

УДК 612.843.631 + 612.844.21

ОЦЕНКА ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ ОСТРОТЫ ЗРЕНИЯ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕСТИРОВАНИЯ

© 2022 г. А. В. Белокопытов^{1,*}, Г. И. Рожкова¹, М. А. Грачева¹

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

*E-mail: abelokopytov@gmail.com

Поступила в редакцию 02.09.2021 г.

После доработки 14.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Оценка периферической остроты зрения (ОЗ) связана с необходимостью раздваивать внимание между фовеальным фиксационным стимулом и периферическим тестовым стимулом. Одним из подходов к исключению задачи центральной фиксации является создание искусственной центральной скотомы при помощи контактной линзы с имплантированным окклюдером (диаметром 4–5 мм). Применяя этот подход, мы измерили периферическую ОЗ у трех испытуемых в диапазоне эксцентриситетов до 60° на специально сконструированной компьютеризированной периметрической установке, используя различные оптоотипы — “кувыркающиеся-Е” и модифицированные трехполосные стимулы. Оказалось, что в условиях наших экспериментов окклюзия фиксационного стимула сама по себе не привела к ожидаемому увеличению ОЗ, вероятно потому, что эффект инструкции “смотреть прямо перед собой” аналогичен эффекту инструкции “фиксировать видимый фовеальный стимул”. Более того, можно предполагать, что контактная линза с окклюдером оказывает негативное влияние из-за затенения периферического тестового стимула в случаях неконтролируемого произвольного уменьшения диаметра зрачка, приводящего к значительному увеличению слепой зоны. У всех испытуемых значения периферической ОЗ оказались несколько выше для модифицированных трехполосных оптоотипов, измеряющих “остроту разрешения”, чем для “кувыркающихся-Е”, измеряющих “остроту распознавания”. Межиндивидуальная изменчивость данных оказалась больше при меньших значениях эксцентриситета.

Ключевые слова: периферическое зрение, оптоотипы, острота зрения, острота разрешения, острота распознавания, контактная линза с окклюдером, межиндивидуальные различия

DOI: 10.31857/S0235009222010024

ВВЕДЕНИЕ

Оценке остроты зрения (ОЗ) человека посвящено огромное число публикаций, но в подавляющем большинстве экспериментальных и клинических работ исследования касались только центрального зрения, точнее — фовеального, т.е. они относились к области поля зрения диаметром порядка 5°, составляющей лишь незначительную его часть. В то же время периферическое зрение играет в жизни человека не меньшую роль, и необходимость оценки его возможностей в последние годы становится все актуальнее. Это связано с тем, что во всех цивилизованных странах растет число людей пожилого возраста, у которых одной из самых распространенных глазных болезней является возрастная макулярная дегенерация (ВМД/AMD: age-related macular degeneration), число случаев которой к 2020 г. прогнозировалось на уровне 200 млн человек (Wong et al., 2014). Это заболевание ведет к затруднению привычной еже-

дневной зрительной активности — чтения, работы с компьютером, просмотра телепередач, к невозможности вождения автомобиля и общему снижению качества жизни (Williams et al., 1998; Hassell et al., 2006), ВМД также вызывает депрессию (Augustin et al., 2007). Очевидно, что такая тревожная ситуация с центральным зрением заставляет обратить большее внимание на исследование возможностей периферического зрения в плане частичной компенсации утрачиваемых функций макулярной сетчатки.

Исследования периферического зрения и, в частности, его разрешающей способности, определяющей точность возможного анализа сетчаточных изображений, немногочисленны (Wertheim, 1894; 1980; Low, 1943; 1946a; 1946b; 1951; Anderson et al., 1996; Anderson, Thibos, 1999a; 1999b), хотя видимая человеком картина окружения обычно занимает все поле зрения, имеющее протяженность более 180° по горизонтальному мери-

диану и около 100° по вертикальному. Такая ситуация может показаться странной, однако специалисты хорошо знают, что она связана с многочисленными психофизиологическими и техническими сложностями проведения экспериментов по исследованию восприятия зрительных стимулов на периферии поля зрения. Эти специфические сложности затрудняют получение надежных данных и проведение массовых измерений. Основные трудности объясняются тем, что для исследования периферического зрения приходится менять привычный режим работы зрительной системы, при котором в естественных условиях зрительного восприятия центральные (фовеальные) и периферические механизмы зрения выполняют несколько разные функции и динамически взаимодействуют, дополняя друг друга для решения общих задач (Stewart, 2020).

Среди первых систематических исследований периферической ОЗ наиболее авторитетной и фундаментальной считается работа Вертхайма (Wertheim, 1894; 1980). Краткое резюме статьи Вертхайма приведено в обзоре (Рожкова и др., 2019). После пионерской работы Вертхайма, включающей измерения только для левого глаза автора, но в широком диапазоне эксцентриситетов (от 55° по горизонтальному меридиану в назальной половине поля зрения до 70° в темпоральной половине; по вертикальному меридиану – до 40° вверх и вниз), лишь в 1943 г. было предпринято относительно массовое исследование периферической ОЗ, обусловленное нуждами военной авиации. Фрэнк Лоу был первым ученым, кто провел измерения периферической ОЗ у большого числа испытуемых (сто человек – 200 глаз), как в фотопических условиях наблюдения (Low, 1943), так и в скотопических условиях (Low, 1946a). Интересно, что данные Вертхайма оказались близки к средним значениям, вычисленным Лоу. Как и Вертхайм, Лоу отметил влияние тренировки на измерения периферической ОЗ: уже при втором измерении значения оказались выше, чем при первом. Изучению этого эффекта Лоу посвятил специальную серию экспериментов (Low, 1946b). В обзоре исследований периферической ОЗ, выполненных до 1950 г., Лоу подытожил свои результаты и дал глубокий анализ работ других авторов (Low, 1951).

После работ Лоу 1940-х годов, в которых использовалась очень простая аппаратура, масштабных исследований периферической ОЗ, по-видимому, не предпринималось. В отдельных проводимых исследованиях авторы сильно усложняли экспериментальные установки, что не позволяло провести измерения на большом количестве испытуемых. Например, в работе (Johnson, Leibowitz, 1979) оценка периферической ОЗ была проведена только у четырех испытуемых.

Возросшие технические возможности позволили изучать периферическое зрение при движении стимулов, и ввести понятия статической (SVA – Static Visual Acuity) и динамической (DVA – Dynamic Visual Acuity) ОЗ. Подробный анализ отличий DVA от SVA на зрительной периферии дан в диссертации (Holland, 2000).

В других основательных работах Андерсон и соав. (Anderson et al., 1996; Anderson, Thibos, 1999a, b) оценивали периферическую ОЗ с использованием тестовых стимулов разной формы – синусоидальных решеток, трехполосных стимулов и “кувыркающихся E”. Сравнивали значения периферической ОЗ, получаемые при оценке обнаружения, разрешения и распознавания стимулов, но все измерения были проведены только для двух испытуемых.

Изучение периферической оптики глаза показывает, что она обеспечивает хорошее качество фокусировки на периферии, поэтому периферическая ОЗ не ограничивается оптикой глаза, а определяется плотностью фоторецепторов и нейронными механизмами (см. обзор Strasburger, 2011).

Хорошо известно, что обычно зрительная сенсорная система функционирует в тесном взаимодействии с глазодвигательной системой, которая обеспечивает фовеацию – наведение взора на объекты, представляющие потенциальный интерес, и последовательный анализ всего поля зрения за счет перевода взора с одной области рассматриваемой сцены на другую. Очевидно, что при этом каждый поворот глаза должен соответствовать исходному эксцентриситету очередного объекта внимания и должен приводить к попаданию изображения объекта в фовеа, т.е. к обнулению эксцентриситета. В то же время для оценки периферической ОЗ необходимо обеспечить сохранение эксцентриситета периферического тестового стимула в течение всего времени его анализа, что требует от испытуемого определенных усилий. Для сохранения эксцентриситета предъявляемого периферического тестового стимула испытуемого обычно заставляют воспринимать этот стимул в условиях вынужденной фиксации взора на вспомогательном фовеальном стимуле. Таким образом, при оценке периферической ОЗ испытуемый должен одновременно решать две зрительные задачи: удерживать взор на центральной фиксации метке и анализировать периферический тестовый стимул. Очевидно, что внимание испытуемого в этих условиях должно раздваиваться, что может оказывать негативное влияние на узнавание тестового стимула, как само по себе (из-за деления ресурсов мозговых механизмов переработки информации), так и из-за необходимости противодействовать естественному желанию повернуть глаз на анализируемый те-

стовый стимул. Большинство имеющихся данных по оценке периферической ОЗ получено именно в таких условиях (традиционная методика).

Примечательно, что одним из первых изучение возможностей периферического зрения предпринял Г. Гельмгольц, который показал, что в условиях фиксации взора на центральном стимуле человек может воспринимать текст, кратковременно освещаемый вспышкой, на периферии поля зрения (Helmholtz, 1896). При этом было отмечено, что текст удается прочитать только в тех случаях, когда человек умственным усилием концентрирует свое внимание именно на месте предъявления периферического текста. Из этих опытов Гельмгольц сделал вывод, что существует механизм пространственного перемещения внимания независимо от движения глаз.

С 1960-х годов в ряде исследований периферического зрения делается акцент на раздвоение внимания в обычных условиях тестирования. Соответственно, появилась целая ветвь психологии, использующая специфику периферического зрения для изучения механизмов внимания. Например, в работе (Jeneou, 2018) на основе оценки периферической ОЗ была сделана попытка исследовать влияние сотрясения мозга на механизмы раздвоения внимания. Было обследовано 22 хоккеиста, связи обнаружено не было.

В середине прошлого века была предложена принципиально иная парадигма для исследования периферического зрения, не подразумевающая разделения внимания: она заключалась в блокировании информации, поступающей из центра поля зрения, при помощи окклюдера (Riggs, Schick, 1968; Ярбус, Рожкова, 1977), т.е. как бы в создании искусственной центральной скотомы. В работе (Riggs, Schick, 1968) авторы использовали в качестве окклюдера имплантированное внутрь склеральной линзы маленькое плоское зеркальце, которое также служило для записи движений глаз. В работе (Ярбус, Рожкова, 1977) на глаз испытуемого устанавливались прищипки сложной конструкции с окклюдирующими устройствами. Из-за технических трудностей реализации и/или возникающего у испытуемых дискомфорта указанные методики не нашли широкого распространения и не были использованы в опытах по оценке периферической ОЗ, требующих достаточно большого времени для проведения измерений.

Позже были предложены другие реализации идеи имитации центральной скотомы, основанные на использовании контактных линз разной конструкции (Walonker, Diddie, 1981; Foley-Fisher, Murphy, 1987; Butt et al., 2015; Almutleb et al., 2018). В частности, разрабатывался и совершенствовался метод нанесения на контактную линзу непрозрачной краски (Sivak et al., 1985; Czoski-Murray et al.,

2009; Nau, 2012; Butt et al., 2015; Iomdina et al., 2020). В ходе этих работ было установлено, что создать абсолютную центральную скотому небольшого стабильного размера (для имитации макулярной дегенерации), используя закрашивание центра линзы, трудно, так как угловой размер окклюдера должен быть больше углового размера входного зрачка, но не слишком большим (чтобы перекрывалась только макулярная область). Помимо этого, выяснилось, что постоянные флуктуации размера зрачка ведут к пульсирующим изменениям размера скотомы. В удачных попытках стабильного затемнения достаточно большой желаемой области использовали либо большие (8–12 мм) окклюдеры (Nau, 2012; Iomdina et al., 2020), либо медикаментозное сужение зрачка (Czoski-Murray et al., 2009).

Принципиально другой подход – создание виртуальной центральной скотомы бесконтактными методами. Он подразумевает использование компьютерных систем, отслеживающих движения глаз и позволяющих исключать из зрительного анализа центральную зону вокруг точки, на которую в данный момент направлен взор испытуемого, генерируя там однородное поле (Rayner, Bertera, 1979; Lingnau, 2005; Bernard et al., 2007; Marmor, Marmor, 2010; Jordan et al., 2012). При движениях глаз эта пустая зона остается неподвижной в центре сетчатки, и тем самым посредством программного исключения информации имитируется “зрение без фовеа”. Однако и эта методика не была использована для оценки ОЗ, так как подразумевает проведение измерений в условиях координации системы бесконтактной регистрации движений глаз и системы предъявления периферических стимулов. К сожалению, возможности использования этого подхода ограничены, во-первых, необходимостью работы с высокоточным оборудованием для регистрации движений глаз, которое требует соответствующей квалификации сотрудников и постоянной калибровки, а во-вторых, относительно небольшими размерами рабочей части поля зрения, границы которой определяются размерами монитора.

В настоящей статье приведены результаты оценки периферической ОЗ, полученные двумя методами: традиционным методом с фиксацией взора на фовеальном стимуле, и методом, основанным на использовании контактной линзы с центральным окклюдером (КЛ+О). Мы исследовали зависимость результатов от использованного метода, от типа тестового стимула, от эксцентриситета в поле зрения, а также оценивали индивидуальную вариабельность данных.

МЕТОДЫ

Испытуемые. В экспериментах участвовали трое испытуемых – две женщины (30 и 48 лет) и

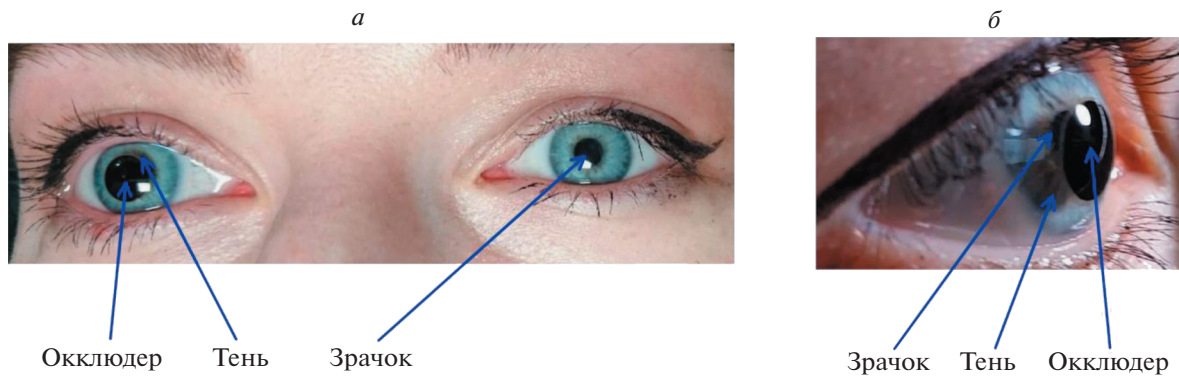


Рис. 1. Изображения глаза испытуемого с надетой контактной линзой (диаметр имплантированного окклюдера 5 мм).
а – фотография испытуемого анфас с контактной линзой на правом глазу;
б – кадр видеозаписи (вид сбоку с височной стороны), поясняющий образование тени от окклюдера на радужке.

один мужчина (19 лет). Из-за значительной продолжительности экспериментов и необходимости изготовления специальных индивидуальных контактных линз с имплантированными окклюдерами разного диаметра привлечение большего числа испытуемых в рамках данной работы не представлялось возможным. Исследование проводили с соблюдением требований Хельсинкской декларации 1975 г. Протоколы проведения экспериментов были одобрены этическим комитетом ИППИ РАН.

Контактные линзы. Индивидуальные контактные линзы с имплантированными окклюдерами диаметром 3, 4 и 5 мм были изготовлены по специальному заказу в Отделении контактной коррекции зрения ФГБУ “Национальный медицинский исследовательский центр глазных болезней имени Гельмгольца” Министерства здравоохранения Российской Федерации. В предыдущих экспериментах (Iomdina et al., 2020) мы столкнулись с эффектом децентрации (сползания) линз, поэтому изготовлению новых линз было уделено особое внимание. Геометрические характеристики линз выбраны на основе измерений глаз испытуемых. Мягкие корнеосклеральные линзы с двумя радиусами кривизны были изготовлены методом точения. Линзы не корректировали рефракцию. Окклюдер был изготовлен методом нанесения на центральную зону линзы нескольких слоев фоточувствительного красителя на основе серебра, в процессе изготовления линза засвечивалась специальной лампой, далее проводили проявление и закрепление красителя. Проверку того, что окклюдер не пропускает свет, проводили в затемненной комнате, предлагая испытуемому смотреть на яркий компактный источник света.

Фотография глаз испытуемого с контактной линзой на правом глазу приведена на рис. 1, *а*.

Судя по фотографии, окклюдер должен был полностью перекрывать невидимый правый зрачок, размер которого должен соответствовать размеру видимого зрачка левого глаза, который явно меньше окклюдера. Однако вызвала сомнение темная зона на радужке, которую можно было принять за изображение расширенного правого зрачка. Поскольку это противоречило данным физиологической оптики, мы решили уточнить ситуацию при помощи видеосъемки, освещая глаз испытуемого с разных сторон. Съемка показала, что размеры правого и левого зрачков одинаковы, а подозрительная темная зона – это тень от окклюдера на радужке (кадр видеозаписи на *б*). Видеозапись можно скачать по ссылке:

<https://github.com/abelokopytov/PeripheralAcuity/raw/main/OccluderShadow.mp4>

Окклюдер создавал полностью перекрытую центральную зону, размеры которой зависели от его диаметра и параметров глаза: кривизны роговицы, глубины передней камеры и диаметра зрачка (Iomdina et al., 2020).

Схематические изображения глаза с надетой контактной линзой и ход лучей от тест-объекта при разных значениях эксцентриситета показаны на рис. 2 для разных размеров окклюдера и зрачка. Параллельными линиями показаны пучки лучей, попадающих от периферического объекта на роговицу при соответствующих значениях эксцентриситета.

Как видно из схем левой колонки, при относительно большом диаметре окклюдера (5 мм) и типичной величине зрачка (3 мм) падающие от периферического стимула на роговицу глаза лучи, которые в отсутствие окклюдера прошли бы через зрачок, до эксцентриситета 30° практически целиком перекрываются, а затем перекрываются частично (схемы для эксцентриситетов 40, 50 и 60°). Схемы центральной колонки рис. 2 показывают, что уменьшение диаметра окклюдера с пяти

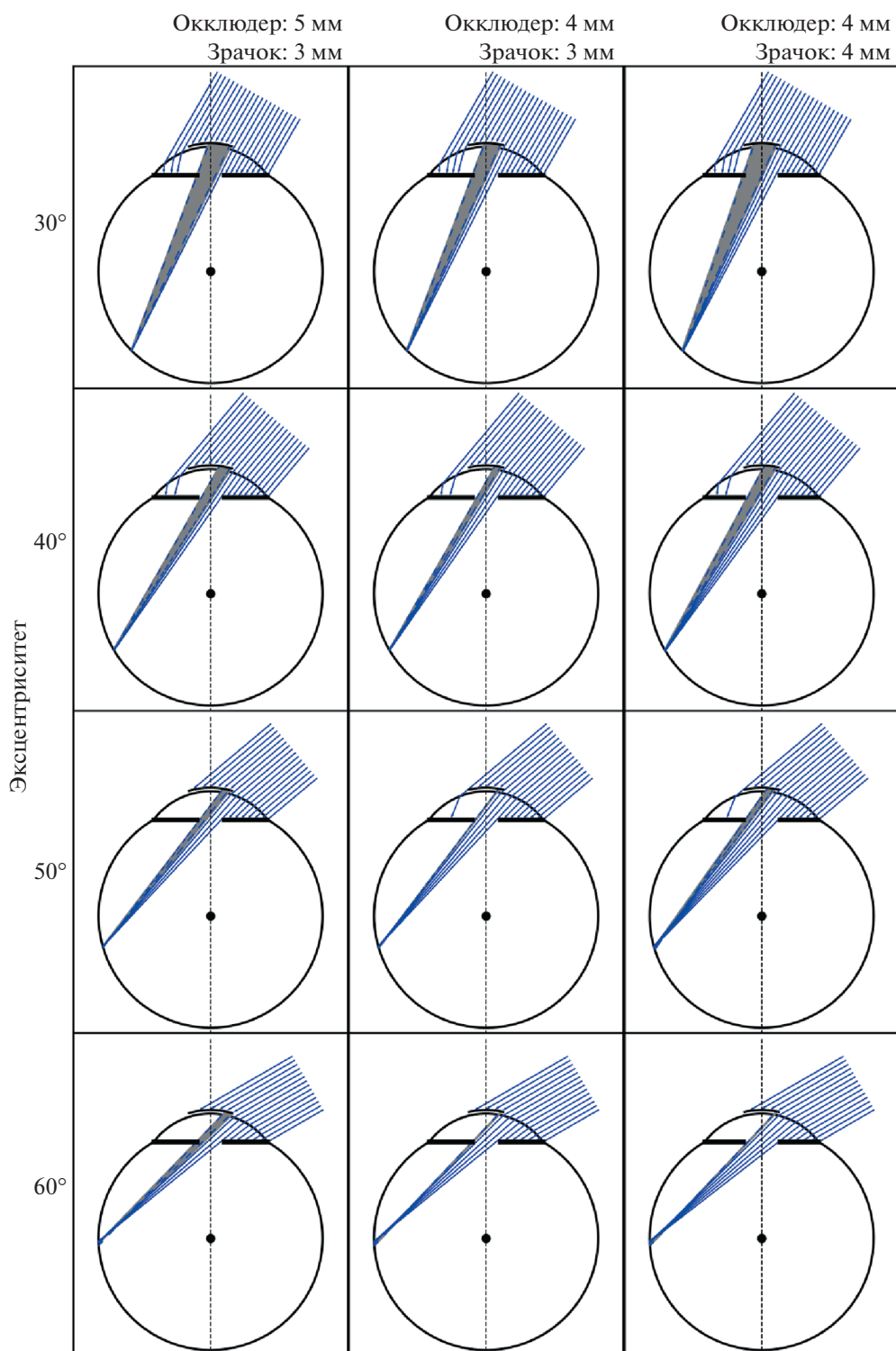


Рис. 2. Схематическая иллюстрация влияний размеров окклюдера и зрачка на световые потоки от периферических стимулов.

до четырех миллиметров приводит к существенному уменьшению перекрытия: теперь при эксцентриситете стимула 30° полного перекрытия уже нет, при эксцентриситете 40° частичное пере-

крытие значительно меньше, чем при прежнем окклюдере, а при значениях эксцентриситета 50 и 60° перекрытие совсем отсутствует. Схемы правой колонки демонстрируют влияние расшире-

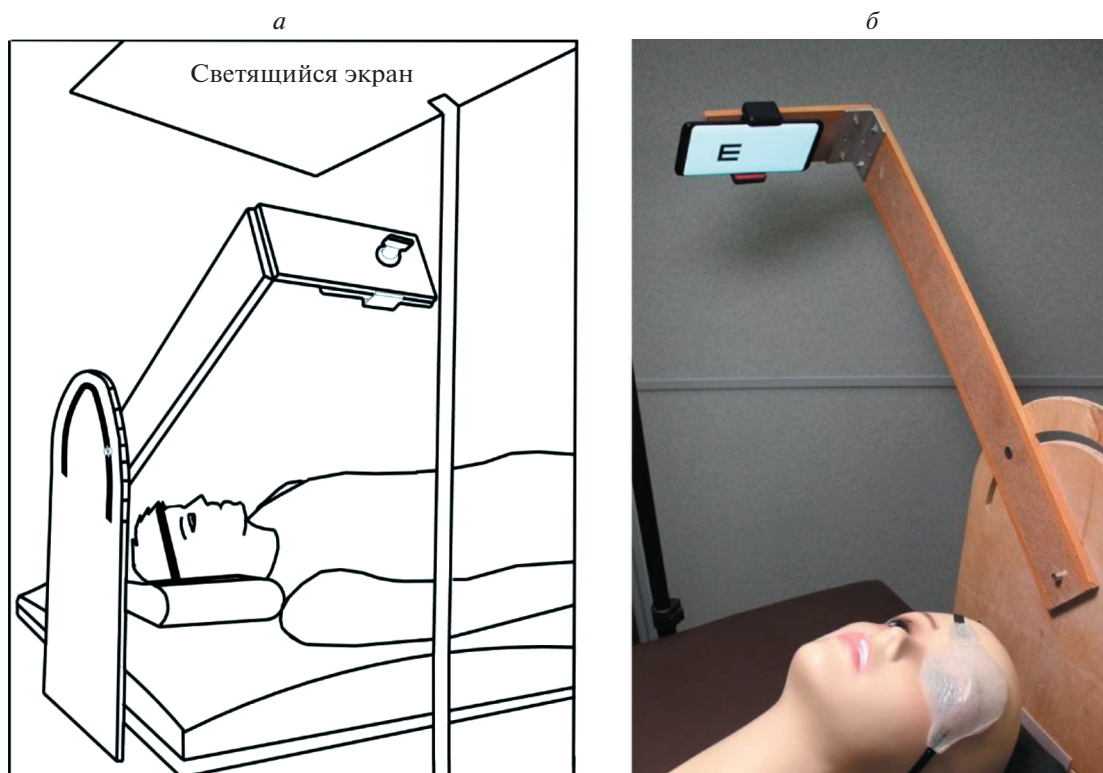


Рис. 3. Экспериментальная установка.
 а – общая схема; б – фотография с манекеном на месте испытуемого.

ния зрачка. Оно приводит к увеличению светового потока, поступающего от стимула на сетчатку, при всех значениях эксцентриситета.

Ход лучей был рассчитан в рамках простейшей модели, учитывающей преломление световых лучей только на поверхности роговицы и не учитывающей преломляющее действие хрусталика, которое для косых лучей существенно меньше, чем для параксиальных. Примечательно, что эта модель дает результаты, схожие с результатами расчетов по более сложной модели широкоугольной оптики глаза (Simpson, 2017; 2021). Разработанный нами программный код доступен по ссылке:

<https://github.com/abelokopytov/PeripheralAcuity/blob/main/eyeRays.py>.

Экспериментальная установка. Для предъявления визуальных стимулов с различным эксцентриситетом (30–40–50–60°) использовали оригинальную периметрическую установку. Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Измерения проводили в положении испытуемого лежа на спине, чтобы уменьшить вероятность сползания линзы вниз под действием силы тяжести.

Стимулы предъявлялись на смартфоне, укрепленном на специальной выносной подвижной раме. Рама могла менять положение, перемещая смартфон по дуге окружности на расстоянии 50 см от правого глаза испытуемого и меняя эксцентриситет от 0 до 90° (рис. 3, а). На рис. (3, б) для наглядности представлена фотография установки с манекеном, имитирующим испытуемого: видно тестовый стимул на смартфоне, повязку на левом глазу испытуемого.

Тестовые стимулы и программа для их предъявления. В экспериментальных сессиях использовались последовательно два набора оптоотипов (модифицированные трехполосные и “кувыркающиеся Е”) (рис. 4).



Рис. 4. Наборы тестовых стимулов, предъявляемых на смартфоне.
 а – модифицированные трехполосные оптоотипы;
 б – “кувыркающиеся Е”.

Стимулы отображались на смартфоне с использованием оригинального программного обеспечения ТИП-ТОП (сертификат № 2014619697). Испытуемый работал в парадигме вынужденного выбора (без варианта ответа “не вижу”), давая отчет устно, и его ответы регистрировались экспериментатором при помощи клавиатуры. Такая процедура позволяла минимизировать движения испытуемого и нежелательные изменения его позиции.

В ходе тестирования положение каждого следующего стимула на смартфоне смещали вверх-вниз относительно предыдущего (примерно на размер одного стимула). Такое смещение позволяло устранить влияние предыдущего стимула. При исследованиях периферического зрения это смещение дополнительно позволяет более стабильно удерживать внимание на периферическом стимуле.

Размер экрана смартфона ограничивал максимальный угловой размер тестовых стимулов и тем самым предельное значение эксцентриситета.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предварительные эксперименты. В ходе предварительных экспериментов проводили тестирование испытуемого в положении сидя. В этих условиях имеется дополнительная возможность регистрировать движения глаз и контролировать стабильность фиксации взгляда испытуемого при задаче фиксации центрального стимула.

Для записи движений глаз использовалась установка фирмы SMI модель Hi-Speed 1250. В этой установке голова испытуемого находится в проеме колонны с видеокамерой и подбородником, что ограничивает темпоральное поле зрения испытуемого вдоль горизонтального меридиана углом 45°. Для измерения периферической ОЗ программа ТИП-ТОП запускалась на ноутбуке, а оптоототипы отображались на смартфоне Samsung Galaxy S8, который был повернут на 90° по отношению к позиции на схеме рис. 3, б и установлен на расстоянии 50 см от правого глаза испытуемого с эксцентриситетом 40°. Поворот смартфона необходим для того, чтобы позиция оптоототипа на экране смартфона изменялась по вертикали, сохраняя неизменным значение эксцентриситета по горизонтальному меридиану. Программа ТИП-ТОП была модифицирована таким образом, что при смене стимула она генерировала сообщение “Up” или “Down” и передавала его в управляющую программу установки SMI.

Эксперименты с записью движений глаз показали, что в условиях такой задачи значительных саккад и смещений взгляда испытуемого не было. Это иллюстрирует рис. 5, где показан фрагмент записи движений глаз одного из испытуемых с

надетой на правый глаз КЛ+О диаметром 5 мм. Небольшие подъемы в Y-координате положения взгляда испытуемого и всплески в X-координате соответствовали его устным отчетам об ориентации оптоототипа, при которых немного менялось положение глаз по вертикали. В условиях раздвоения внимания было признано нецелесообразным заставлять испытуемого тратить ресурсы внимания на решение еще одной задачи — обозначать ориентацию оптоототипа нажатием на соответствующую кнопку на клавиатуре.

В ходе проведения предварительных экспериментов выяснилось, что при сидячем положении испытуемого эпизодически наблюдается сползание линзы по вертикали, предположительно под действием силы тяжести. Поэтому было решено проводить эксперименты в положении испытуемого лежа на спине. Это позволило минимизировать сползание контактной линзы и смещение слепой зоны. Однако, к сожалению, в таком положении было невозможно проводить регистрацию движений глаз в наших условиях.

Процедура проведения экспериментов. Периферическая ОЗ всех трех испытуемых измерялась для темпорального поля зрения правого глаза в двух сериях экспериментов.

Серия I — традиционная методика. Испытуемый правым глазом смотрел на фиксационный стимул фовеально, при этом задачей испытуемого было распознавать периферический стимул; левый глаз испытуемого был закрыт повязкой.

Серия II — использование КЛ+О. На правый глаз испытуемого надевали КЛ+О, оставляя возможность наблюдать периферические объекты, но закрывая центральную зону; левый глаз испытуемого был открыт; испытуемого просили смотреть прямо перед собой; возможность наблюдать периферический стимул левым глазом (без контактной линзы) была заблокирована при помощи небольшой заслонки, помещенной между глазами.

Оценка размеров слепой зоны. Размеры слепой зоны, создаваемой контактной линзой с имплантированным окклюдером, сильно зависели от размера зрачка. Поэтому для стабилизации размеров зрачка в экспериментах использовался равномерно засвеченный полупрозрачный рассеивающий экран (рис. 3, а), создающий высокий уровень освещенности (500 люкс). При таком уровне освещения зависимость размера зрачка от освещенности выходит на плато (Watson, 2012).

Для оценки слепой зоны, создаваемой контактной линзой с окклюдером, использовались специальные линейки со шкалами, помещаемые на поверхность засвеченного экрана в начале эксперимента.

К сожалению, точно картировать слепую зону практически невозможно. Испытуемые сообщали о нечеткой границе слепой зоны: часто окклю-

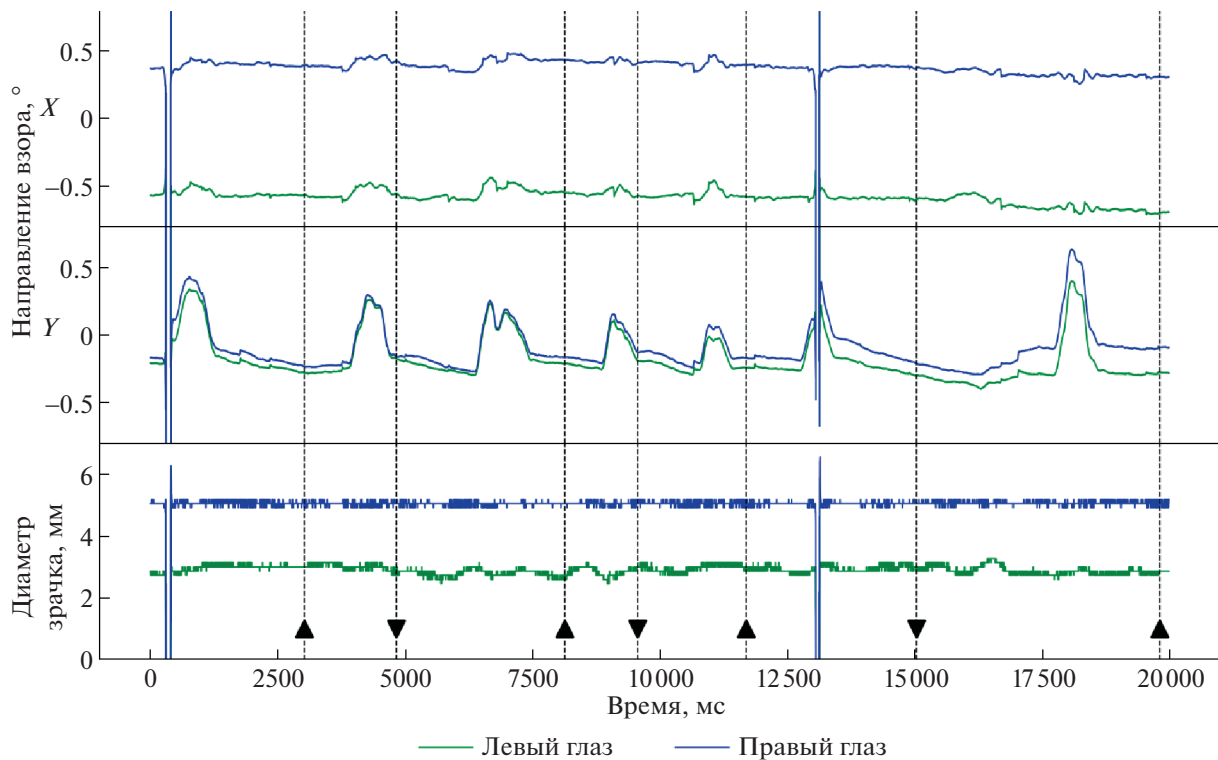


Рис. 5. Фрагмент записи движения глаз и флуктуации размера зрачков испытуемого с контактной линзой (диаметр окклюдера 5 мм) на правом глазу. Треугольниками разной ориентации показаны моменты смены стимула в программе ТИП-ТОП.

дер создавал не только зону полной слепоты, но и своеобразную “полупрозрачную” зону.

Поскольку окклюдер был фиксирован относительно глаза, его границы были стабилизированы на сетчатке, т.е. могли становиться так называемыми “энтоптическими объектами”. Это приводило к тому, что у некоторых испытуемых проявлялись феномены типа заполнения окружением (filling-in) пространства внутри слепой зоны.

Еще одним эффектом, существенно усложняющим оценку границ слепой зоны, были пульсации зрачка. Поскольку размер зрачка постоянно

флуктуирует, диаметр слепой зоны также непрерывно меняется.

Основные эксперименты. Для каждого испытуемого были получены оценки монокулярной ОЗ для близи (50 см) для периферического зрения (в диапазоне значений эксцентриситета 30–60°) и фовеального зрения (0°). Все измерения проведены на установке, описанной в разделе “Методика”, при положении испытуемого лежа на спине, что делает сопоставление фовеальных и периферических значений ОЗ корректным.

Значения фовеальной ОЗ у испытуемых существенно различались (табл. 1). В связи с этим для периферической ОЗ далее представлены как абсолютные значения (рис. 6, а), так и относительные (рис. 6, б).

Рисунок включает данные, полученные в двух разных сериях эксперимента, отличающихся условиями наблюдения тестовых стимулов. В серии I наблюдение было строго монокулярным, второй глаз был прикрыт повязкой. В серии II использовалась КЛ + О, закрывающая центральную зону зрения исследуемого глаза, а взгляд второго глаза был направлен вперед. Для обеих серий представлены данные оценки периферической ОЗ при помощи модифицированных трехполосных оптопов и оптопов “кувыркающиеся Е”.

Таблица 1. Фовеальная ОЗ для близи (50 см), измеренная в монокулярных условиях наблюдения при помощи разных оптопов. Данные для трех испытуемых

Испытуемый	ОЗ в десятичных единицах	
	по модифицированным трехполосным оптопов	по оптопам “кувыркающиеся Е”
И1	1.68	1.58
И2	0.84	0.72
И3	1.28	1.45

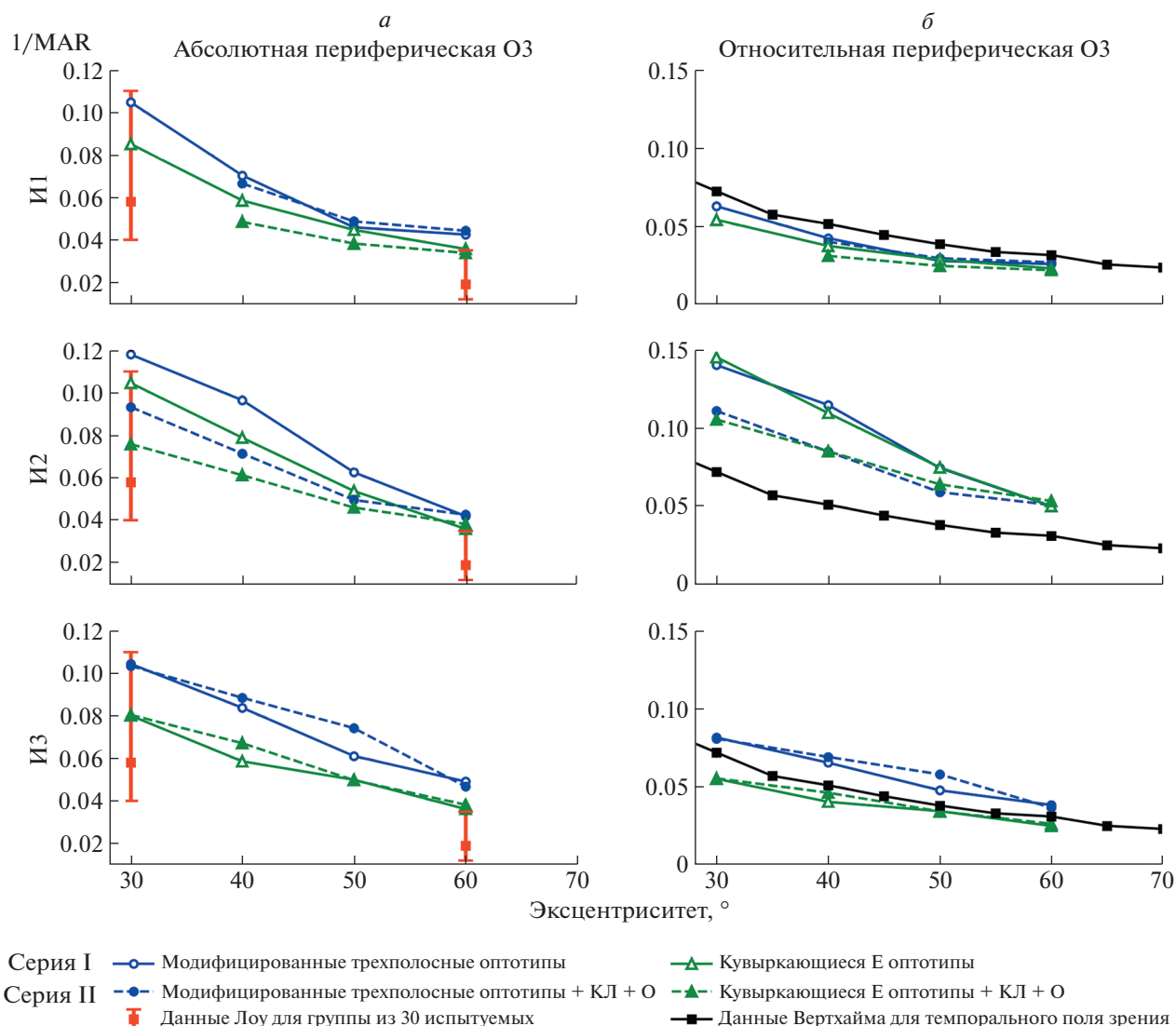


Рис. 6. Результаты измерений периферической ОЗ у трех испытуемых в различных экспериментальных условиях. Относительное значение периферической ОЗ означает отношение значения периферической ОЗ к фовеальной ОЗ. Добавлены данные Вертхайма из работы (Wertheim, 1894; 1980) и данные Лоу (Low, 1943) для средней величины и стандартных отклонений значений периферической ОЗ у 30 испытуемых, имеющих хорошие зрительные показатели.

В левой колонке рисунка представлены абсолютные значения периферической ОЗ испытуемых в единицах $1/MAR$, где MAR — minimum angle of resolution в правой колонке — относительные значения (по отношению к фовеальной ОЗ). Для сравнения, на графиках представлены также данные, полученные Вертхаймом (Wertheim, 1894; 1980) для значений эксцентриситета $30-70^\circ$, а на графиках левой колонки данные Лоу (Low, 1943) для подгруппы из 30 испытуемых, имевших хорошие зрительные показатели (в качестве тестовых стимулов Лоу использовал кольца Ландольта).

Из полученных данных видно, что в большинстве случаев значения периферической ОЗ при использовании модифицированных трехполос-

ных оптоотипов были несколько выше, чем при использовании оптоотипов “кувыркающиеся Е”.

Данные серии II (на графиках представлены пунктирными линиями), полученные при использовании КЛ+О, отличались от данных серии I, но по-разному у разных испытуемых.

У испытуемого И1 не удалось получить значения периферической ОЗ в серии II для эксцентриситета 30° , так как слепая зона, создаваемая КЛ + О, мешала наблюдению стимулов в этой части поля зрения. Значения, полученные по модифицированным трехполосным оптоотипам, были практически одинаковы в обеих сериях экспериментов. При использовании оптоотипов “кувыркающиеся Е” в серии II были получены значения

несколько меньше, чем в серии I. Относительные значения периферической ОЗ у испытуемого И1 были близки к данным Вертхайма, но несколько ниже.

У испытуемого И2 данные периферической ОЗ в серии II были ниже, чем в серии I, как для абсолютных, так и для относительных значений обоих оптоотипов. Причем все кривые в относительных единицах расположились значительно выше кривой Вертхайма.

У испытуемого И3 большее влияние на результаты оказали использованные оптоотипы, чем условия наблюдения. Видно, что кривые для одного и того же оптоотипа отличались по сериям несущественно. Данные для разных оптоотипов в обеих сериях оказались по разные стороны относительно кривой Вертхайма: кривые для модифицированных трехполосных оптоотипов идут несколько выше, а для оптоотипов “кувыркающиеся Е” — несколько ниже кривой Вертхайма.

Таким образом, можно констатировать, что КЛ + О (методика/парадигма серии II) не оказывала однозначного влияния на полученные результаты. В одних случаях использование КЛ + О приводило к повышению значений периферической ОЗ, в других — к понижению, а в третьих — не сказывалось на результатах.

ОБСУЖДЕНИЕ

В целом полученные значения периферической ОЗ мало отличались от данных других авторов, проводивших измерения при больших эксцентриситетах (Wertheim 1894; 1980; Low, 1943; Johnson, Leibowitz, 1979).

Эффект КЛ + О. Цель данной работы — приблизиться к условиям функционирования чисто периферического зрения, исключив влияние центрального зрения, которое, по нашей гипотезе, могло затруднять работу периферических механизмов, конкурируя за ресурсы внимания. Этой цели мы намеревались добиться, используя специально разработанные контактные линзы с имплантированным окклюдером.

Мы предполагали, что в условиях окклюзии центральной зоны при помощи КЛ + О периферическая ОЗ будет выше, так как в центральной зоне поля зрения не будет видимых стимулов, и, соответственно, не будет раздвоения внимания.

Оказалось, что окклюзия фиксационного стимула сама по себе не привела к ожидаемому увеличению измеренных значений периферической ОЗ, т.е. проведенные эксперименты не выявили ожидаемого позитивного влияния КЛ + О на измеряемую периферическую ОЗ.

Переход от традиционной стандартной парадигмы строгой фиксации взгляда на фовеальном стимуле с разделением внимания между централь-

ным фиксационным стимулом и периферическим тестовым к более мягкой парадигме удерживания направления взгляда по инструкции “смотри прямо перед собой” не дал ожидаемого эффекта.

Можно сделать вывод, что, задача “держать направление взгляда прямо перед собой” производила эффект, аналогичный задаче фиксации видимого фовеального стимула. Более того, контактная линза с окклюдером (диаметром 4 или 5 мм) может оказывать определенное негативное влияние, предположительно из-за затенения периферического тестового стимула в случаях неконтролируемого непровольного уменьшения диаметра зрачка, приводящего к значительному увеличению слепой зоны. У всех участников эксперимента значения периферической ОЗ оказались несколько выше для модифицированных трехполосных оптоотипов, измеряющих “остроту разрешения”, чем для “кувыркающихся Е”, измеряющих “остроту распознавания” (Anderson et al., 1999a). Различия между индивидуальными значениями ОЗ были выражены сильнее на ближней периферии. Для дальней периферии у всех испытуемых были примерно одинаковые значения периферической ОЗ.

Сравнение полученных значений периферической ОЗ с литературными данными. Полученные результаты частично согласуются с опубликованными ранее данными Вертхайма в отношении быстроты спадания ОЗ с увеличением эксцентриситета, но свидетельствуют о значительных индивидуальных особенностях.

Наиболее полное представление о межличностных различиях значений периферической ОЗ дает работа (Low, 1943), проведенная с использованием колец Ландольта в качестве тестовых стимулов. Его группа испытуемых в количестве ста человек была сформирована путем случайного набора: испытуемые различались по полу, возрасту, фовеальной ОЗ, цветовому зрению, аномалиям рефракции. Из этой группы Лоу выделил подгруппу лиц, удовлетворяющих требованиям приема в летное училище по зрительным показателям (30 мужчин 18–27 лет). Примечательно, что разница в показателях между основной группой и этой подгруппой оказалась незначительной. Неясно, в какой мере на приведенных показателях сказались тренировочные эффекты, упомянутые Лоу. Этому вопросу он посвятил специальную работу (Low, 1946b). Он организовал тренировку 43 испытуемых и нашел, что периферическая ОЗ в среднем улучшилась в 3 раза. Общая длительность тренировок составляла примерно 25 ч. При этом у лучшего по результатам тренировки испытуемого периферическая ОЗ возросла в 12 раз, а у худшего в 2 раза. Наиболее примечательной особенностью результатов тренировки были изменения, которые отмечали испытуемые в своем пе-

риферическом зрении в повседневной жизни. Заполняя специальный опросник, испытуемые указали различные ситуации, в которых заметили эти изменения, и анализ показал, что в подавляющем большинстве случаев эти изменения были полезны для испытуемых.

Позже Джонсон и Лейбович (Johnson, Leibowitz, 1979) также изучали эффект тренировки, появляющийся в процессе многократного измерения периферической ОЗ. Они использовали горизонтально ориентированные синусоидальные решетки и предъявляли их в течение 250 мс. Измерения проводились на четырех испытуемых, имевших большой опыт участия в психофизических экспериментах. С испытуемыми провели 11 сессий измерений периферической ОЗ при эксцентриситетах 0, 20, 40 и 60 град, каждая продолжительностью 1,5 ч. Результаты были представлены для каждой сессии. В среднем относительное уменьшение MAR составило 4.1% для фовеа, 41.2% для 20°, 38.3% для 40° и 45.7% для 60°. При этом большие различия между начальными и конечными значениями MAR наблюдались у трех испытуемых при эксцентриситете 60 град (вначале около 20, в конце около 12), а у четвертого испытуемого различия были небольшими (вначале 12, в конце 8). Джонсон и Лейбович подчеркнули, что при проведении измерений периферической ОЗ нужно учитывать эффект тренировки.

Дополнительные ограничения. Отчеты испытуемых об особенностях восприятия периферических тестовых стимулов в условиях проводимых экспериментов позволили выявить новые факторы, осложняющие оценку периферической ОЗ, которые ранее не принимались во внимание при разработке протокола исследования.

Получение повторных данных в условиях серии I могло затрудняться психологическим дискомфортом, связанным с продолжительной фиксацией фовеального стимула. В связи с этим приходилось делать паузы между измерениями, продолжительность которых определял сам испытуемый, закрывавший глаза после некоторой серии ответов и дававший сигнал “готов” для предъявления следующей серии тестовых стимулов.

При восприятии стимулов в условиях серии II нередко наблюдались пульсации слепой зоны и ее окаймления, по-видимому, связанные с произвольными изменениями диаметра зрачка. Ранее сильная зависимость размера слепой зоны от диаметра зрачка была выявлена при помощи моделирования (Iomdina et al., 2020). Поэтому от предъявления стимулов у края слепой зоны пришлось отказаться из-за нестабильности этого края и ограничить измерения значениями эксцентрисита-

та, надежно отстоящими от зоны нестабильной окклюзии.

Заключительные замечания. Анализируя результаты настоящего исследования и данные, полученные другими авторами в различных условиях эксперимента, можно заключить, что до настоящего времени не удалось найти метод, позволяющий эффективно выявлять потенциальные возможности механизмов периферического зрения в условиях без раздвоения внимания. Наши ожидания получить существенно лучшие показатели остроты зрения, реализуя парадигму “зрение без фовеа” при помощи контактных линз с имплантированными центральными окклюдерами, не подтвердились. В то же время имеющиеся в литературе данные о возможности повышения периферической ОЗ в несколько раз за счет не очень длительных тренировок указывают на перспективность дальнейших поисков в этом направлении.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность Гансу Страсбургеру за ценное обсуждение работы и Денису Явна за техническую помощь.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 19-015-00396).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рожкова Г.И., Белокопытов А.В., Иомдина Е.Н. Современные представления о специфике периферического зрения человека. *Сенсорные системы*. 2019. Т. 33. № 4. С. 305–330.
<https://doi.org/10.1134/S0235009219040073>
- Ярбус А.Л., Рожкова Г.И. Особенности восприятия объектов на периферии поля зрения. *Сенсорные системы*. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние. 1977. С. 64–73.
- Almutleb E.S., Bradley A., Jedlicka J., Hassan S.E. Simulation of central scotoma using contact lenses with an opaque centre. *Ophthalm. Physiol. Opt.* 2018. V. 38 (1). P. 76–87.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>
- 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 (4). P. 697–706.
<https://doi.org/10.1364/josaa.13.000697>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999a. V. 16 (10). P. 2321–2333.
<https://doi.org/10.1364/josaa.16.002321>
- Anderson R.S., Thibos L.N. Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999b. V. 16 (10). P. 2334–2342.
<https://doi.org/10.1364/josaa.16.002334>

- Augustin A., Sahel J.A., Bandello F., Dardennes R., Maurel F., Negrini C., Hieke K., Berdeaux G. Anxiety and depression prevalence rates in age-related macular degeneration. *Invest. Ophthalmol. Vis Sci.* 2007. V. 48. P. 1498–1503.
<https://doi.org/10.1167/iovs.06-0761>
- Bernard J.B., Scherlen A.C., Castet E. Page mode reading with simulated scotomas: a modest effect of interline spacing on reading speed. *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3447–3459.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.005>
- Butt T., Crossland M.D., West P., Orr S.W., Rubin G.S. Simulation contact lenses for AMD health state utility values in NICE appraisals: a different reality. *Br. J. Ophthalmol.* 2015. V. 99. P. 540–544.
<https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305802>
- Czoski-Murray C., Carlton J., Brazier J., Young T., Papo N.L., Kang H.K. Valuing condition-specific health states using simulation contact lenses. *Value Health.* 2009. V. 12. P. 793–799.
<https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2009.00527.x>
- Foley-Fisher J.A., Murphy K.S. Simulation of a retinal scotoma by a stabilized retinal image. *Ophthalmic Physiol Opt.* 1987. V. 7. P. 495–498.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1987.tb00785.x>
- Hassell J.B., Lamoureux E.L., Keeffe J.E. Impact of age related macular degeneration on quality of life. *Br. J. Ophthalmol.* 2006. V. 90. P. 593–596.
<https://doi.org/10.1136/bjo.2005.086595>
- Helmholtz H. von. *Handbuch der Physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage.* Hamburg und Leipzig, Verlag von Leopold Voss. 1896. 1334 P.
- Holland D.A. *Peripheral dynamic visual acuity under randomized tracking task difficulty, target velocities, and direction of target presentation.* Ph. D. dissertation. (Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000). URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/27297/DWIGHT.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. (дата обращения: 20.04.2021).
- Iomdina E.N., Selina O.M., Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Ershov E.I. Contact lens with implanted occluder as a tool for assessment of far peripheral vision in natural viewing conditions. *Sensory systems.* 2020. V. 34 (2). P. 100–106.
<https://doi.org/10.31857/S0235009220020043>
- Johnson C.A., Leibowitz H.W. Practice effects for visual resolution in the periphery. *Percept Psychophys.* 1979. V. 25 (5). P. 439–442.
<https://doi.org/10.3758/bf03199854>
- Jenerou A., Raghundan A., Bush S. Divided visual attention performance of ice hockey players with history of concussion. *Vision Dev. & Rehab.* 2018. V. 4 (3). P. 121–127.
<https://doi.org/10.31707/VDR2018.4.3.p121>
- Jordan T.R., McGowan V.A., Paterson K.B. Reading with a filtered fovea: The influence of visual quality at the point of fixation during reading. *Psychon. Bull. Rev.* 2012. V. 19. P. 1078–1084.
<https://doi.org/10.3758/s13423-012-0307-x>
- Lingnau A. *Seeing without a fovea? Eye movements in reading and visual search with an artificial central scotoma.* Ph.D. dissertation (Technischen Universi-
tat Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005). URL: <https://d-nb.info/974049999/34>. (дата обращения: 20.10.2021).
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects. *Am. J. Physiol.* 1943. V. 140 (1). P. 83–88.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1943.140.1.83>
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects under scotopic conditions. *Am. J. Physiol.* 1946a. V. 146 (1). P. 21–25.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.1.21>
- Low F. Some characteristics of peripheral visual performance. *Am. J. Physiol.* 1946b. V. 146(1). P. 573–584.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.4.573>
- Low F. Peripheral visual acuity. *AMA Arch. Ophthalmol.* 1951. V. 45 (1). P. 80–99.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1951.01700010083011>
- Marmor D.J., Marmor M.F. Simulating vision with and without macular disease. *Arch. Ophthalmol.* 2010. V. 128. P. 117–125.
<https://doi.org/10.1001/archophthalmol>
- Nau A. A contact lens model to produce reversible visual field loss in healthy subjects. *Optometry.* 2012. V. 83. P. 279–284.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>
- Rayner K., Bertera J.H. Reading without a fovea. *Science.* 1979. V. 206. P. 468–469.
<https://doi.org/10.1126/science.504987>
- Riggs L.A., Schick A.M. Accuracy of retinal image stabilization achieved with a plane mirror on a tightly fitting contact lens. *Vision Res.* 1968. V. 8. P. 159–169.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(68\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(68)90004-7)
- Simpson M.J. Mini-review: Far peripheral vision. *Vision Res.* 2017. V. 140. P. 96–105.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.08.001>
- Simpson M.J. Scaling the retinal image of the wide-angle eye using the nodal point. *Photonics.* 2021. V. 8. P. 284.
<https://doi.org/10.3390/photonics8070284>
- Sivak B., Sivak J.G., MacKenzie C.L. Contact lens design for lateralizing visual input. *Neuropsychologia.* 1985. V. 23. P. 801–883.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(85\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0028-3932(85)90086-7)
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: a review. *J. of Vision.* 2011. V. 11 (13). P. 1–82.
<https://doi.org/10.1167/11.5.13>
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. *J. of Vision.* 2020. V. 20 (12). P. 1–35.
<https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2>
- Walonker A.F., Diddie K.R. Simulating decreased visual acuity with a contact lens system. *Am. J. Ophthalmol.* 1981. V. 92 (6). P. 863–864.
[https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)75645-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)75645-4)
- Watson A.B., Yellott J.I. A unified formula for light-adapted pupil size. *J. of Vision.* 2012. V. 12 (10). P. 1–16.
<https://doi.org/10.1167/12.10.12>
- Wertheim T. (translated by Dunskey I.L. Original work published in 1894). Peripheral visual acuity. *American Journal of Optometry and Physiological Optics.* 1980. V. 57 (12). P. 915–924.

- Wertheim T. Über die indirekte Sehschärfe. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane*. 1894. V. 7. P. 172–187. URL: <http://echo.mpiwg-ber-lin.mpg.de/MPIWG:YSKVNKH9> (дата обращения: 20.04.2021).
- Williams R.A., Brody B.L., Thomas R.G., Kaplan R.M., Brown S.I. The psychosocial impact of macular degeneration. *Arch. Ophthalmol.* 1998. V. 116. P. 514–520. <https://doi.org/10.1001/archopht.116.4.514>
- Wong W.L., Su X., Li X., Cheung C.M., Klein R., Cheng C.Y., Wong T.Y. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob Health*. 2014. V. 2. P. 106–116. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70145-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70145-1)

Assessment of peripheral visual acuity in various conditions of testing

A. V. Belokopytov^{a, #}, G. I. Rozhkova^a, and M. A. Gracheva^a

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

#E-mail: abelokopytov@gmail.com

In studies of peripheral visual acuity (VA), the main difficulties are caused by the necessity to divide attention between the foveal fixation stimulus and the peripheral test target. One of the approaches to exclude the task of central fixation is to create an artificial central scotoma by means of contact lens with implanted occluder. Applying this approach, we have measured the peripheral VA in 3 participants in the range of eccentricities up to 60° by means of two different optotypes – tumbling-E and modified 3-bar target – on a specially constructed computerized perimetric setup. It appeared that occlusion of the fixation stimulus *per se* did not lead to the anticipated increase in the VA, probably because the effect of the instruction “to keep gaze direction straight ahead” is similar to that of the instruction to fixate a visible foveal stimulus. More than that: contact lens with occluder (4–5 mm in diameter) could exert negative effect, supposedly due to veiling the peripheral test target in the cases of uncontrolled involuntary decrease of the pupil diameter leading to significant increase of the blind zone. In all participants, the peripheral VA values appeared to be somewhat better for the modified 3-bar optotypes measuring “resolution acuity” than for the tumbling-E measuring “recognition acuity”. The reliability of the data obtained for the peripheral VA was similar to that of the foveal data. Inter-individual variability of data was larger at lower eccentricities.

Key words: peripheral vision, optotypes, visual acuity, resolution acuity, recognition acuity, contact lens with occluder, inter-individual differences

REFERENCES

- Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Iomdina E.N. Sovremennye predstavleniya o spetsifike perifericheskogo zreniya cheloveka [Present view of the human peripheral vision specifics]. *Sensornye sistemy* [Sensory systems]. 2019. V. 33 (4). P. 305–330 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0235009219040073>.
- Yarbus A.L., Rozhkova G.I. Osobennosti vospriyatiya ob"ektov na periferii polya zreniya [Features of perception of objects in the periphery of the visual field] *Sensornye sistemy* [Sensory Systems]. Leningrad, Nauka. 1977. P. 64–73 (in Russian).
- Almutleb E.S., Bradley A., Jedlicka J., Hassan S.E. Simulation of central scotoma using contact lenses with an opaque centre. *Ophthalmic Physiol. Opt.* 2018. V. 38 (1). P. 76–87. <https://doi.org/10.1111/opo.12422>.
- 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 (4). P. 697–706. <https://doi.org/10.1364/josaa.13.000697>.
- Anderson R.S., Thibos L.N. Relationship between acuity for gratings and for tumbling-E letters in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999a. V. 16 (10). P. 2321–2333. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002321>.
- Anderson R.S., Thibos L.N. Sampling limits and critical bandwidth for letter discrimination in peripheral vision. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1999b. V. 16 (10). P. 2334–2342. <https://doi.org/10.1364/josaa.16.002334>.
- Augustin A., Sahel J.A., Bandello F., Dardennes R., Maurel F., Negrini C., Hieke K., Berdeaux G. Anxiety and depression prevalence rates in age-related macular degeneration. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2007. V. 48. P. 1498–1503. <https://doi.org/10.1167/iovs.06-0761>.
- Bernard J.B., Scherlen A.C., Castet E. Page mode reading with simulated scotomas: a modest effect of interline spacing on reading speed. *Vision Res.* 2007. V. 47. P. 3447–3459. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.10.005>.
- Butt T., Crossland M.D., West P., Orr S.W., Rubin G.S. Simulation contact lenses for AMD health state utility values in NICE appraisals: a different reality. *Br. J. Ophthalmol.* 2015. V. 99. P. 540–544. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305802>.
- Czoski-Murray C., Carlton J., Brazier J., Young T., Papo N.L., Kang H.K. Valuing condition-specific health states using simulation contact lenses. *Value Health.* 2009. V. 12. P. 793–799. <https://doi.org/10.1111/j.1524-4733.2009.00527.x>.

- Foley-Fisher J.A., Murphy K.S. Simulation of a retinal scotoma by a stabilized retinal image. *Ophthalm. Physiol Opt.* 1987. V. 7. P. 495–498.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-1313.1987.tb00785.x>.
- Hassell J.B., Lamoureaux E.L., Keeffe J.E. Impact of age related macular degeneration on quality of life. *Br. J. Ophthalmol.* 2006. V. 90. P. 593–596.
<https://doi.org/10.1136/bjo.2005.086595>.
- Helmholtz H. von. *Handbuch der Physiologischen Optik. Zweite umgearbeitete Auflage.* Hamburg und Leipzig, Verlag von Leopold Voss. 1896. 1334 P.
- Holland D.A. Peripheral dynamic visual acuity under randomized tracking task difficulty, target velocities, and direction of target presentation. Ph. D. *dissertation.* (Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000). URL: <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/27297/DWIGHT.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. (accessed 20.10.2021).
- Iomdina E.N., Selina O.M., Rozhkova G.I., Belokopytov A.V., Ershov E.I. Contact lens with implanted occluder as a tool for assessment of far peripheral vision in natural viewing conditions. *Sensory systems.* 2020. V. 34 (2). P. 100–106.
<https://doi.org/10.31857/S0235009220020043>.
- Johnson C.A., Leibowitz H.W. Practice effects for visual resolution in the periphery. *Percept Psychophys.* 1979. V. 25 (5). P. 439–442.
<https://doi.org/10.3758/bf03199854>.
- Jenerou A., Raghundan A., Bush S. Divided visual attention performance of ice hockey players with history of concussion. *Vision Dev. & Rehab.* 2018. V. 4 (3). P. 121–127.
<https://doi.org/10.31707/VDR2018.4.3.p121>.
- Jordan T.R., McGowan V.A., Paterson K.B. Reading with a filtered fovea: The influence of visual quality at the point of fixation during reading. *Psychon. Bull. Rev.* 2012. V. 19. P. 1078–1084.
<https://doi.org/10.3758/s13423-012-0307-x>.
- Lingnau A. *Seeing without a fovea? Eye movements in reading and visual search with an artificial central scotoma.* Ph.D. dissertation (Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2005).
<https://d-nb.info/974049999/34> (accessed 20.10.2021).
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects. *Am. J. Physiol.* 1943. V. 140 (1). P. 83–88.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1943.140.1.83>.
- Low F. The peripheral visual acuity of 100 subjects under scotopic conditions. *Am. J. Physiol.* 1946a. V. 146 (1). P. 21–25.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.1.21>.
- Low F. Some characteristics of peripheral visual performance. *Am. J. Physiol.* 1946b. V. 146 (1). P. 573–584.
<https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1946.146.4.573>.
- Low F. Peripheral visual acuity. *AMA Arch Ophthalmol.* 1951. V. 45 (1). P. 80–99.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1951.01700010083011>.
- Marmor D.J., Marmor M.F. Simulating vision with and without macular disease. *Arch. Ophthalmol.* 2010. V. 128. P. 117–125.
<https://doi.org/10.1001/archophth.1001>.
- Nau A. A contact lens model to produce reversible visual field loss in healthy subjects. *Optometry.* 2012. V. 83. P. 279–284.
<https://doi.org/10.1111/opo.12422>.
- Rayner K., Bertera J.H. Reading without a fovea. *Science.* 1979. V. 206. P. 468–469.
<https://doi.org/10.1126/science.504987>.
- Riggs L.A., Schick A.M. Accuracy of retinal image stabilization achieved with a plane mirror on a tightly fitting contact lens. *Vision Res.* 1968. V. 8. P. 159–169.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(68\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(68)90004-7).
- Simpson M.J. Mini-review: Far peripheral vision. *Vision Res.* 2017. V. 140. P. 96–105.
<https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.08.001>.
- Simpson M.J. Scaling the retinal image of the wide-angle eye using the nodal point. *Photonics.* 2021. V. 8. P. 284.
<https://doi.org/10.3390/photonics8070284>.
- Sivak B., Sivak J.G., MacKenzie C.L. Contact lens design for lateralizing visual input. *Neuropsychologia.* 1985. V. 23. P. 801–883.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(85\)90086-7](https://doi.org/10.1016/0028-3932(85)90086-7).
- Strasburger H., Rentschler I., Jüttner M. Peripheral vision and pattern recognition: a review. *J. Vision.* 2011. V. 11 (13). P. 1–82.
<https://doi.org/10.1167/11.5.13>.
- Stewart E.E.M., Valsecchi M., Schütz A.C. A review of interactions between peripheral and foveal vision. *J. Vision.* 2020. V. 20 (12). P. 1–35.
<https://doi.org/10.1167/jov.20.12.2>.
- Walonker A.F., Diddie K.R. Simulating decreased visual acuity with a contact lens system. *Am. J. Ophthalmol.* 1981. V. 92 (6). P. 863–864.
[https://doi.org/10.1016/s0002-9394\(14\)75645-4](https://doi.org/10.1016/s0002-9394(14)75645-4).
- Watson A.B., Yellott J.I. A unified formula for light-adapted pupil size. *J. Vision.* 2012. V. 12 (10). P. 1–16.
<https://doi.org/10.1167/12.10.12>.
- Wertheim T. (translated by Dunskey I.L. Original work published in 1894). Peripheral visual acuity. *Am. J. Optom. Physiol. Optics.* 1980. V. 57 (12). P. 915–924.
- Wertheim T. *Über die indirekte Sehschärfe.* Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane. 1894. V. 7. P. 172–187. URL: <http://echo.mpiwg-berlin.mpg.de/MPIWG:YSKVNH9> (accessed 20.10.2021).
- Williams R.A., Brody B.L., Thomas R.G., Kaplan R.M., Brown S.I. The psychosocial impact of macular degeneration. *Arch. Ophthalmol.* 1998. V. 116. P. 514–520.
<https://doi.org/10.1001/archophth.116.4.514>.
- Wong W.L., Su X., Li X., Cheung C.M., Klein R., Cheng C.Y., Wong T.Y. Global prevalence of age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systematic review and meta-analysis. *Lancet Glob. Health.* 2014. V. 2. P. 106–116.
[https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70145-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70145-1).