

Современные возможности функционального скрининга глаукомы (часть 2)

СИМАКОВА И.Л., д.м.н., профессор кафедры офтальмологии¹; <https://orcid.org/0000-0001-8389-0421>

ГРИГОРЯН Л.А., заместитель генерального директора по развитию бизнеса и управлению инновациями².
<https://orcid.org/0000-0001-5610-4421>

ГОРБАЧЕВА К.С., врач-офтальмолог³. <https://orcid.org/0009-0006-5356-1313>

¹Кафедра офтальмологии ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова» Минобороны РФ, 194044, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Боткинская, 21;

²ООО «Тотал Вижен», 119234, Российская Федерация, Москва, муниципальный округ Раменки, ул. Ленинские горы, 1, стр. 77, 101а;

³ООО «Инкерман», 197198, Российская Федерация, Санкт-Петербург, муниципальный округ Введенский, пр. Добролюбова, 20, к. 1, литера А, этаж 1, пом. 1-Н, часть пом. 1.

Финансирование: авторы не получали финансирование при проведении исследования и написании статьи.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Симакова И.Л., Григорян Л.А., Горбачева К.С. Современные возможности функционального скрининга глаукомы (часть 2). *Национальный журнал глаукома*. 2024; 23(1):58-64.

Резюме

В настоящее время для функционального скрининга глаукомы широко используются методы стандартной и нестандартной компьютерной периметрии с использованием стационарных приборов. В зарубежной литературе последних лет появилась информация о новых портативных устройствах, предназначенных для периметрии, преимуществами которых, помимо экономической доступности, являются автономность и мобильность, открывающие новые возможности их применения. К новым возможностям относятся также облачное хранение данных, использование технологий телемедицины, искусственного интеллекта, обследование пациентов с ограниченными возможностями, в том числе лежащих,

а также обследование вне медицинских учреждений. Все это позволит обеспечить глаукомных больных офтальмологической помощью во время их дистанцирования, в том числе социального, вследствие пандемии и карантина. Обзор литературы посвящен описанию новейших портативных устройств и приложений, предназначенных для периметрии, попытке их классифицировать по схожим параметрам, оценке преимуществ и недостатков, а также перспектив использования их для функционального скрининга глаукомы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: глаукома, скрининг глаукомы, портативные устройства для периметрии, стандартная и нестандартная периметрия, FDT-периметрия.

Для контактов:

Симакова Ирина Леонидовна, e-mail: irina.l.simakova@gmail.com

LITERATURE REVIEW

Modern possibilities of functional glaucoma screening (part 2)

SIMAKOVA I.L., Dr. Sci. (Med.), Professor at the Academic Department of Ophthalmology¹;
<https://orcid.org/0000-0001-8389-0421>

GRIGORYAN L.A., Deputy Chief Officer for Business Development and Innovation Management²;
<https://orcid.org/0000-0001-5610-4421>

GORBACHEVA K.S., ophthalmologist³. <https://orcid.org/0009-0006-5356-1313>

¹S.M. Kirov Military Medical Academy, Academic Department of Ophthalmology, 21 Botkinskaya St., Saint Petersburg, Russian Federation, 194044;

²OOO Total Vizhen, 1-77 Leninskie gory St., ofc. 101a, Moscow, Russian Federation, 119234;

³OOO Inkerman, 20-1 litt. A at Dobroljubova pr., floor 1, room 1-H, part of room 1, Saint Petersburg, Russian Federation, 197198.

Funding: the authors received no specific funding for this work.

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Simakova I.L., Grigoryan L.A., Gorbacheva K.S. Modern possibilities of functional glaucoma screening (part 2). *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2024; 23(1):58-64.

Abstract

Nowadays methods of standard and non-standard computerized perimetry using stationary devices are widely used in functional screening of glaucoma. The information about new portable devices for perimetry has appeared in foreign literature in recent years, describing such advantages as economic availability, autonomy and mobility, which open up new possibilities for their use. New possibilities include cloud storage of data, the use of telemedicine technologies, artificial intelligence, examination of patients with disabilities, including those who are bedridden, as well as examination outside of medical

institutions. All of this can allow glaucoma patients to receive ophthalmic care when in-person visits are unavailable, including social distancing needed during a pandemic or quarantine. This review of the literature describes the latest portable devices and applications for perimetry, attempts to classify them according to similar parameters, and assesses their advantages and disadvantages, as well as the prospects for their use in functional screening of glaucoma.

KEYWORDS: glaucoma, glaucoma screening, portable devices for perimetry, standard and non-standard perimetry, FDT-perimetry.

VR-очки с использованием держателей для смартфонов (или VR-очки типа Cardboard)

Конструкция таких устройств одинакова: VR-очки с держателем для смартфона, кликер для обратной связи и планшет или смартфон для управления исследованием. Существенным недостатком является привязка устройства к определенным моделям смартфонов, что вызовет очевидные проблемы в случае ухода этих моделей с рынка. Кроме того, выполнено крайне небольшое количество обстоятельных и репрезентативных исследований этих устройств, что не позволяет качественно оценить их перспективы. Но среди них есть образцы, технологии которых могут быть в дальнейшем использованы для специально разработанных портативных устройств. Например, VR-очки на базе шлема nGoggle, с помощью которых осуществляется попытка объективного исследования поля зрения на основе оценки зрительных вызванных потенциалов.

Периметр nGoggle разработан компанией nGoggle, Inc. (США). В его основе использованы VR-очки Samsung Gear VR, в конструкции которых имеется держатель для установки смартфона определенных моделей Samsung Galaxy (Galaxy Note 4, Galaxy Note 5, Galaxy Note 7, Galaxy S6/S6 Edge/S6 Edge+, Galaxy S7/S7 Edge, Galaxy S8/S8+, Galaxy S9/S9+). Прибор оснащен линзами, регулятором фокусировки и датчиками наклона головы. VR-очки соединяются со смартфоном через microUSB. В приборе имеется беспроводная система — нейромонитор (3×4,5×1,5 см без учета литий-ионной батареи) с регистрацией электроэнцефалограммы (ЭЭГ) по 6 каналам и электроокулограммы (ЭОГ) по 4 каналам, которая оснащена встроенным двухъядерным процессором и позволяет оценивать электрическую активность мозга при тестировании определенных участков поля зрения. В этой системе используются сухие электроды на основе полимера для ЭЭГ и на основе пены для ЭОГ. В шлеме также имеется

бинокулярный 3D-дисплей, система отслеживания взгляда с помощью инфракрасных светодиодов и камер с частотой 30 кадров в секунду, датчик движения для контроля положения головы. Мобильное приложение для предъявления многократных мультифокальных визуальных стимулов предназначено для использования на телефоне Android с дисплеем с частотой 60 кадров в секунду [1, 2].

На сайте компании nGoggle Inc. представлена еще одна модель периметра, специально разработанная для выполнения периметрии без взятых за основу VR-очков другой компании. Но ее подробные характеристики не указаны, а также отсутствуют данные о клинических исследованиях данной модели. Поэтому далее рассмотрены результаты исследования более ранней модели nGoggle.

М. Nakanishi et al. (2017) провели исследование на базе Калифорнийского университета (The Visual Performance Laboratory of the University of California San Diego), целью которого было определить диагностические возможности nGoggle дифференцировать глаукомные и здоровые глаза. В исследование включили 62 глаза 33 пациентов с глаукомой и 30 глаз 17 здоровых участников. Средний возраст пациентов с глаукомой составил $68,2 \pm 11,0$ лет, а здоровых участников – $66,1 \pm 9,9$ лет. В ходе исследования 6 датчиков для регистрации ЭЭГ располагались в позициях Pz, PO4, PO3, O1, Oz и O2 в соответствии с международной системой 10-20. Зрительные стимулы состояли из 2 паттернов, мерцающих с частотой 8,0–11,8 Гц с интервалом 0,2 Гц. Исследование ЦПЗ выполнялось в пределах 35° . Эксперимент состоял из 3 сеансов А-паттерна и 3 сеансов Б-паттерна для каждого глаза. Испытуемые занимали удобное положение для исследования и фиксировали взгляд на точке, расположенной в центре экрана. Каждый сеанс содержал 30 стимулов продолжительностью 6 с, включая 5 с визуальной стимуляции с последующим коротким перерывом в 1 с (всего 3 минуты). Средний параметр mfSSVEP (мультифокальный стационарный зрительно-вызванный потенциал) nGoggle был ниже для глаз с глаукомой ($0,289 \pm 0,02$) по сравнению со здоровыми глазами ($0,334 \pm 0,02$). Статистически значимых различий в секторальных измерениях между nGoggle и САП не наблюдалось. Повторяемость измерений, полученных с помощью nGoggle, исследовали на 20 глазах 10 участников с глаукомой. Средний коэффициент вариации глобального параметра mfSSVEP составил 3,03% (95%), тогда как коэффициенты вариации для секторов варьировались от 4,14% до 7,45%. Исследование показало, что nGoggle смог отличить глаза с ГОН от здоровых. Кроме того, установлена хорошая повторяемость тестов с помощью nGoggle, что может позволить использовать данный метод для мониторинга глаукомного процесса в перспективе [3].

Описанное исследование было выполнено с целью первоначальной оценки возможности использования nGoggle в качестве портативного устройства для выполнения объективной периметрии. Но для оценки перспективы использования nGoggle для функционального скрининга глаукомы необходимы дальнейшие репрезентативные исследования.

Программы для игровых VR-шлемов по типу VR-kit

Рассмотрим такой тип устройств на примере VisuALL (Olleyes, США), состоящего из двух частей: аппаратной и программной. Аппаратная часть включает в себя три основных компонента: VR-шлем на платформе Pico (Pico Interactive, Inc., США), устройство с доступом в интернет (ноутбук, телефон или планшет) и кликер, подключенный посредством Bluetooth. Программное обеспечение VisuAll включает облачный сервер Olleyes, веб-приложение VisuALL и алгоритмы Unity. Протоколы исследований VisuALL используют стимулы размером III по Гольдману. В ходе исследования белый стимул отображается на черном фоне (1 кд/м^2). Есть несколько протоколов выполнения периметрии: протокол T-24 тестирует 50 точек ЦПЗ в пределах 24° (с тестовыми точками на расстоянии 6° друг от друга), а T-10 тестирует 68 центральных точек в пределах 10° (с тестовыми точками на расстоянии 2°). Пороговые значения указываются в децибелах (дБ) в диапазоне 0–49. Потери фиксации взгляда определяются по методу Heijl-Krakau. Ложноотрицательные ответы оцениваются путем показа испытуемому стимула ниже по яркости на $0,5 \text{ кд/м}^2$, чем ранее представленный; результат регистрируется, если испытуемый не нажал на кликер. После завершения исследования программное обеспечение создает отчет [4].

R. Razeghinejad et al. (2020) оценили диагностические возможности использования VisuALL для исследования поля зрения у здоровых людей и пациентов с глаукомой. В исследование было включено 50 здоровых глаз 25 человек и 52 глаза 26 человек с I и II стадией глаукомы. Всем участникам выполнили исследование поля зрения с помощью VisuALL и HFA (программа 24-2, алгоритм SITA). Средняя светочувствительность во всех квадрантах по результату периметрии с помощью VisuALL и HFA значительно коррелировала как в группе здоровых ($r=0,5$; $p=0,001$), так и в группах пациентов с глаукомой ($r=0,8$; $p<0,001$) [5].

Представленные в литературе данные о проведенных исследованиях устройства VisuALL пока недостаточны, чтобы оценить его возможности и перспективы в функциональном скрининге глаукомы.

Периметры со шлемами, специально разработанными для выполнения периметрии

Этот вид портативных устройств является самым перспективным среди приведенных выше, так как шлемы специально разрабатываются для выполнения периметрии с учетом особенностей жидкокристаллических (ЖК) мониторов и конструкции VR-очков. Наиболее изученным является периметр IMO, который был разработан в 2015 году японской компанией CREWT Medical Systems, Inc для выполнения традиционной периметрии «белый стимул на белом фоне». Данное устройство состоит из специально разработанного шлема, планшета для управления, который подключен к периметру посредством интерфейса Wi-Fi, и кнопки для ответов пациента, подключенной через Bluetooth. В шлем встроены литий-ионный аккумулятор и компьютерный блок. Стимулы отображаются с помощью ЖК-дисплеев высокой чёткости и светодиодной подсветки. Разрешение каждого экрана составляет 1 920 на 1 080 пикселей; фактически для тестирования используется 79 800 пикселей. Правая и левая оптические системы полностью разделены, а предъявление стимулов и мониторинг положения зрачка выполняются отдельно для каждого глаза. Исследование поля зрения можно выполнить в пределах 35° от точки фиксации. Размеры предъявляемых стимулов составляют от I до V по Гольдману. Так, стимул размером III отображается с использованием 37 пикселей. Из-за ограничения разрешения дисплея стимулы размерами II и I соответственно отображаются с использованием 12 и 2 пикселей, причем в настоящее время на ЖК-экране невозможно представить стимул размером I круглой формы. В ходе периметрии положение зрачков непрерывно отслеживается с частотой кадров в 30 Гц. Яркость стимула во время исследования находится в пределах 0,032–3 183 кд/м², а яркость фона — 10 кд/м², длительность предъявления стимула составляет 200 мс. Частота обновления экрана составляет 60 Гц, а интенсивность стимула достигает нужного уровня яркости в пределах одного кадра (0,00167 с). Тестовые схемы, используемые для IMO, сопоставимы с таковыми у HFA — 30-2, 24-2, 10-2. В дополнение к ним IMO включает программы 24plus (1-2) и 24plus (1). В ходе 24plus (1-2) на периферии предъявляются те же стимулы, что и при 24-2, но в пределах центральных 10° поля зрения дополнительно предъявляются 28 точек с интервалом 2°, а 24plus (1) предъявляет 36 стимулов вдоль слоя нервных волокон вблизи точки фиксации. Кроме того, если у испытуемого имеются аномалии рефракции, то их можно корректировать с помощью встроенных в шлем сферических линз в диапазоне -9,0...+3,0 диоптрий, а при помощи дополнительной съемной системы магнитных линз

можно корректировать и астигматизм. При помощи IMO можно тестировать как правый и левый глаз отдельно, так и два глаза одновременно, предъявляя стимул одному из глаз случайным образом. При этом испытуемый не знает, какой именно глаз исследуется. [6].

Разработаны два типа периметров IMO: i-H — head-mounted type и i-F — fixed position type. Периметр первого типа надевается на голову испытуемого и ни к чему не прикреплен, а второго типа прикреплен к панели и требует определенного положения испытуемого (как при исследовании с помощью периметра HFA), но может использоваться и без крепления [7].

При выполнении исследования на i-H типе прибора следует обращать внимание на положение головы испытуемого, так как ее наклон может влиять на результат исследования. S. Yamao et al. (2017) провели исследование, в котором определяли влияние наклона головы на результат периметрии с помощью IMO, а именно связь между углом наклона головы, встречным вращением глазных яблок (вестибулоокулярный рефлекс, характеризующийся торсионными поворотами глаза в ответ на боковой наклон головы) и результатом исследования поля зрения. На основании полученных данных, авторы рекомендуют ограничивать наклон головы испытуемого при выполнении исследования с помощью IMO до 20° [7].

T. Kimura et al. (2019) выполнили исследование результатов периметрии, полученных при помощи HFA и IMO, на базе глазной клиники в Токио (the Ueno Eye Clinic). В исследование были включены 273 человека (543 глаза), из которых 147 испытуемым (292 глаза) проводилась периметрия с помощью i-H типа IMO, а 126 (251 глаз) — с помощью i-F типа. Из 543 глаз 118 были с ПОУГ, 250 глаз — с глаукомой нормального давления, 25 — с первичной закрытоугольной глаукомой, 10 — с вторичной глаукомой, 140 — с препериметрической глаукомой. Средний возраст испытуемых составил 62,9±13,0 лет. Всем участникам выполнялась периметрия с помощью периметра HFA по стандартной программе SITA 30-2 (76 точек) и с помощью периметра IMO по программе 24plus (1-2) (78 точек). Средние значения индекса MD для HFA и IMO составили -6,1±7,8 и -6,2±7,1 дБ, соответственно. Общее среднее время исследования было меньше на 30,8% для IMO по сравнению с HFA [6].

Goukon H. et al. (2019) провели исследование, в котором оценили результаты теста поля зрения у пациентов с глаукомой и псевдо-потерей фиксации (по результатам выполнения периметрии с помощью HFA). В исследование было включено 54 глаза 54 пациентов, у которых частота потери фиксации составляла более 20%. Всем пациентам была выполнена периметрия с помощью HFA по протоколам SITA 30-2 и 24-2, а также исследование



Рис. 1. VR-шлем Stimulus.

Fig. 1. VR headset Stimulus.

на ИМО по протоколам AIZE 30-2 и 24-2. Сравнение проводилось по следующим параметрам: ложноположительные (FP) и ложноотрицательные ответы (FN), частота потери фиксации (FL), индексы MD и PSD, индекс поля зрения (VFI) и светочувствительность в каждой контрольной точке. Не было получено существенных различий в значениях MD, PSD и VFI, и эти показатели сильно коррелировали между собой ($r > 0,96$; $p < 0,01$). Существенной разницы показателей FP и FN не было получено, в то время как частота FL по данным HFA была 27,5%, а по результатам исследований на ИМО — 13,2% ($p < 0,01$). В каждой контрольной точке чувствительность сетчатки в среднем была на 1,7 дБ выше при использовании HFA по сравнению с ИМО ($p < 0,01$). Таким образом, существенной разницы показателей у пациентов с глаукомой и псевдо-потерей фиксации при исследовании с помощью HFA и ИМО получено не было [8].

Y. Nakai et. al (2021) провели сравнительное исследование результатов периметрии, выполненной при помощи ИМО и HFA. В исследование были включены 64 человека с глаукомой (128 глаз) и 20 здоровых людей (40 глаз). Сравнили следующие параметры: индексы MD, PSD, VFI и светочувствительность. Результаты индексов MD ($r = 0,886$, $p < 0,001$), PSD ($r = 0,814$, $p < 0,001$) и VFI ($r = 0,871$, $p < 0,001$) обоих периметров высоко коррелировали. Чувствительность периметра ИМО составила 80,5% для MD, 81,2% для PSD и 80,5% для VFI, а для HFA — 63,3%, 74,5% и 80,5%, соответственно. Оба периметра продемонстрировали высокую диагностическую способность, и между их результатами не было отмечено существенной разницы. Несмотря на то, что была получена положительная корреляция результатов, авторы провели анализ Бланда-Альтмана, чтобы проверить, имеется ли различие в результатах при прогрессировании глаукомы. Анализ показал, что различие между данными периметров ИМО и HFA имело тенденцию к увеличению по мере прогрессирования глаукомы,

и пропорциональная ошибка наблюдалась в индексах MD, PSD и VFI во всех случаях. Таким образом, при определении этих параметров требуется осторожность, поскольку разница между результатами, полученными с помощью ИМО и HFA, увеличивается по мере прогрессирования нарушений в поле зрения. Авторы полагают, что измерения, полученные с помощью ИМО, могут указывать на более высокую скорость ухудшения глаукомы, чем предполагалось по данным HFA [9].

На основании данных литературы можно сделать вывод, что в результате сравнительных исследований ИМО и САП с помощью периметрии на HFA получена высокая корреляция результатов для начальных глаукомных изменений поля зрения, но при более выраженной депрессии светочувствительности увеличивается различие в результатах этих периметров. Вероятно, хорошую корреляцию результатов можно объяснить тем, что технические параметры ИМО незначительно отличаются от таковых в САП: яркость фона в периметре ИМО (31,4 асб) отличается от параметров САП (31,5 асб) всего на 0,1 асб, нижняя граница яркости предъявляемых стимулов (0,1 асб) отличается от САП (0,08 асб) на 0,02 асб, а размер предъявляемых стимулов и длительность их предъявления соответствуют стандартным требованиям к САП. К тому же исследование выполняется с помощью системы виртуальной реальности, которая позволяет воссоздать полусферу для предъявления стимулов, как в периметре HFA. Однако необходимо продолжать клинические исследования пациентов с разными стадиями глаукомы, чтобы исключить возможные ошибки и расхождения данных, после выполнения которых перспектива использования данного прибора для функционального скрининга глаукомы станет окончательно ясной.

В 2018 году отечественная компания ООО «Тотал Вижен», резидент фонда Сколково, разработала прототип периметра на базе собственной системы виртуальной реальности, получивший название Stimulus (рис. 1). Эта разработка была отмечена рядом наград и дипломов победителя на многих экономических и научных форумах всероссийского значения и с международным участием. В 2019 году проект получил специальный приз «BEST INTERNATIONAL INVENTION» на всемирном конкурсе изобретений ISIF-2019.

Аппаратно-программный комплекс периметра Stimulus состоит из специально разработанных VR-шлема и вычислительного устройства. Управление осуществляется с помощью планшета через сеть Wi-Fi. Принцип работы устройства схож с вышеописанными приборами данного типа [10, 11]. Специалисты компании ООО «Тотал Вижен» провели работу по усовершенствованию своей системы виртуальной реальности (VR) для реализации технологии FDT-периметрии. Работа велась на основе

программной версии авторской модификации FDT-периметрии, которая была разработана с 2003 по 2007 гг. на кафедре офтальмологии Военно-медицинской академии И.Л. Симаковой под руководством профессора В.В. Волкова совместно с сотрудниками кафедры прикладной математики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета [12, 13, 14].

В декабре 2022 года на кафедре офтальмологии Военно-медицинской академии завершена инициативная НИР «Сравнительное исследование методов стандартной и нестандартной компьютерной периметрии у здоровых лиц и больных глаукомой с целью скрининга и ранней диагностики», которая выполнялась совместно с ООО «Тотал Вижен» с 01.2021 по 01.2023, целью которой являлось усовершенствование известной авторской модификации метода нестандартной FDT-периметрии [12] для адаптации данного метода к аппаратной и программной базе экспериментальной модели периметра Stimulus.

В ходе выполнения НИР было получено хорошее совпадение результатов обоих вариантов FDT-периметрии в основной группе пациентов с ПОУГ, разделенной по стадии заболевания, и контрольной группе, состоящей из здоровых лиц. Результатам этой НИР посвящена наша оригинальная статья.

Литература

1. Medeiros F.A., Zao J.K., Wang Y., Nakanishi M., Lin Y.-P., Diniz-Filho A., Jung T.-P. The nGoggle: a portable brain-based method for assessment of visual function deficits in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(12).
2. Zao J.K., Jung T.-P., Chang H.-M., Gan T.-T., Wang Y.-T., Lin Y.-P., Wen-Hao Liu W.-H., Guang-Yu Zheng G.-Y., Chin-Kuo Lin C.-K., Chia-Hung Lin C.-H., Yu-Yi Chien Y.-Y., Lin F.-C., Huang Y.-P., Méndez S.J.R., Medeiros F.A. Augmenting VR/AR Applications with EEG/EOG Monitoring and Oculo-Vestibular Recoupling. *Foundations of augmented cognition: neuroergonomics and operational neuroscience*. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.
3. Nakanishi M., Wang Y., Jung T., Zao J. K., Chien Y., Diniz-Filho A., Daga F.B., Lin Y.-P., Wang Y., Medeiros F.A. Detecting glaucoma with a portable brain-computer interface for objective assessment of visual function loss. *JAMA Ophthalmology* 2017; 135(6):550-557. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2017.0738>.
4. Montelongo M., Gonzalez A., Morgenstern F., Donahue S.P., Groth S.L. A Virtual reality-based automated perimeter, device, and pilot study. *Transl Vis Sci Technol* 2021; 10(3):20. <https://doi.org/10.1167/tvst.10.3.20>.
5. Razeghinejad R., Gonzalez-Garcia A., Myers J.S., Katz L.J. Preliminary report on a novel virtual reality perimeter compared with standard automated perimetry. *J Glaucoma* 2021; 30(1):17-23. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001670>.
6. Kimura T., Matsumoto C., Nomoto H. Comparison of head-mounted perimeter (imo) and Humphrey field analyzer. *Clin Ophthalmol* 2019; 13:501-513. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S190995>.
7. Yamao S., Matsumoto C., Nomoto H., Numata T., Eura M., Yamashita M., Hashimoto S., Okuyama S., Kimura S., Yamanaka K., Chiba Y., Aihara M., Shimomura Y. Effects of head tilt on visual field testing with a head-mounted perimeter imo. *PLoS ONE* 2017; 2(9):e0185240. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185240>.

Заключение

На сегодняшний день существует достаточно большое количество портативных устройств для исследования поля зрения, с помощью которых можно выполнять периметрию даже в домашних условиях. Однако большинство из них до сих пор являются экспериментальными моделями. Количество исследований этих приборов пока немногочисленно, а качество их выполнения не всегда позволяет полностью доверять результатам из-за малого количества участников, неполного описания устройства приборов, параметров исследований и пр. Однако в части выше представленных исследований авторами получены результаты, сопоставимые с данными периметрии HFA, в том числе при начальной стадии ПОУГ. Поэтому в перспективе такие разработки портативных устройств для периметрии, особенно на базе специально разработанных шлемов виртуальной реальности, смогут широко использоваться в офтальмологической практике, в том числе и для функционального скрининга глаукомы благодаря своей мобильности, автономности, экономической доступности, отсутствию строгих требований к положению пациента, освещенности и размерам помещения для исследования.

References

1. Medeiros F.A., Zao J.K., Wang Y., Nakanishi M., Lin Y.-P., Diniz-Filho A., Jung T.-P. The nGoggle: a portable brain-based method for assessment of visual function deficits in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2016; 57(12).
2. Zao J.K., Jung T.-P., Chang H.-M., Gan T.-T., Wang Y.-T., Lin Y.-P., Wen-Hao Liu W.-H., Guang-Yu Zheng G.-Y., Chin-Kuo Lin C.-K., Chia-Hung Lin C.-H., Yu-Yi Chien Y.-Y., Lin F.-C., Huang Y.-P., Méndez S.J.R., Medeiros F.A. Augmenting VR/AR Applications with EEG/EOG Monitoring and Oculo-Vestibular Recoupling. *Foundations of augmented cognition: neuroergonomics and operational neuroscience*. Switzerland: Springer International Publishing; 2016.
3. Nakanishi M., Wang Y., Jung T., Zao J. K., Chien Y., Diniz-Filho A., Daga F.B., Lin Y.-P., Wang Y., Medeiros F.A. Detecting glaucoma with a portable brain-computer interface for objective assessment of visual function loss. *JAMA Ophthalmology* 2017; 135(6):550-557. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2017.0738>.
4. Montelongo M., Gonzalez A., Morgenstern F., Donahue S.P., Groth S.L. A Virtual reality-based automated perimeter, device, and pilot study. *Transl Vis Sci Technol* 2021; 10(3):20. <https://doi.org/10.1167/tvst.10.3.20>.
5. Razeghinejad R., Gonzalez-Garcia A., Myers J.S., Katz L.J. Preliminary report on a novel virtual reality perimeter compared with standard automated perimetry. *J Glaucoma* 2021; 30(1):17-23. <https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000001670>.
6. Kimura T., Matsumoto C., Nomoto H. Comparison of head-mounted perimeter (imo) and Humphrey field analyzer. *Clin Ophthalmol* 2019; 13:501-513. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S190995>.
7. Yamao S., Matsumoto C., Nomoto H., Numata T., Eura M., Yamashita M., Hashimoto S., Okuyama S., Kimura S., Yamanaka K., Chiba Y., Aihara M., Shimomura Y. Effects of head tilt on visual field testing with a head-mounted perimeter imo. *PLoS ONE* 2017; 2(9):e0185240. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185240>.

8. Goukon H., Hirasawa K., Kasahara M., Matsumura K., Shoji N. Comparison of Humphrey field analyzer and imo visual field test results in patients with glaucoma and pseudo-fixation loss. *PLoS ONE* 2019; 14(11):e0224711
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224711>.
9. Nakai Y., Bessho K., Shono Y., Taoka K. Comparison of imo and humphrey field analyzer perimeters in glaucomatous eyes. *Int J Ophthalmol* 2021; 14(12):1882-1887.
<https://doi.org/10.18240/ijo.2021.12.11>.
10. Еричев В.П., Ермолаев А.П., Антонов А.А., Котляр К., Мазурова Ю.В., Левицкий Ю.В., Хдери Х. Исследование поля зрения при помощи портативного периметра выполненного на базе шлема виртуальной реальности. *Новости глаукомы* 2018; 4(48):42-43.
<https://doi.org/10.30808/978-5-6040782-2018-1-1-106-110>.
11. Еричев В.П., Ермолаев А.П., Антонов А.А., Григорян Г.Л., Косова Д.В. Новые возможности исследования поля зрения. *Вестник офтальмологии* 2018; 2(134):66-73.
<https://doi.org/10.17116/oftalma2018134266-72>.
12. Симакова И.Л., Волков В.В., Бойко Э.В., Клавдиев В.Е. Создание метода периметрии с удвоенной пространственной частотой за рубежом и в России. *Национальный журнал глаукома* 2009; 8(2):5-21.
13. Симакова И.Л., Волков В.В., Бойко Э.В., Клавдиев В.Е., Андреа К., изобретатели; Способ компьютерной диагностики открытоугольной глаукомы. РФ патент 2357651. 2009.
14. Симакова И.Л., Волков В.В., Бойко Э.В., Клавдиев В.Е., Андреа К., изобретатели; Способ скрининговой диагностики глаукомы. РФ патент 2357652. 2009.
8. Goukon H., Hirasawa K., Kasahara M., Matsumura K., Shoji N. Comparison of Humphrey field analyzer and imo visual field test results in patients with glaucoma and pseudo-fixation loss. *PLoS ONE* 2019; 14(11):e0224711
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224711>.
9. Nakai Y., Bessho K., Shono Y., Taoka K. Comparison of imo and humphrey field analyzer perimeters in glaucomatous eyes. *Int J Ophthalmol* 2021; 14(12):1882-1887.
<https://doi.org/10.18240/ijo.2021.12.11>.
10. Eriчев V.P., Ermolaev A.P., Antonov A.A., Kotliar K., Mazurova Iu.V., Levitsky Yu.V., Hderi K. Study of the field of view using a portable perimeter made on the basis of a virtual reality helmet. *Glaucoma news* 2018; 4(48):42-43.
<https://doi.org/10.30808/978-5-6040782-2018-1-1-106-110>.
11. Eriчев V.P., Ermolaev A.P., Antonov A.A., Grigorjan G.L., Kosova D.V. New possibilities of visual field research (preliminary report). *Vestnik oftal'mologii* 2018; 2(134):66-73.
<https://doi.org/10.17116/oftalma2018134266-72>.
12. Simakova I.L., Volkov V.V., Boiko E.V., Klavdiev V.E. Creation of the method of frequency-doubling technology perimetry: an international and Russian experience. *National Journal glaucoma* 2009; 8(2):5-21.
13. Simakova I.L., Volkov V.V., Bojko Je.V., Klavdiev V.E., Andrea K., inventors; Sposob komp'juternoj diagnostiki otkrytougol'noj glaukomy [The method of computer diagnostics of open-angle glaucoma]. Patent RF 2357651, 2009.
14. Simakova I.L., Volkov V.V., Bojko Je.V., Klavdiev V.E., Andrea K., inventors; Sposob skrininogovoj diagnostiki glaukomy [The method for screening diagnosis of glaucoma]. Patent RF 2357652, 2009.