
**ЗРИТЕЛЬНАЯ
СИСТЕМА**

УДК 612.821+843

**ИЗМЕРЕНИЕ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ:
НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ ВЛИЯНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ СПЕКТРА ФУРЬЕ ОПТОТИПОВ**

© 2012 г. Г. И. Рожкова, А. Е. Белозёров, Д. С. Лебедев

*Институт проблем передачи информации, РАН
127994 Москва, пер. Б. Каретный, 19
E-mail: gir@iitp.ru*

Поступила в редакцию 09. 12.2011 г.

Для оценки влияния низкочастотных составляющих спектра Фурье тестовых стимулов на изменение остроты зрения сравнивали результаты, полученные на одних и тех же испытуемых при помощи трех наборов простых оптотипов: стилизованных знаков Е в четырех ориентациях, стандартных трехполосных стимулов и модифицированных нами трехполосных стимулов. Задачей испытуемых было определение ориентации стимулов в ситуации вынужденного выбора. Используемые оптотипы схожи по форме, но имеют специфические различия в спектрах Фурье. В первой серии экспериментов по данным тестирования десяти испытуемых при помощи соответствующих печатных таблиц строили и сопоставляли индивидуальные психометрические функции. Во второй серии экспериментов сравнивали гистограммы индивидуальных значений остроты зрения для трех оптотипов, полученные в результате компьютерного измерения остроты зрения у большего числа испытуемых. Обнаружено, что низкочастотные составляющие спектров могут оказывать принципиально различное влияние на распознавание околопороговых стимулов разными индивидуумами: такие составляющие облегчали распознавание одним испытуемым, затрудняли – другим, и никак не влияли на третьих. Четкие выводы об индивидуальной вариабельности и неоднозначности влияния низкочастотных составляющих удалось получить благодаря тому, что модифицированные трехполосные стимулы можно было считать своеобразными эталонами: в их разностных спектрах низкочастотные составляющие были практически устранены.

Ключевые слова: зрение человека, визометрия, острота зрения, оптотип, разностные спектры, индивидуальная вариабельность.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на кажущуюся простоту задачи измерения остроты зрения и огромное число попыток ее решения, в настоящее время не существует общепризнанного метода точной оценки этого показателя. На протяжении полутора столетий в поисках наилучшего метода специалисты пытались решать естественно возникающие при этом частные задачи: было предложено множество различных оптотипов (тестовых знаков), обсуждались разные способы их группировки и основания для выбора градаций размера, сравнивались различные процедуры измерений и правила принятия решения. Однако единого мнения до сих пор не сложилось, в связи с чем на данный мо-

мент существует довольно большое разнообразие тестов и таблиц, применяемых как в клиниках, так и в научной работе, причем в последнее время исследователи все чаще используют 2–3 способа измерения остроты зрения одновременно и анализируют различия в результатах (Бондарко, Семенов, 2005; Graf, Becker, 1999; Striers et al., 2003, 2004; Williams et al., 2008).

Настоящая статья касается проблемы выбора простых оптотипов для точного и достоверного измерения остроты зрения. Проводимые в последние десятилетия многоплановые исследования зрительного восприятия с применением компьютерного моделирования и современных методов анализа позволяют более четко сформулировать

требования к оптотипам и процедуре измерения и понять причины неопределенности сложившейся ситуации.

Как известно, термин “острота зрения” был введен в 1861 г. Дондерсом, а в 1862 г. его ученик Снеллен опубликовал свою знаменитую таблицу для оценки остроты зрения, создав специальный новый шрифт, буквы которого изображались на сетке 5×5 и были названы “оптотипами” (Snellen, 1862). До этого для проверки зрения использовали таблицы с обычными типографскими шрифтами. Оптотипы Снеллена включали девять букв (C, D, E, F, L, O, P, T, Z), большинство из которых имели ярко выраженные засечки. Тестовая таблица содержала 11 строк с опто типами, уменьшающимися от верхней строки к нижней. За “стандартное” (условно нормальное) зрение Дондерс и Снеллен предложили принимать зрение человека, способного узнавать опто типы размером в $5'$ при толщине линий $1'$.

Несколько позднее Ландольт (Landolt, 1899) предложил использовать в тестовых таблицах единственный тестовый знак – кольцо, но с разрывом в разных позициях: вверху, внизу, слева, справа, а также посередине между этими положениями, что похоже на букву С в разных ориентациях. Долгое время считалось, хотя экспериментально это не проверяли, что для соответствия результатов тестирования по Снеллену и Ландольту общие размеры колец Ландольта и знаков Снеллена и их наименьших деталей должны быть одинаковы. В частности, подразумевалось, что у кольца Ландольта, по которому определяется условный уровень нормального зрения, внешний диаметр должен быть равен $5'$, а разрыв – $1'$. Однако в последние десятилетия было показано, что суждение об эквивалентности опто типов только на основе равенства их общих размеров и размеров наименьших деталей далеко не всегда правильно, что будет обсуждаться далее.

На протяжении полутора столетий за рубежом регулярно вводились в практику новые опто типы – буквы без засечек, цифры, стилизованные Е в четырех ориентациях, контурные и силуэтные изображения простых объектов, например, Леасимволы, картинки Росанно, Аллена, Остерберга. Общее представление об основных этапах этой работы могут дать обзоры и руководства (Bennett, 1965; Linksz, 1975; Fern, Manny, 1986; Schmidt, 1992; Colenbrander, 2001; Kniestedt, Stamper, 2003; Rosenfield et al., 2009), а также статьи авторов, предлагавших или апробировавших новые опто типы (Sloan, 1959; Oppel, 1964; Taylor, 1978; Nyvarinen et al., 1980; Lindstedt, 1988).

Вопрос о необходимости стандартизации измерений остроты зрения был осознан широкими кругами офтальмологов к началу XX в., и в 1909 г. на XI Международном офтальмологическом конгрессе в качестве основы для создания измерительных таблиц были приняты кольца Ландольта. Около двадцати лет назад кольцо Ландольта было утверждено в качестве международного стандартного опто типа (ISO 8596); в 2009 г. соответствующий документ был переиздан практически без изменений.

В отечественной практике для оценки остроты зрения до сих пор используют преимущественно таблицы Сивцева-Головина с опто типами в виде букв кириллицы и колец Ландольта, а также таблицы Орловой с картинками для детей, хотя в теоретических и экспериментальных исследованиях обсуждались недостатки применяемых опто типов и предлагались различные интересные варианты тестовых знаков (Шелепин и др., 1985, 1992; Волков и др., 1987; Бондарко и др., 1999). В последние десятилетия были созданы отечественные таблицы, структура которых приближена к международным стандартам, но в форму опто типов принципиальных изменений не было внесено (Проскурина и др., 1998; Росляков, 2001). Кроме того, для экспертной оценки остроты зрения в случаях, когда пациент пытается зависить или занижить свои показатели, были предложены специальные опто типы и процедуры (Коскин, 2009; Koskin et al., 2006), но их использование в повседневной врачебной практике затруднено.

Теоретически идеальными опто типами для оценки остроты зрения являются протяженные (математически – бесконечные) синусоидальные решетки – стимулы с синусоидальным профилем светлоты/яркости, которые могут быть охарактеризованы одним параметром – пространственной частотой. Почти идеальными можно также считать ограниченные решетки, у которых амплитуда синусоиды снижается с удалением от центра по закону Гаусса – элементы Габора, имеющие в спектре Фурье один максимум на частоте решетки. Однако создавать приемлемые по качеству изображения такого типа на бумажных или пленочных носителях для массового применения проблематично. В то же время удобные в практическом отношении опто типы – буквы, цифры, стилизованные изображения простых предметов – не очень подходят для теоретического рассмотрения, так как пока нет возможности удовлетворительно описать их преобразование и анализ в зрительной системе. Очевидно, что чем сложнее опто типы, тем большее число нейронов и даже отделов зри-

тельной системы может вовлекаться в анализ их формы и распознавание. В общей схеме узнавания стимула на основе сравнения с образцом необходимо отразить существование нескольких путей обработки информации и разных локусов формирования и хранения образцов, из которых они берутся для сравнения. Таким образом, фактически, при использовании зрительных стимулов разного типа оценивается функционирование различных нейронных структур, что необходимо учитывать при анализе результатов.

В связи с этим большой интерес представляют относительно простые стимулы, как бы являющиеся промежуточными между синусоидальными решетками и стимулами сложной формы, например – двухградационные решетки с небольшим числом периодов и близкие к ним стимулы в виде стилизованной буквы Е в четырех ориентациях (tumbling-E). Последние очень популярны во многих странах; широкое распространение эти знаки получили после того, как Тейлор сделал на их основе таблицу с пропорциональным дизайном для оценки зрения аборигенов Австралии, незнакомых с латинским шрифтом (Taylor, 1978).

Хотя теоретическому и экспериментальному исследованию восприятия различных опто типов было посвящено немало работ, их результаты пока не позволяют однозначно судить о достоинствах и недостатках различных тестовых знаков. Это объясняется целым рядом факторов, как методических, так и принципиальных. К сожалению, разные исследования, как правило, настолько различаются в методическом отношении – по общей организации эксперимента, условиям измерений, числу и возрасту испытуемых, степени их знакомства с процедурой тестирования, – что сопоставление результатов весьма проблематично. Но еще более существенно представляются трудности принципиального характера, главной из которых, по-видимому, является необходимость проведения достаточно объемного комплекса измерений с варьированием многих параметров тестовых стимулов на одних и тех же испытуемых за относительно короткое время, гарантируя при этом отсутствие утомления и признаков обучения. Компромиссным выходом из этого сложного положения может быть сравнительное исследование восприятия простых и достаточно схожих между собой опто типов, особенности которых и различия между которыми относительно легко охарактеризовать. Такой подход поможет наметить пути анализа более сложных опто типов, их ранжирования и сопоставления.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В настоящей работе для сравнительного анализа нами были взяты три набора простых опто типов (рис. 1): знаки Е в четырех ориентациях (Taylor, 1978), стандартные трехполосные стимулы (USAF-1951; Brown et al., 1991) и модифицированные нами трёхполосные стимулы (Лебедев и др., 2010), у которых длина полос увеличена примерно на 20% по сравнению со стандартом.

При всем разнообразии конкретных вариантов опто типов, суть всех процедур по измерению остроты зрения сводится к определению того наименьшего (критического) размера опто типа, при котором испытуемому еще удастся правильно распознавать предъявляемые стимулы. Поясним кратко, чем определяется критический размер.

Исходное изображение опто типа (на экране монитора, листе бумаги) проецируется на сетчатку глаза посредством его оптической системы. Сетчаточное изображение всегда отличается от исходного по причине неизбежных дифракционных эффектов и абберационных искажений глазной оптики. Дополнительные искажения вносятся в процессе формирования так называемого нейронного изображения – представления стимула в параметрах активности нейронов, которое анализируется затем нейронными механизмами, осуществляющими распознавание. Трансформацию исходного изображения в нейронное можно приблизительно описать на пространственно-частотном языке как преобразование двумерного спектра Фурье исходного изображения посредством фильтра нижних пространственных частот, который уменьшает амплитуды спектральных составляющих тем сильнее, чем выше их частота (Watson, Ahumada, 2005). Уменьшение размера стимула влечёт за собой пропорциональное повышение частот всех спектральных составляющих стимула и увеличение степени их подавления при фильтрации. Соответственно, различия между стимулами разной ориентации сглаживаются, что приводит к ошибкам в распознавании ориентации испытуемым. В нейронных изображениях обеднение спектров за счет подавления высокочастотных составляющих вызывает расплывчатость границ и превращение стимулов в округлые пятна. Это схематически показано на рис. 2, где представлены смоделированные нейронные изображения рассматриваемых нами опто типов в условиях, когда их размеры приближаются к пороговым.

При описании простых опто типов принято использовать понятие “характеристическая частота

та” – F_c . Значение F_c определяется наименьшими (критическими) размерами элементов изображения, например, протяженностью разрыва в кольце Ландольта. Рассмотрим с этой точки зрения исследованные нами оптоотипы. Трёхполосные оптоотипы (рис. 1, б и в) представляют собой фрагменты двухградационных (чёрно-белых) решёток, а знаки Е (рис. 1, а) получаются из этих фрагментов посредством сравнительно небольших изменений. Естественно, что к этим оптоотипам особенно удобно применять понятие “характеристическая частота” F_c . В случае стандартного трёхполосного оптоотипа частота F_c совпадает с пространственной частотой решетки, из которой взят данный фрагмент. Если ширина линий (и ширина промежутков между линиями) равна W , то период решётки есть $2W$ и $F_c = 1/2W$. Так как ширина знака в направлении, перпендикулярном направлению полос, равна $5W$ (три полосы и два промежутка между ним), то по указанному направлению в знак укладывается 2.5 периода F_c . Поскольку в стандартных трёхполосных стимулах и в знаках Е длина полос равна $5W$, то эти оптоотипы можно вписать в квадрат со стороной $5W$. Эта величина характеризует размер оптоотипа.

При уменьшении углового размера оптоотипа $5W$ значение $F_c = 1/2W$ возрастает. Но, как уже говорилось, чем выше частота F_c , тем сильнее ослабляется амплитуда соответствующей составляющей спектра нейронного изображения оптоотипа. С ослаблением амплитуды уменьшается разница спектров стимулов разной ориентации, что при наличии в распознающей нейронной сети шумов приводит к неправильным ответам испытуемого.

Если ширина линий у тестовых знаков Е и у модифицированных трёхполосных стимулов такая же, как у стандартных трёхполосных стимулов, очевидно, что эти три набора оптоотипов должны характеризоваться одним и тем же значением F_c . Однако это не значит, что результаты измерения остроты зрения с помощью каждого из данных оптоотипов будут совпадать. Дело в том, что, во-первых, изначально различаются амплитуды составляющих спектра этих оптоотипов, близких к характеристической частоте, и, во-вторых, результаты распознавания знаков определяются не только составляющими характеристической частоты, но и составляющими на существенно более низких частотах (Alexander et al., 1994; Solomon, Pelli, 1994; Anderson, Thibos, 1999; Majaj et al., 2002; Chung et al., 2002). Составляющие с частотами выше, чем F_c , можно не учитывать, так как они обычно слабо представлены и выходят за пределы восприятия.

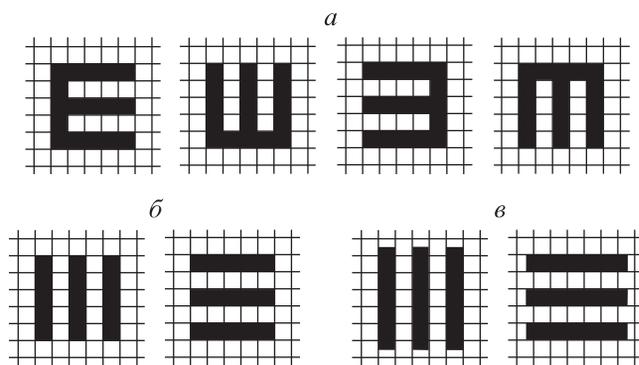


Рис. 1. Оптоотипы, использованные в экспериментах: знак Е в четырех ориентациях (а), стандартные трехполосные стимулы (б), модифицированные трехполосные стимулы (в). Для сравнения пропорций оптоотипы изображены на масштабной сетке.

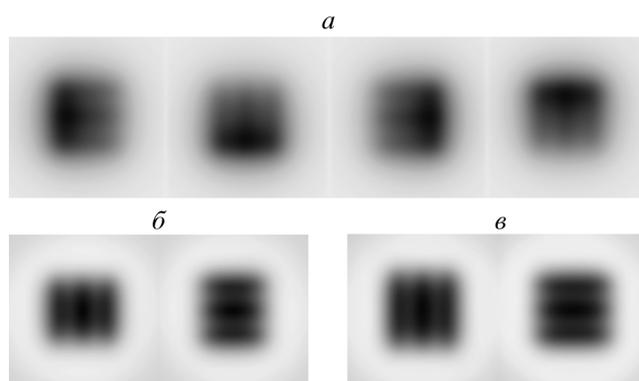


Рис. 2. Имитация расплывчатых нейронных изображений тестовых стимулов, размеры которых приближаются к пороговым. а – знак Е в четырех ориентациях; б – стандартные трехполосные оптоотипы; в – модифицированные трехполосные оптоотипы.

Осложнения, связанные с возможностью определения ориентации кольца Ландольта на основе низкочастотных составляющих его спектра Фурье, обсуждались в работе Бондарко и Даниловой (Bondarko, Danilova, 1997), где сравнивались частотные характеристики колец Ландольта и знаков Е. Авторы сделали вывод, что оценки остроты зрения по кольцам Ландольта должны быть выше, чем по знакам Е. В работах Андерсона и Тибоса (Anderson, Thibos, 1999а, в) было проанализировано восприятие знаков Е меняющейся ориентации и двух разных начертаний (с равными по длине линиями и с укороченной средней линией), а также стандартных трехполосных стимулов. Согласно предположению авторов, процедура определения остроты зрения завершается, когда с уменьшением величины знаков самая низкая

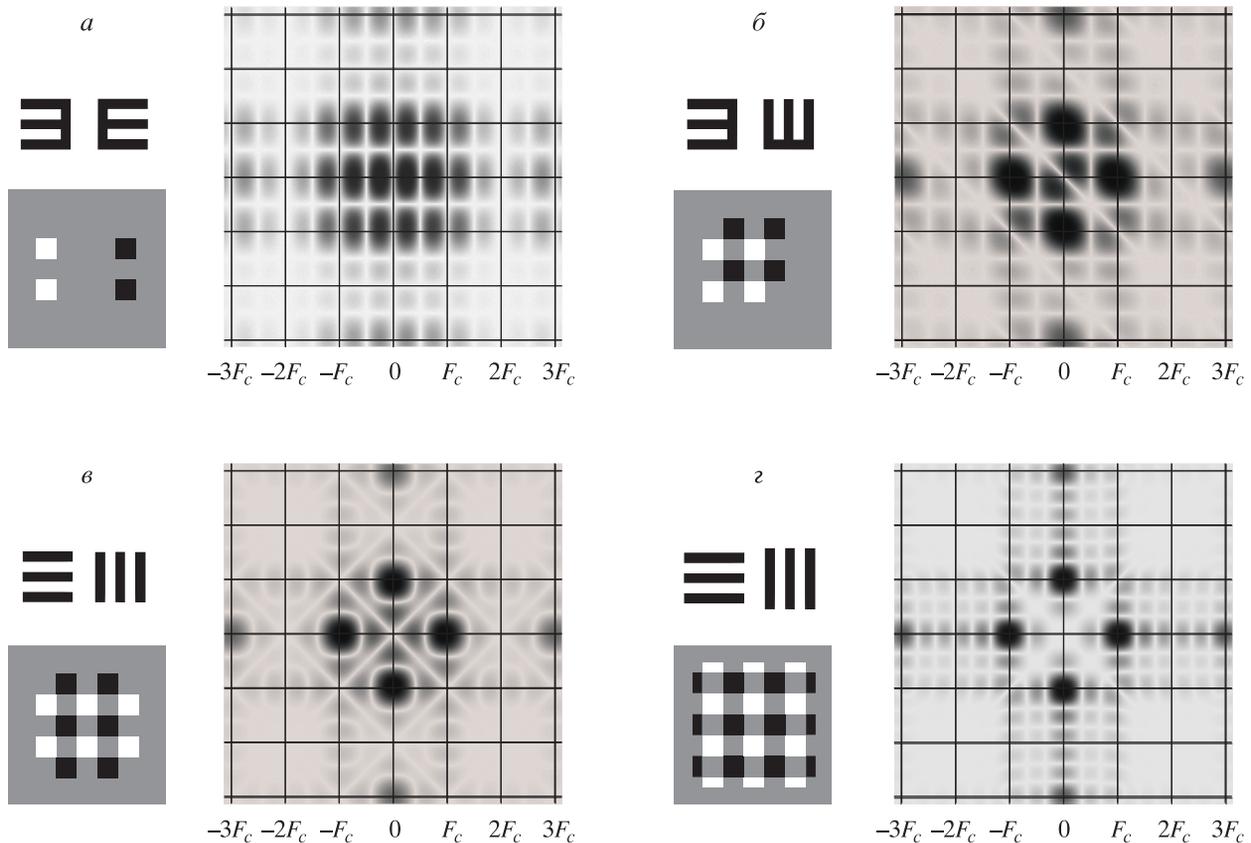


Рис. 3. Разностные изображения и разностные амплитудные спектры Фурье для симметричных (а) и ортогональных (б) знаков Е, стандартных (в) и модифицированных (з) трехполосных стимулов.

На изображениях разностных амплитудных спектров белый цвет соответствует нулю, черный – максимальному значению амплитуды в данном спектре. F_c – характеристическая частота.

частота, обеспечивающая различие, достигает предела Найквиста. В результате экспериментов по различению фильтрованных стимулов с отсеченными низкими или высокими частотами на периферии поля зрения 30° авторы нашли, что существенными для различения являются составляющие с частотами в диапазоне от 0.9 до 2.2 циклов/знак при характеристической частоте 2.5 циклов/знак. К сожалению, данные исследования были проведены только на двух опытных испытуемых (авторах).

Чтобы оценить влияние низкочастотных составляющих спектров оптоотипов на возможность их распознавания, мы использовали тот же широко применяемый подход, что и Андерсон с Тибсом – анализировали двумерные спектры Фурье рассматриваемых оптоотипов и их амплитудные разностные спектры. Поскольку распознавание осуществляется путем анализа различий, далее здесь рассматриваются только разностные спектры. В идеале, в разностном спектре амплитудные максимумы должны приходиться на критическую

частоту (наличие их на более высоких частотах несущественно), а в низкочастотной области амплитуда должна быть равна нулю. На рис. 3 представлены разностные изображения и амплитудные разностные спектры Фурье для пары симметричных (а) и ортогональных (б) знаков Е, пары стандартных трехполосных стимулов (в) и пары модифицированных трехполосных стимулов (з). В первом случае (рис. 3, а) составляющие, близкие к F_c , зрительно не выделяются из сложного спектра, а при внимательном анализе их можно обнаружить лишь на диагональных направлениях. Но в остальных трех случаях (рис. 3, б, в, з) максимумы, соответствующие F_c , хорошо выявляются в виде самых темных пятен на основных осях. Присутствующие во всех спектрах более высокочастотные составляющие можно не принимать во внимание, так как острота зрения оценивается по оптоотипам околопороговых размеров, у которых эти составляющие оказываются за пределами диапазона воспринимаемых частот. Существенно то, что во всех разностных спектрах, кроме спек-

тра трехполосных модифицированных стимулов, видны достаточно явные низкочастотные составляющие, занимающие центральную область между четырьмя основными максимумами.

Анализируя зависимость мощности низкочастотных составляющих от параметров трехполосного стимула, мы предположили, что их представительство в разностном спектре трехполосных стимулов можно существенно снизить, несколько удлинив полосы. Компьютерные эксперименты с варьированием параметров показали, что для наилучшего подавления низких частот удлинение нужно сделать близким к 20%. Другими словами, в оптимальных стимулах длина полос должна быть близка к значению $6W$, как это показано на рис. 1, в. Таким образом, модифицированный оплотип, в отличие от стандартного, вписывается в прямоугольник с минимальным размером $5W \times 6W$.

Сравнение разностных спектров для стандартных (рис. 3, в) и модифицированных (рис. 3, з) трехполосных стимулов показывает, что в результате предлагаемой нами модификации в центральной низкочастотной зоне двумерного разностного спектра появляется почти однородное поле, соответствующее малому различию стимулов с вертикальной и горизонтальной ориентацией полос. Это означает, что возможность распознавания стимулов на основе низких пространственных частот практически исключается. Данное свойство модифицированных трехполосных стимулов позволило нам использовать их в качестве своеобразных эталонов для выяснения того, насколько низкочастотные составляющие спектра схожих стимулов влияют на результаты измерений остроты зрения на практике.

Далее представлены данные двух серий экспериментов, проведенных с этой целью. В первой серии экспериментов для оценки влияния низкочастотных составляющих разностного спектра мы сравнивали вид психометрических функций для трех разных оплотипов, а во второй серии сравнивались результаты измерений остроты зрения при помощи таких же оплотипов в условиях компьютерного тестирования.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Методика

Построение индивидуальных психометрических функций. Для построения психометрических функций регистрировали ответы испытуемых на предъявление оплотипов разного размера. С

этой целью на листах формата А4 были напечатаны наборы офтальмологических таблиц с традиционными знаками Е в четырех ориентациях, трехполосными стандартными стимулами и трехполосными модифицированными стимулами. Каждая таблица содержала стимулы одного вида. Оплотипы одного размера располагались в этих таблицах строками по десять стимулов и были распределены равномерно; закон изменения размера от строки к строке был близок к геометрической прогрессии со знаменателем 1.1. Измерения проводили при освещенности таблиц 1000 лк и расстоянии наблюдения 4 м.

В процессе эксперимента таблицы предъявляли в псевдослучайном порядке, причем каждую – по нескольку раз. Ориентацию каждой таблицы регулярно меняли, поворачивая ее на 180° , чтобы исключить запоминание. Испытуемые должны были просматривать около десяти строк с такими размерами оплотипов, чтобы можно было по соотношению правильных/неправильных ответов построить психометрические функции в диапазоне от уровня случайного угадывания до 100% правильных ответов. Для каждой точки психометрической функции получали 40–100 ответов; конкретное число предъявлений стимула зависело от утомляемости испытуемого и степени повторяемости результатов.

В опытах участвовало десять испытуемых в возрасте от 18 лет до 61 года (шестеро из них были студентами 18–25 лет) с нормальной или корригируемой рефракцией оптического аппарата глаз. Измерения проводили в условиях оптимальной оптической коррекции. Поскольку сбор данных занимал довольно много времени, тестирование проводили в условиях бинокулярного наблюдения стимулов, чтобы избежать неудобств, связанных с использованием заслонки для глаза, не участвующего в тестировании.

Измерение остроты зрения с использованием компьютерной программы. Для ускорения и автоматизации процедуры оценки остроты зрения с применением вышеописанных оплотипов, а также для исключения возможного влияния экспериментатора была разработана тестовая интерактивная компьютерная программа, которая предусматривала предъявление одиночных знаков из заданных наборов стимулов с шагом изменения размера около 10%. Испытуемый сообщал свой ответ, используя две или четыре клавиши беспроводной клавиатуры. Оценка остроты зрения проводили по критическому уровню правильных ответов, 95% для трехполосных стимулов (у которых уровень случайного угадывания составляет 50%) и 90%

для знаков Е (у которых уровень случайного угадывания составляет 25%). Стимулы генерировали на экране монитора с размером пикселей 0.18 мм при яркости 100 кд/м². Расстояние наблюдения было равно 6 м; оно было больше, чем в первой серии опытов, так как размер наименьших знаков, удовлетворительно воспроизводимых на данном экране, существенно больше, чем на печатных таблицах.

В экспериментах приняли участие 20 испытуемых мужского пола и 21 – женского, возрастной состав которых был: 13 человек от 20 до 40 лет, 16 – от 40 до 60 лет и 12 человек старше 60 лет. Оценку остроты зрения проводили отдельно для каждого глаза; всего было получено 79 × 3 значений, так как у трех испытуемых был протестирован только один глаз. Непосредственно перед началом тестирования у всех испытуемых измеряли рефракцию, и при необходимости использовали оптическую коррекцию. Результаты первого измерения не регистрировали, считая его обучающим.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты первой серии экспериментов представлены на рис. 4–6. Оказалось, что у разных испытуемых возможны самые различ-

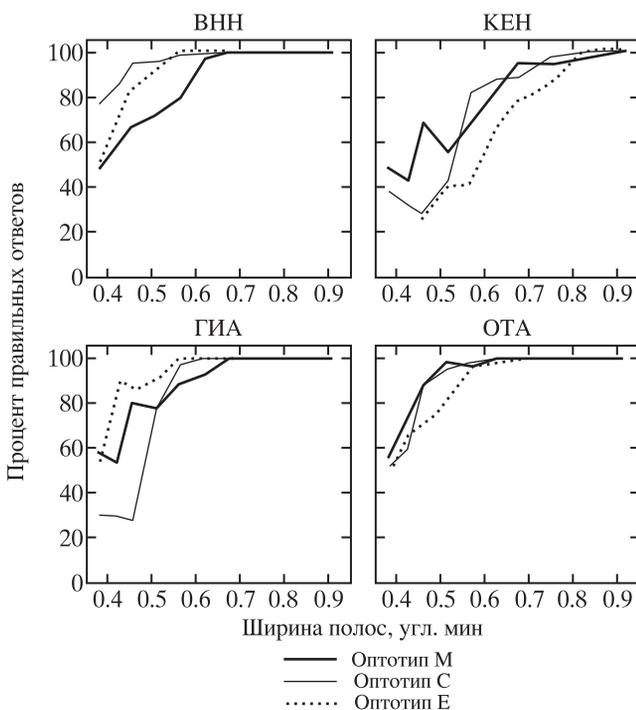


Рис. 4. Варианты взаимного расположения трех психометрических функций, полученных с использованием различных оптотипов.

Каждый из четырех графиков соответствует одному испытуемому.

ные варианты взаимного расположения психометрических функций, полученных с использованием трех оптотипов, о чем можно судить по рис. 4, где показаны тройки таких функций для четырех испытуемых. К примеру, как видно из этого рисунка, у испытуемого ВНН психометрическая кривая для оптотипа Е идет между кривыми для двух разных трехполосных оптотипов, у испытуемого ГИА эта кривая – самая верхняя, а у КЕН – самая нижняя. Для облегчения анализа на рис. 5 и 6 психометрические функции остальных шести испытуемых представлены не тройками, а парами.

На рис. 5 показаны пары психометрических функций, полученных для стандартных и модифицированных трехполосных стимулов, а на рис. 6 – аналогичные пары функций для знаков Е и стандартных трехполосных стимулов. На всех графиках по абсциссе отложен размер наименьших деталей (ширина линий у оптотипов в угловых минутах), по ординате – процент правильно узнавания стимулов.

Как видно из рис. 5, взаимное расположение психометрических функций для стандартных и модифицированных трехполосных стимулов у разных испытуемых радикально различается: при одних и тех же размерах наименьших деталей у одних испытуемых процент правильных ответов всегда больше для стандартных стимулов, у других – для модифицированных, а у третьих две психометрические функции очень близки – они идут как бы переплетаясь. Другими словами, одним испытуемым было легче различать стандартные стимулы, другим – модифицированные, а для третьих эти стимулы оказались эквивалентными по трудности. Таким образом, явно выраженной однозначной зависимости результатов от формы стимула в этих экспериментах мы не обнаружили.

Испытуемые БАЕ и ДДВ, результаты тестирования которых показаны на верхних графиках рис. 5, продемонстрировали ожидаемое завышение остроты зрения за счет использования низкочастотных спектральных составляющих стандартных стимулов: при уменьшении размеров кривые вероятности распознавания медленнее приближались к уровню случайного угадывания, чем в случае модифицированных стимулов.

На двух средних графиках рис. 5, построенных для испытуемых РСИ и ТАП, помимо принципиально иного взаимного расположения двух психометрических функций, обращает на себя внимание их парадоксальное поведение в случае стандартных трехполосных стимулов:

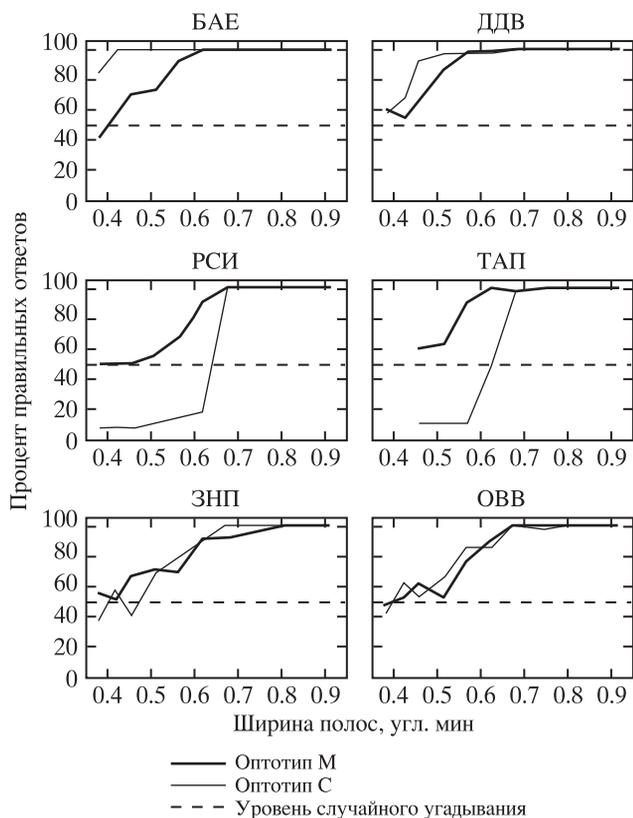


Рис. 5. Пары психометрических функций, полученные для шести испытуемых с использованием стандартных и модифицированных трехполосных стимулов.

эти кривые опускаются ниже уровня случайного угадывания. Для выбора из двух возможностей уровень случайного угадывания соответствует 50% правильных ответов, а у испытуемых РСИ и ТАП при уменьшении размера стандартных трехполосных стимулов процент правильного узнавания становился существенно ниже этого уровня (10% или меньше), т.е. правильное узнавание заменялось не на случайное угадывание, а на инверсию ответов – испытуемые с большой вероятностью называли неправильный ответ. На первый взгляд такое поведение кажется невозможным, но оно становится объяснимым, если связать его с особенностями восприятия данных стимулов, когда их размеры приближаются к пороговым. Вернемся к рис. 2, где показано, в какие расплывчатые пятна превращаются нейронные изображения всех использованных нами тестовых стимулов на пределе разрешения. Видно, что стандартный оптотип с вертикальными линиями начинает выглядеть как овальное пятно, вытянутое по горизонтали, и наоборот, оптотип с горизонтальными линиями – как пятно, вытянутое по вертикали (рис. 2, б). Это вводит часть испытуемых в заблуждение – они ошибоч-

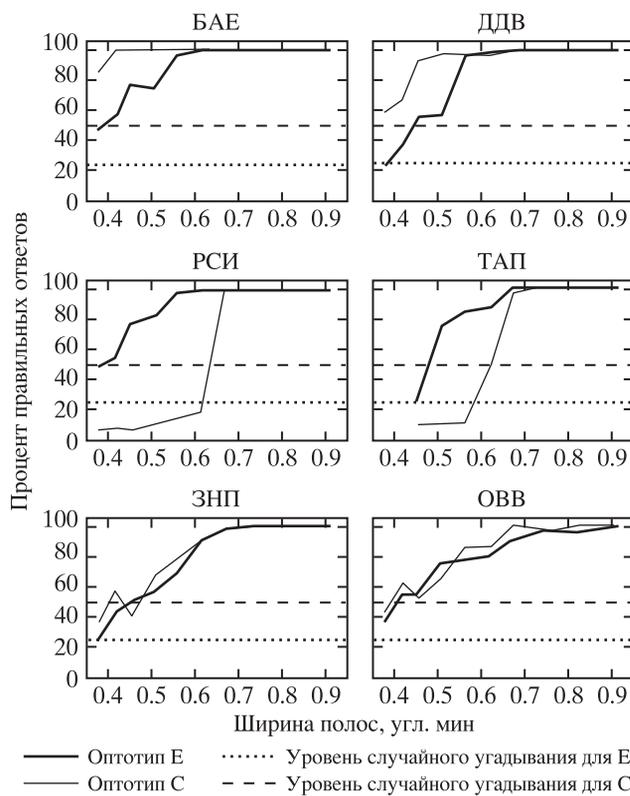


Рис. 6. То же, что и рис. 5, но для стандартных трехполосных стимулов и знаков Е.

но связывают ориентацию полос с ориентацией овальных пятен.

В случае модифицированных оптотипов такие ошибки исключены, так как на пределе разрешения эти оптотипы выглядят как пятна, имеющие практически одинаковые размеры по горизонтали и вертикали (рис. 2, в). Изображения околороговых знаков Е (рис. 2, а) комментировать труднее, поэтому мы воздержимся от попыток связать их особенности с видом психометрических функций для знаков Е, приведенных на рис. 6.

Сравнивая рис. 6 с рис. 5, отметим только наличие корреляции в группировке наших испытуемых по сходству взаимного расположения психометрических функций на графиках, указывающей на то, что способность (или склонность) испытуемого использовать (или игнорировать) низкочастотные составляющие разностных спектров может схожим образом проявляться при различии разных пар стимулов. Так, на обоих рисунках две психометрические функции оказались очень близкими между собой у одних и тех же испытуемых (ЗНП и ОВВ), что может свидетельствовать об игнорировании низких частот.

Значения остроты зрения, вычисленные для десяти испытуемых по результатам анализа психометрических функций, полученных при использовании знаков Е, а также стандартных (С) и модифицированных (М) трехполосных стимулов.

Тест	Испытуемые										<i>m</i>	Δ
	БАЕ	ВНН	ГИА	ДДВ	ЗНП	КЕН	ОВВ	ОТА	РСИ	ТАП		
Е	1.91	2.24	2.07	1.84	1.69	1.42	1.60	1.95	2.03	1.84	1.86	0.82
С	2.54	2.29	1.83	2.22	1.63	1.45	1.57	2.11	1.50	1.50	1.86	1.09
М	1.79	1.68	1.69	1.89	1.62	1.54	1.61	2.12	1.61	1.77	1.73	0.58

Можно предположить, что выявленные различия между испытуемыми должны приводить к увеличению вариабельности значений остроты зрения, получаемых при использовании знаков

Е и стандартных трехполосных оптоотипов, по сравнению со случаем модифицированных трехполосных стимулов. Для проверки этого предположения мы оценили значения остроты зрения по полученным психометрическим функциям, ориентируясь на точки пересечения этих функций линиями, соответствующими вероятности узнавания 0.9 для трехполосных стимулов и 0.8 (0.9²) для знаков Е. Эти результаты приведены в таблице.

Цифровые строки этой таблицы содержат индивидуальные и средние (*m*) оценки остроты зрения, вычисленные для десяти испытуемых по результатам анализа психометрических функций для трех сравниваемых оптоотипов. Сопоставляя приведенные данные, можно видеть, что различия между значениями остроты зрения, полученными с использованием разных оптоотипов, варьируют как по величине, так и по знаку. Последний столбец показывает, что в случае модифицированных трехполосных стимулов разброс оценок (Δ), действительно, меньше, чем в случае стандартных трехполосных стимулов и знаков Е. Конечно, эти данные можно рассматривать только как предварительные, поскольку число испытуемых было невелико.

Для получения более достоверных данных относительно разброса значений остроты зрения при использовании разных оптоотипов мы провели вторую серию экспериментов, в которой число испытуемых было больше, а измерительная процедура была приближена к практике. В этой серии экспериментов остроту зрения оценивали не на основе психометрических кривых, а по размерам наименьших оптоотипов из готового набора, обеспечивающих некоторый высокий уровень их различения. На рис. 7 приведены гистограммы показателей остроты зрения, полученных при помощи компьютерной тестовой программы с использованием трех выбранных оптоотипов. Каждая гистограмма включает данные 79 измерений. Хотя полученных данных еще слишком мало для окончательных выводов, различия между гисто-

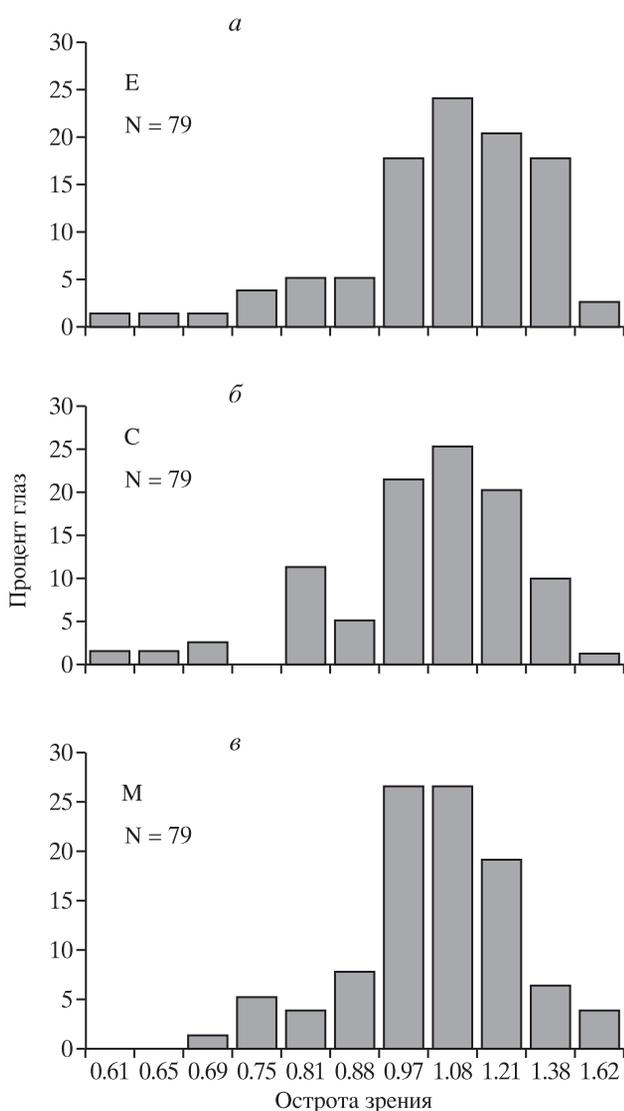


Рис. 7. Гистограммы показателей остроты зрения, полученных с использованием трех выбранных оптоотипов: знаков Е в четырех ориентациях (а), стандартных трехполосных стимулов (б) и модифицированных трехполосных стимулов (в).

граммами согласуются с предсказаниями теоретического анализа и результатами первой серии экспериментов.

Как видно из рис. 7, модифицированный трехполосный оптотип обеспечивает наименьший разброс оценок. Кроме того, более сложная форма гистограмм, относящихся к стандартному трехполосному оптотипу и знаку Е, может отражать влияние большего числа факторов на распознавание стимулов. Однако для полной уверенности в существовании этих особенностей необходимо большее число данных.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение результатов проведенных нами измерений остроты зрения у одних и тех же испытуемых с использованием трех различных наборов оптотипов выявило значительную вариабельность соотношения полученных показателей, причем оказалось, что для одних и тех же пар сравниваемых стимулов знаки разности показателей у разных испытуемых могут быть противоположными. Это означает, что особенности восприятия исследованных нами оптотипов нельзя объяснить при помощи единой для всех испытуемых модели. Вернее, если строить единую для всех схему переработки входных сигналов, в ней придется предусмотреть регулировку связей низкочастотных и высокочастотных каналов с блоком принятия решений под влиянием индивидуального опыта и других факторов. Чтобы избежать необходимости учитывать эти привходящие обстоятельства при измерении остроты зрения, желательно выбирать тестовые стимулы, различение которых определяется только работой высокочастотных каналов.

В связи с этим нам представляется, что термин “острота зрения” целесообразно оставить только для характеристики разрешающей способности – различения синусоидальных решеток или элементов Габора и таких стимулов, различимость которых в основном определяется частотами, близкими к характеристическим. В остальных же случаях, когда различение оптотипов может определяться богатым набором признаков и соответствующих способностей человека, лучше просто указывать пороговые размеры для конкретных знаков.

Для того чтобы результаты измерений остроты зрения можно было использовать для мониторинга развития зрительных функций и для ранней диагностики – выявления первых небольших

отклонений от нормы, желательно иметь универсальные оптотипы, пригодные для испытуемых практически любого возраста и культурного уровня. В свое время именно из таких соображений и были сделаны тестовые таблицы со стилизованными знаками Е (Taylor, 1978). Однако, как показало настоящее исследование, эти оптотипы уступают нашим модифицированным трехполосным стимулам из-за более значительной индивидуальной вариабельности влияния низкочастотных составляющих их спектра Фурье. Эта вариабельность может осложнить установление возрастных нормативных показателей и адекватную интерпретацию индивидуальных отклонений от принятых норм.

В то же время комплект из четырех знаков Е разной ориентации может оказаться лучше, чем комплект из двух трехполосных стимулов, в связи с тем, что четыре знака требуют меньшего числа предъявлений для достижения заданного уровня значимости результатов. Поскольку для рутинных обследований очень важна быстрота получения результата, необходимое число предъявлений – один из ключевых моментов. Однако время, затрачиваемое на измерение, зависит не только от числа предъявлений, но и от скорости реакций испытуемых, а в этом отношении, опять-таки, преимущество может оказаться на стороне модифицированных трехполосных стимулов.

Обсуждая перспективность использования различных оптотипов в более широком плане, следует упомянуть и технические аспекты. В современных условиях для проведения достаточно массовых измерений остроты зрения, необходимых для получения надежных возрастных нормативов и мониторинга, можно использовать как печатные таблицы, так и тестовые интерактивные компьютерные программы. Поэтому желательно, чтобы оптотипы были легко тиражируемыми полиграфическими методами в виде таблиц и хорошо воспроизводимыми на экране монитора без необходимости его калибровки.

С этой точки зрения внедрение в практику модифицированных трехполосных стимулов представляется весьма рациональным. Эти стимулы, с одной стороны, различаются, в основном, составляющими, частоты которых близки к F_c , и в этом смысле они близки к габоровским стимулам. С другой стороны, будучи двухградационными, они легко воспроизводятся.

Следует отметить, что кольцо Ландольта, утвержденное в качестве международного стан-

дарта, не относится к числу легко тиражируемых опто типов. Хотя этот стимул двухградационный, при малых размерах кольца удовлетворительное воспроизведение его криволинейных контуров затруднено даже при печати на бумажных и пленочных носителях, а генерация на экране монитора еще более проблематична из-за сравнительно больших размеров пикселей. Кроме того, как уже подчеркивалось в целом ряде упомянутых выше работ, в определении ориентации колец Ландольта значительный вклад могут вносить низкочастотные составляющие спектров Фурье. Это обстоятельство может отрицательно сказываться не только на установлении нормативов, но и на возможности точно определять соотношения показателей при сравнении различных опто типов со стандартным (ISO 8597). По-видимому, назрел вопрос о смене международного стандартного опто типа.

Авторы выражают благодарность программисту А.П. Терехину, Т.В. Адамович, Е.В. Тимохиной, И.А. Гребенниковой, Н.П. Забалуевой, Е.Н. Крутцовой, а также всем испытуемым.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОНИТ РАН 2011 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондарко В.М., Семенов Л.А.* Острота зрения и краунинг-эффект у школьников 8–17 лет // Физиология человека. 2005. Т. 31. № 5. С. 44–51.
- Бондарко В.М., Данилова М.В., Красильников Н.Н., Леушина Л.И., Невская А.А., Шелепин Ю.Е.* Пространственное зрение. СПб.: Наука, 1999. 218 с.
- Волков В.В., Колесникова Л.И., Макулов В.Б.* Новые буквенные тесты для измерения остроты зрения // Офтальмол. журн. 1987. № 5. С. 294–296.
- Коскин С.А.* Система определения остроты зрения в целях врачебной экспертизы. Автореф. дис. ... докт. мед. наук. СПб.: ВМА, 2009. 47 с.
- Лебедев Д.С., Белозеров А.Е., Рожкова Г.И.* Опто типы для точной оценки остроты зрения. Решение о выдаче пат. на изобрет. Заявитель: Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН; № 2010146806; заявл. 07.12.10.
- Проскурина О.В., Розенблюм Ю.З., Бершанский М.И.* Таблица для исследования остроты зрения у детей // Вестн. офтальмол. 1998. Т. 114. № 3. С. 43–45.
- Росляков В.А.* Новые таблицы для измерения остроты зрения (Комментарий к Первому международному стандарту и его реализации) // Русский офтальмол. журн. 2001. № 1. С. 36–38.
- Шелепин Ю.Е., Колесникова Л.Н., Левкович Ю.И.* Визоконтрастометрия. Л.: Наука, 1985. 103 с.
- Шелепин Ю.Е., Глезер В.Д., Бондарко В.М., Павловская М.Б., Вол И.А., Данилов Ю.П.* Пространственное зрение // Физиология зрения / Под ред. А.Л. Бызова. М.: Наука, 1992. С. 528–585.
- Alexander K.R., Xie W., Derlacki D.L.* Spatial-frequency characteristics of letter identification // J. Opt. Soc. Am. 1994. V. 11. P. 2373.
- Anderson R.S., Evans D.W., Thibos L.N.* Effect of window size on detection acuity and resolution acuity for sinusoidal gratings in central and peripheral vision // J. Opt. Soc. Am. A 1996. V. 13. P. 697–706.
- Anderson R.S., Thibos L.N.* The relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision // JOSA. 1999a. V. 16. P. 2321–2333.
- Anderson R.S., Thibos L.N.* Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision // JOSA. 1999b. V. 16. P. 2334–2342.
- Bennett A.J.* Ophthalmic test types // Br. J. Physiol. Opt. 1965. V. 22. P. 238–271.
- Bondarko V.M., Danilova M.V.* What spatial frequency do we use to detect the orientation of a Landolt C? // Vision Res. 1997. V. 37. P. 2153–2576.
- Brown N.A.P., Sparrow J.M., Shun-Shin G.A., Franklin S.L.* The acuityscope: a resolution test target projection ophthalmoscope // Int. Ophthalmol. 1991. V. 15. P. 139–142.
- Chung S.T.L., Legge G.E., Tjan B.S.* Spatial-frequency characteristics of letter identification in central and peripheral vision // Vision Res. 2002. V. 42. P. 2137–2152.
- Colenbrander A.* Measuring Vision and Vision Loss // Duane's Clinical Ophthalmology. Philadelphia: Lippincott, 2001. 15th edition. V. 5. Ch. 51.
- Fern K.D., Manny R.E.* Visual acuity of the preschool child: A review // Am. J. Optom. Physiol. Opt. 1986. V. 63. № 5. P. 319–345.
- Graf M., Becker R.* Determining visual acuity with LH symbols and Landolt rings // Klin. Monatsbl. Augenheilkd. 1999. B. 215 (2). S. 86–90.
- Hyvarinen L., Nasanen R., Laurinen P.* New visual acuity tests for pre-school children // Acta Ophthalmologica. 1980. V. 58. P. 507.
- ISO 8596. International Standard.* Ophthalmic optics. Visual acuity testing. Standard optotype and its presentation. Geneva, 1994. (2nd edition: Geneva, 2009).
- ISO 8597. International Standard.* Optics and optical instruments. Visual acuity testing. Method of correlating optotypes. Geneva, 1994.
- Koskin S.A., Harauzov A., Boiko E.V.* Objective measurements of visual acuity // Perception. 2006. V. 35. Suppl. P. 230–231.

- Kniestedt C., Stamper R.L.* Visual acuity and its measurement // *Ophthalmol. Clin. N. Am.* 2003. V. 16. P. 155–170.
- Landolt E.* Tabellen d'optotypes pur la determination de l'acuite visuelle // *Arch. Soc. Franc. d'ophthalm.* 1899. P. 157–166.
- Lindstedt E.* Manual BUST-D, a vision test for the young child and/or handicapped child/adult. Stockholm: Elysin, 1988.
- Linksz A.* The development of visual standards: Snellen, Jaeger and Giraud-Teulon // *Bull. N.Y. Acad. Med.* 1975. V. 51. No 2. P. 277–285.
- Majaj N.J., Pelli D.G., Kurshan P., Palomares M.* The role of spatial frequency channels in letter identification // *Vision Res.* 2002. V. 42. P. 1165–1184.
- Oppel O. von.* Uber die Entwicklung der Sehscharfe bei Kindern im Vorschulalter // *Klin. Monatsbl. Augenheilkd.* 1964. B. 145. S. 359–371.
- Rosenfield M., Logan N., Edwards K.* Optometry: Science, Techniques, and Clinical Management. 2nd edition. Edinburgh: Elsevier Ltd., 2009. 530 p.
- Taylor H.R.* Applying new design principles to the construction of an illiterate E chart // *Am. J. Optom. Physiol. Opt.* 1978. V. 55. № 5. P. 348–351.
- Schmidt P.P.* Allen figure and broken wheel visual acuity measurement in preschool children // *J. Am. Optom. Assoc.* 1992. V. 63. № 2. P. 124–130.
- Sloan L.L.* New test charts for the measurement of visual acuity // *Am. J. Ophthalmol.* 1959. V. 48. P. 807–813.
- Snellen E.* Echelle typographique pour mesurer l'acuite de la vision. Utrecht. 1862.
- Solomon J.A., Pelli D.G.* The visual filter mediating letter identification // *Nature.* 1994. V. 369. P. 395–397.
- Stiers P., Vanderkelen R., Vandebussche E.* Optotype and grating visual acuity in preschool children // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2003. V. 44. P. 4123–4130.
- Stiers P., Vanderkelen R., Vandebussche E.* Optotype and grating visual acuity in patients with ocular and cerebral visual impairment // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2004. V. 45. P. 4333–4339.
- USAF-1951.* United States Air Force 3-bar resolution test chart.
- Watson A.B., Ahumada A.J., Jr.* A standard model for foveal detection of spatial contrast // *J. Vision.* 2005. V. 5. № 9. P. 717–740.
- Williams M.A., Moutray T.N., Jackson A.J.* Uniformity of visual acuity measures in published studies // *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2008. V. 49. P. 4321–4327.

Visual acuity measurement: uncertain effect of the low-frequency components of the optotype fourier spectra

G. I. Rozhkova, A. E. Belozerov, D. S. Lebedev

*Institute for Information Transmission Problems, RAS
127994, GSP-4, Moscow, 19, B. Karetny per.*

The three simple optotypes – tumbling-E, standard 3-bar resolution target and specially modified 3-bar target – were used to estimate the effect of the low-frequency Fourier spectrum components on the results of visual acuity measurements. The subject's task was to determine the stimulus orientation in conditions of forced choice. The optotypes chosen for the investigation were similar in shape but had specific distinctions as concerned their Fourier-spectra. In the first series of experiments, ten subjects were tested repeatedly by means of the charts with appropriate stimuli and the results were used to obtain individual psychometric functions. In the second series of experiments, the interactive software was employed to measure visual acuity in a larger number of subjects and to construct the histograms of the visual acuity values for the three optotypes. It was found that, in different subjects, the low-frequency spectral components could exert principally different effects on stimulus discrimination near the threshold: these components facilitated discrimination in one group of subjects, made it more difficult in the other group, and had no effect at all in the third group. Some clear conclusions about the individual variability and uncertainty of the effects caused by the low-frequency components could be drawn owing to a favorable property of our modified 3-bar stimuli: they could be treated as specific references since, in their difference spectra, the low-frequency components were almost absent.

Key words: human vision, optometry, visual acuity, optotype, difference Fourier spectrum, low-frequency components, individual variability.