева Е.А., Матросова Ю.В. Сравнительный анализ фузионных резервов у детей со слабой и средней степенью миопии на фоне очковой и ортокератологической коррекции. *Медицина*. 2020. (1). С. 12–19.
<https://doi.org/10.29234/2308-9113-2020-8-1-12-19>
- 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. Комплексный анализ функциональных показателей бинокулярной зрительной системы у школьников. *Сенсорные системы*. 2021. Т. 35 (3). С. 199–216.
<https://doi.org/10.31857/S0235009221030069>
- 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.
- Гули-Заде А.А. *Состояние фузионных резервов у детей в зависимости от возраста, характера рефракции и степени аметропии, пути их нормализации*. Автореф. дисс. канд. мед. наук. Одесса. 1979. 25 с.
- Евсеева А.А., Кузнецов С.Л. Методы изучения качества жизни у офтальмологических больных. *Практическая медицина*. 2012. Т. 4–2 (59). С. 224–228.
- 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.

- Кашенко Т.П. *Нарушения и методы восстановления фузионной способности зрительного анализатора при содружественном косоглазии*. Дисс. канд. мед. наук. М., 1966. 166 с.
- Клокова О.А., Сахнов С.Н., Шелихова О.А., Гейденрих М.С. Некоторые аспекты состояния аккомодационной функции и бинокулярного зрения у взрослых пациентов с гиперметропией, сложным гиперметропическим и смешанным астигматизмом. *Офтальмология*. 2019. Т. 16 (3). С. 344–349. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-3-344-349>
- Кононова Н.Е., Сомов Е.Е. Фузионные возможности здоровых детей различного возраста и страдающих содружественным косоглазием. *Невские горизонты—2018. Материалы научной конференции офтальмологов Невские горизонты*. СПб. Политехника-сервис, 2018. С. 152–162.
- Корнюшина Т.А. Методы реабилитации лиц с функциональными расстройствами зрения. *Вестник офтальмологии*. 2019. (3). С. 31–36. <https://doi.org/10.17116/ofalma201913503131>
- Корнюшина Т.А. Особенности изменения аккомодации у детей с различными видами рефракции под воздействием зрительных нагрузок. *Российская детская офтальмология*. 2014. (2). С. 26–33.
- Овечкин И.Г., Беликова Е.И., Кожухов А.А., Пожарицкий М.Д., Юдин В.Е., Будко А.А., Шакула А.В. Современные методические подходы к коррекции астигматизма у пациентов зрительно-напряженного труда. *Офтальмология*. 2019. Т. 16 (1). С. 88–94. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-1-88-94>
- Овечкин И.Г., Малышев А.В., Карапетов Г.Ю., Семькин В.Д., Депутатова А.Н., Балаян А.С. Методы оценки качества жизни пациента в офтальмологической практике. *Современная оптометрия*. 2015. 7 (87). С. 34–39.
- Рожкова Г.И., Подугольникова Т.А., Сисенгалиева Г.Ж. Компьютерное тестирование бинокулярной зрительной системы человека. II. Прямая оценка основных клинических показателей. *Сенсорные системы*. 1996. 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”*. 1996. Сертификат соответствия “РОСС RU. СП07.Н00035”.
- Сергиенко Н.М. *Офтальмологическая оптика*. М.: Медицина, 1991. 144 с.
- Сомов Е.Е. *Зрительные возможности детей различного возраста и способы их оценки*. СПб. Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет, 2014. 32 с.
- Сомов Е.Е. *Методы офтальмоэргономики*. Л.: Наука, 1989. 157 с.
- Тарутта Е.П., Аклаева Н.А., Тарасова Н.А., Ларина Т.Ю. Влияние офтальмомиотренажера-релаксатора “Визотроник” на фузионные резервы. *Российский общенациональный офтальмологический форум*. Под ред. В.В. Нероева. М.: Апрель, 2018. Т. 1. С. 234–236.
- Федеральные клинические рекомендации “Диагностика и лечение содружественного косоглазия”. *Российская педиатрическая офтальмология*. 2015. (2). С. 56–63.
- Хенкин В.А., Зубарев С.Ф. Состояние фузионных резервов у детей. *Возрастные особенности органа зрения в норме и патологии*. 1973. С. 37–40.
- Ajrezo L., Wiener-Vacher S., Bucci M., Bui-Quoc E. Influence of screen exposure on vergence components from childhood to adolescence. *Int J Ophthalmol Eye Sci*. 2016. V. 4 (1). P. 170–177. <https://doi.org/10.19070/2332-290X-1600036>
- Alrasheed S.H. Clinical characteristics of patients presenting with headache at binocular vision clinic: a hospital based study. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020a. V. 36 (3). P. 247–252. <https://doi.org/10.36351/pjov36i3.1046>
- Alrasheed S.H. Effect of binocular vision problems on childhood academic performance and teachers' perspective. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020b. V. 36 (2). P. 162–167. <https://doi.org/10.36351/pjov36i2.896>
- 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>
- Anderson H., Stuebing K.K., Fern K.D., Manny R.E. Ten-year changes in fusional vergence, phoria, and near-point of convergence in myopic children. *Optom Vis Sci*. 2011. V. 88 (9). P. 1060–1065. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31822171c0>
- Antona B., Barrio A., Barra F., Gonzalez E., Sanchez I. Repeatability and agreement in the measurement of horizontal fusional vergences. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2008. V. 28 (5). P. 475–491. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2008.00583.x>
- Askarizadeh F., Heirani M., Khorrami-Nejad M., Khabazkhoob M., Narooie-Noori F. Effect of vergence facilitation testing on horizontal fusional reserves. *Optometry and Vision Science*. 2022. V. 99 (1). P. 51–57. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001825>
- Aziz S., Cleary M., Stewart H.K., Weir C.R. Are orthoptic exercises an effective treatment for convergence and fusion deficiencies? *Strabismus*. 2006. V. 14(4). P. 183–189. <https://doi.org/10.1080/09273970601026185>
- Conway M.L., Thomas J., Subramanian A. Is the aligning prism measured with the mallet unit correlated with fusional vergence reserves? *PLoS ONE*. 2012. V. 7 (8). e42832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042832>
- 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>
- Fray K.J. Fusional amplitudes: developing testing standards. *Strabismus*. 2017. V. 25 (3). P. 145–155. <https://doi.org/10.1080/09273972.2017.1349814>

- Fu T., Wang J., Levin M., Su Q., Li D., Li J. Fusional vergence detected by prism bar and synoptophore in Chinese childhood intermittent exotropia. *J. Ophthalmol.* 2015. P. 1–6.
<https://doi.org/10.1155/2015/987048>
- Goss D.A., Becker E. Comparison of near fusional vergence ranges with rotary prisms and with prism bars. *Optometry.* 2011. V. 82 (2). P. 104–107.
<https://doi.org/10.1016/j.optm.2010.09.011>
- Jorge J., de Almeida J.B., Parafita M.A. Binocular vision changes in university students: a 3-year longitudinal study. *Optom Vis Sci.* 2008. V. 85 (10). P. 999–1006.
<https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181890d35>
- Lança C.C., Rowe F.J. Measurement of fusional vergence: a systematic review. *Strabismus.* 2019. V. 27 (2). P. 88–113.
<https://doi.org/10.1080/09273972.2019.1583675>
- Lança C.C., Rowe F.J. Variability of fusion vergence measurements in heterophoria. *Strabismus.* 2016. V. 24 (2). P. 63–69.
<https://doi.org/10.3109/09273972.2016.1159234>
- Oganyan T.A., Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves by means of interactive software: the effect of stimulus velocity. *Perception.* 2009. V. 38 (Supplementary). P. 105.
- Piano M.E.F., O'Connor A.R. The effect of degrading binocular single vision on fine visuomotor skill task performance. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2013. V. 54 (13). P. 8204–8213.
<https://doi.org/10.1167/iovs.12-10934>
- 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>
- Rucker J.C., Phillips P.H. Efferent vision therapy. *J. Neuro-Ophthalmology.* 2018. V. 38 (2). P. 230–236.
<https://doi.org/10.1097/WNO.0000000000000480>
- 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.
- Sreenivasan V., Babinsky E.E., Wu Y., Candy T.R. Objective measurement of fusional vergence ranges and heterophoria in infants and preschool children. *Investigative ophthalmology & visual science.* 2016. V. 57 (6). P. 2678–2688.
<https://doi.org/10.1167/iovs.15-17877>
- 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>

Dependence of the results of the assessment of fusion reserves on the measurement method, tools and parameters of test stimuli

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

Measurement of fusional reserves (FR) is one of the main procedures used for assessing the conditions of binocular functions in patients, and for differential diagnostics of visual disorders. Nevertheless, among ophthalmologists and specialists in visual perception, there is still no consensus on the best method and procedure for measuring FR. The reasons of such situation could be complexity of interactions between sensory, accommodative and oculomotor mechanisms of vision during the measurement procedures, as well as dependence of the results obtained on methods and tools employed. Nevertheless, for correct interpretation and effective use of the FR estimates, it is necessary to clearly understand the essence of testing and the degree of influence of various factors on the measurement results. It is also important for improving the methods of the FR assessment and elaborating better diagnostic criteria. One of the ways to approach this goal is to compare the FR data obtained by different methods on the same participants. Some studies in this direction have been already conducted, but they are still insufficient for comprehensive conclusions. This article contains a comparative analysis of the results obtained employing traditional measurements of FR on the synoptophore and applying novel computerized methods. The advantages and disadvantages of various methods, the prospects for their improvement and standardization are discussed.

Key words: binocular vision, fusion reserves, accommodation, vergence, synoptophore, prism bar, computer methods of visual function assessment, stereopair separation techniques

REFERENCES

- Balabaeva E.A., Matrosova Yu.V. Sravnitel'nyi analiz fuzionnykh rezervov u detei so slaboi i srednei stepen'yu miopii na fone ochkovoi i ortokeratologicheskoi korektsii [The comparative analysis of fusion reserves in children with mild and average degree of myopia in association with spectacle and orthokeratological correction]. *Medicine.* 2020. (1). P. 12–19. (in Russian).
<https://doi.org/10.29234/2308-9113-2020-8-1-12-19>
- 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. Kompleksnyi analiz funktsionalnykh pokazatelei binokulyarnoi zritel'noi sistemy u shkolnikov [Analysis of the functions of binocular visual systems in schoolchildren]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2021. V. 35 (3). P. 199–216 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0235009221030069>
- 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).
- Guli-Zade A.A. *Sostoyaniye fuzionnykh rezervov u detei v zavisimosti ot vozrasta, kharaktera refraktsii i stepeni ametropii, puti ikh normalizatsii* [The state of fusional reserves in children depending on age, refraction, and ametropia, and the ways of their normalization]. Abstract of the PhD thesis. Odessa. 1979. 25 p. (in Russian).
- Evshevs A.A., Kuznetsov S.L. Metody izucheniya kachestva zhizni u oftal'mologicheskikh bol'nykh [Methods of study of life quality in ophthalmological patients]. *Practical medicine*. 2012. V. 4–2 (59). P. 224–228. (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]. *Ophthalmology Journal*. 2010. V. 3 (3). P. 10–13. (in Russian).
- Kashura O.I., Egorov V.V., Smolyakova G.P. Ehffektivnost' funktsional'noi reabilitatsii zritel'nykh rasstroistv 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).
- Kaschenko T.P. *Narusheniya i metody vosstanovleniya fuzionnoi sposobnosti zritel'nogo analizatora pri sodruzhestvennom kosoglazii* [Fusion ability of the visual analyzer in concomitant strabismus: impairments and methods of restoring]. PhD Thesis. Moscow, 1966. 166 p. (in Russian).
- Klokova O.A., Sakhnov S.N., Shelikhova O.A., Geydenrikh M.S. Nekotorye aspekty sostoyaniya akkomodatsionnoi funktsii i binokulyarnogo zreniya u vzroslykh patsientov s gipermetropiei, slozhnym gipermetropicheskim i smeshannym astigmatizmom [Some aspects of the accommodative function condition and binocular vision in adult patients with hypermetropia, with complex hypermetropic and mixed astigmatism]. *Ophthalmology in Russia*. 2019. V. 16 (3). P. 344–349. (in Russian). <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-3-344-349>
- 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).
- Kornyushina T.A. Metody reabilitatsii lits s funktsional'nymi rasstroistvami zreniya [Rehabilitation methods for individuals with functional vision disorders]. *The russian annals of ophthalmology*. 2019. (3). P. 31–36. (in Russian). <https://doi.org/10.17116/oftalma201913503131>
- Kornyushina T.A. Osobennosti izmeneniya akkomodatsii u detei s razlichnymi vidami refraktsii pod vozdeistviem zritel'nykh nagruzok [Features of accommodation changes in children with different types of refraction under effect of visual loads]. *Russian ophthalmology of children*. 2014. (2). P. 26–33. (in Russian).
- Ovechkin I.G., Belikova E.I., Kozhukhov A.A., Pozharitskii M.D., Yudin V.E., Budko A.A., Shakula A.V. Sovremennye metodicheskie podkhody k korrektsii astenopii u patsientov zritel'no-napryazhennogo truda [Modern Methodological Approaches to the Correction of Asthenopia in Patients with Visual-Intensive Work]. *Ophthalmology in Russia*. 2019. V. 16 (1). P. 88–94. (in Russian). <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2019-1-88-94>
- Ovechkin I.G., Malyshev A.V., Karapetov G.YU., Semykin V.D., Deputatova A.N., Balayan A.S. Metody otsenki kachestva zhizni patsienta v oftal'mologicheskoi praktike [Methods for assessing the quality of life of a patient in ophthalmic practice]. *Sovremennaya optometriya*. 2015. 7 (87). P. 34–39. (in Russian).
- Rozhkova G.I., Podugol'nikova T.A., Sisengalieva G.ZH. Komp'yuternoe testirovaniye 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]. 1996. 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. *Integrirovannyi lechebno-diagnosticskii kompleks programm "AKADEMIK"* [Integrated programs for diagnostics and treatment "AKADEMIK"]. 1996. State certificate "POCC RU. СП07.H00035".
- Sergienko N.M. *Oftal'mologicheskaya optika* [Ophthalmological optics]. Moscow. Meditsina, 1991. 144 p. (in Russian).
- Somov E.E. *Zritel'nye vozmozhnosti detei razlichnogo vozrasta i sposoby ikh otsenki* [Visual functions and methods for their assessment]. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi pediatricheskii meditsinskii universitet, 2014. 32 p. (in Russian).
- Somov E.E. *Metody oftal'moehrgonomiki* [Ophthalmological methods]. Leningrad. Nauka, 1989. 157 p. (in Russian).
- Tarutta E.P., Aklaeva N.A., Tarasova N.A., Larina T.YU. Vliyaniye oftal'miotrenazhera-relaksatora "Vizotronik" na fuzionnye rezervy [Influence of the ophthalmological myotrainer and relaxer "Visotronic" on fusion reserves]. *Proceedings of the Rossiiskii obshchestvennyi oftal'mologicheskii forum*. Ed. V.V. Neroev. Moscow, April'. 2018. V. 1. P. 234–236. (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).

- Khenkin V.A., Zubarev S.F. Sostoyanie fuzionnykh rezervov u detei [State of fusion reserves in children]. *Vozrastnye osobennosti organa zreniya v norme i patologii*. 1973. P. 37–40. (in Russian).
- Ajrezo L., Wiener-Vacher S., Bucci M., Bui-Quoc E. Influence of screen exposure on vergence components from childhood to adolescence. *Int J Ophthalmol Eye Sci*. 2016. V. 4 (1). P. 170–177. <https://doi.org/10.19070/2332-290X-1600036>
- Alrasheed S.H. Clinical characteristics of patients presenting with headache at binocular vision clinic: a hospital based study. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020a. V. 36 (3). P. 247–252. <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046> <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046>
- Alrasheed S.H. Effect of binocular vision problems on childhood academic performance and teachers' perspective. *Pakistan Journal of Ophthalmology*. 2020b. V. 36 (2). P. 162–167. <https://doi.org/10.36351/pjo.v36i3.1046>
- 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>
- Anderson H., Stuebing K.K., Fern K.D., Manny R.E. Ten-year changes in fusional vergence, phoria, and near-point of convergence in myopic children. *Optom Vis Sci*. 2011. V. 88 (9). P. 1060–1065. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e31822171c0>
- Antona B., Barrio A., Barra F., Gonzalez E., Sanchez I. Repeatability and agreement in the measurement of horizontal fusional vergences. *Ophthalmic Physiol Opt*. 2008. V. 28 (5). P. 475–491. <https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.2008.00583.x>
- Askarizadeh F., Heirani M., Khorrami-Nejad M., Khabazkhoob M., Narooie-Noori F. Effect of vergence facility testing on horizontal fusional reserves. *Optometry and Vision Science*. 2022. V. 99 (1). P. 51–57. <https://doi.org/10.1097/OPX.0000000000001825>
- Aziz S., Cleary M., Stewart H.K., Weir C.R. Are orthoptic exercises an effective treatment for convergence and fusion deficiencies? *Strabismus*. 2006. V. 14 (4). P. 183–189. <https://doi.org/10.1080/09273970601026185>
- Conway M.L., Thomas J., Subramanian A. Is the aligning prism measured with the mallett unit correlated with fusional vergence reserves? *PLoS ONE*. 2012. V. 7 (8). e42832. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042832>
- 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>
- Fray K.J. Fusional amplitudes: developing testing standards. *Strabismus*. 2017. V. 25 (3). P. 145–155. <https://doi.org/10.1080/09273972.2017.1349814>
- Fu T., Wang J., Levin M., Su Q., Li D., Li J. Fusional vergence detected by prism bar and synoptophore in Chinese childhood intermittent exotropia. *J Ophthalmol*. 2015. P. 1–6. <https://doi.org/10.1155/2015/987048>
- Goss D.A., Becker E. Comparison of near fusional vergence ranges with rotary prisms and with prism bars. *Optometry*. 2011. V. 82 (2). P. 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.optm.2010.09.011>
- Jorge J., de Almeida J.B., Parafita M.A. Binocular vision changes in university students: a 3-year longitudinal study. *Optom Vis Sci*. 2008. V. 85 (10). P. 999–1006. <https://doi.org/10.1097/OPX.0b013e3181890d35>
- Lança C.C., Rowe F.J. Measurement of fusional vergence: a systematic review. *Strabismus*. 2019. V. 27 (2). P. 88–113. <https://doi.org/10.1080/09273972.2019.1583675>
- Lança C.C., Rowe F.J. Variability of fusion vergence measurements in heterophoria. *Strabismus*. 2016. V. 24 (2). P. 63–69. <https://doi.org/10.3109/09273972.2016.1159234>
- Oganyan T.A., Vasilyeva N.N., Rozhkova G.I. Assessment of fusional reserves by means of interactive software: the effect of stimulus velocity. *Perception*. 2009. V. 38 (Supplementary). P. 105.
- Piano M.E.F., O'Connor A.R. The effect of degrading binocular single vision on fine visuomotor skill task performance. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2013. V. 54 (13). P. 8204–8213. <https://doi.org/10.1167/iovs.12-10934>
- 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>
- Rucker J.C., Phillips P.H. Efferent vision therapy. *Journal of Neuro-Ophthalmology*. 2018. V. 38 (2). P. 230–236. <https://doi.org/10.1097/WNO.0000000000000480>
- 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.
- Sreenivasan V., Babinsky E.E., Wu Y., Candy T.R. Objective measurement of fusional vergence ranges and heterophoria in infants and preschool children. *Investigative ophthalmology & visual science*. 2016. V. 57 (6). P. 2678–2688. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-17877>
- 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>