

УДК 004.923, 004.932, 778.534.1

ВИЗУАЛЬНОЕ ВОСПРИЯТИЕ ПРОСТРАНСТВА В МУЛЬТИФОКАЛЬНЫХ ТРЁХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЯХ, СТИМУЛИРУЮЩИХ АККОМОДАЦИЮ

© Е. В. Власов¹, В. С. Бартош², С. А. Кузиковский²

¹Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

²Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Анализируется влияние устройства просмотра — мультифокального 3D-дисплея — на визуальное восприятие и оценку пользователем глубины и размеров объектов. В качестве модели эксперимента выбрана методика Холуэя — Боринга, доказавшая, что в восприятии признаков расстояния решающая роль принадлежит константности восприятия размера. Проведённая серия экспериментов показывает, что мультифокальные 3D-дисплеи предоставляют достаточно надёжную информацию об удалённости и размерах предметов, что позволяет не нарушать закона константности восприятия.

Ключевые слова: 3D-изображение, планы изображений, константность зрительного восприятия, формируемое пространство.

DOI: 10.15372/AUT20200105

Введение. Визуальное восприятие пространства можно рассматривать как способность человека воспринимать расположение объектов в окружающем мире. Это сложный навык, который обеспечивает безопасную ориентацию в физической среде, позволяет обнаруживать и распознавать направление и расположение объектов относительно наблюдателя или друг друга, а также воспринимать абсолютные и относительные размеры и расстояния объектов с использованием разнообразных визуальных сигналов. Восприятие расстояния человеком основывается на признаках глубины. Прямые признаки глубины стимулируют аккомодацию глаз, их конвергенцию и стереоскопическую диспаратность [1].

Косвенные признаки глубины включают в себя окклюзии и автоокклюзии, многовариантную перспективу, изменение контраста и градиента структуры, двигательный параллакс и др. [2]. Оценка человеком происходит постоянно: когда он неподвижен и когда перемещается по визуальному миру, содержащему неподвижные и движущиеся объекты. В естественных условиях человек достаточно точен в определении направлений, расстояний и размеров объектов, а также при маневрировании или управлении транспортными средствами. В случаях ухудшения визуальных условий из-за неблагоприятной погоды или низкого уровня освещённости могут возникать ошибки в пространственных суждениях. Восприятие визуальной среды также может ухудшаться при просмотре через различные устройства наблюдения, например телескопы, перископы, бинокли, которые сильно ограничивают поле зрения, тем самым скрывая периферию. Точно так же и изображения с удалённых видеокамер и датчиков, представленные на дисплее, теряют множество мелких подробностей. Такие факторы могут снизить информационный контент визуальной сцены по сравнению с прямым просмотром человеком в условиях окружающей среды.

Цель данной работы — проведение серии экспериментов и их описание для оценки вероятного влияния устройства просмотра, в нашем случае мультифокального 3D-дисплея, на визуальное восприятие пользователя, особенно в оценке глубины и размеров объектов.

Существенными характеристиками визуального восприятия глубины объектов являются размер и расстояние, которые связаны между собой. Хотя наблюдатель не может явно оценить размер или расстояние просматриваемого объекта в физических единицах, но он вполне может сравнивать их с эталонным объектом.

Константность зрительного восприятия. Предполагается, что воспринимаемый размер объекта базируется на образуемом им угловом размере на сетчатке наблюдателя. Расстояние до объекта и его фактические размеры влияют на воспринимаемый размер. Закон угла поля зрения подтверждает, что оценка размера объекта будет основана исключительно на образуемом им угле обзора. В [3] показано, что воспринимаемый размер объекта зависит не только от размера изображения, которое он проецирует на сетчатку, но и от расстояния до него. Изображение объекта заданного размера на фиксированном расстоянии, проецируемое на сетчатку, всегда остаётся неизменным. Когда расстояние наблюдения до объекта уменьшается, его изображение на сетчатке увеличивается, но при этом наблюдатель не считает, что объект становится более крупным. Например, мишень диаметром 1 м с расстояния 10 м будет казаться того же размера, что и при просмотре с расстояния 20 м, несмотря на то что угол поля зрения уменьшили в 2 раза. Визуальный опыт наблюдателя состоит в том, что мишень не становится вдвое меньше на дальнем расстоянии, а будет примерно такого же размера. На любом расстоянии мишень остаётся для наблюдателя более или менее того же размера; восприятие постоянного размера сохраняется в отличие от размера изображения на сетчатке глаза, изменяющегося очень сильно.

Оптическая схема исследуемого мультифокального 3D-дисплея. Кардинальным решением согласования аккомодации и конвергенции глаз в 3D-дисплеях является обеспечение мультифокальности в стереодисплеях [4–6].

Для согласования дистальных стимулов глубины — конвергенции и аккомодации глаз — разработан в Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН совместно с филиалом Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологическим институтом прикладной микроэлектроники» и ООО «Софтлаб-НСК» стереоскопический дисплей с бифокальными окулярами [7]. Каждый окуляр содержит две микродисплейные матрицы на органических светодиодах, изображения которых комбинируются с помощью светоделительного кубика. Таким образом, объёмное изображение представлено четырьмя SVGA-изображениями [8]. В [4, 9] показано, что при дифракционном анализе линейной комбинации двух планов изображений глаз аккомодирует на пиковое значение аксиальной интенсивности при любых аберрациях оптической системы «окуляр + глаз». Однако при этом возникают большие потери контраста — от 10 до 45 % [10]. Более того, при различных размерах зрачка глаза интенсивность полусумм тоже меняется, так как глаз является одним из компонентов дисплея (комбинирование интенсивностей планов-изображений происходит на сетчатке). В [11] приведён способ повышения контраста комбинированных изображений в трёхмерных дисплеях при диаметре зрачка 3 мм на модели глаза Атчисона. На рис. 1 дана схема, состоящая из модели двухпланового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком a , позволяющая обеспечить соответствие между аккомодацией и конвергенцией глаз.

Окуляр содержит два плоских изображения $P1$ и $P2$ и с помощью линзы L формирует их мнимые изображения. Благодаря светоделительному кубику S мнимые изображения $P1$ и $P2$ оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ . Излучения элементов изображений $P1$, $P2$ фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений $p1$ и $p2$ таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в области фовеа q . Данный дисплей относится к иммерсивному (создающему эффект погружения, наблюдатель видит только виртуальное формируемое изображение) типу. Изображения с

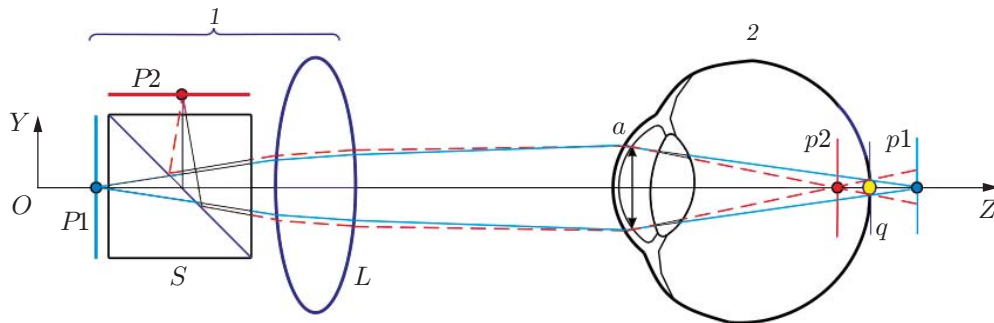


Рис. 1. Формирование объёмного изображения, стимулирующего аккомодацию, на сетчатке глаза (1 — биплановый окуляр, 2 — модель глаза, a — входной зрачок)

двух микродисплеев, пройдя через светоделительный кубик и окуляр, попадают на сетчатку человеческого глаза. Объёмность изображения достигается за счёт стереоизображения и разноудалённых от светоделительного кубика микродисплеев.

Для формирования изображения на микродисплейных матрицах $3D$ -дисплея использовалось разработанное авторами специализированное программное обеспечение, порождающее одновременно четыре изображения: по одному для каждой из фокальных плоскостей каждого окуляра.

Коэффициенты линейной комбинации планов вычисляются для каждого пиксела по формуле, приведённой в [4, 9]; изображения для фокальных плоскостей формируются исходя из карты этих коэффициентов. Для вычисления коэффициентов требуется расстояние до поверхности объекта для каждого пиксела. Это расстояние находится из значения, доступного в Z -буфере (буфере глубины), обычно используемом для определения видимости.

Программное обеспечение работает в реальном времени и позволяет с помощью клавиатуры и мыши переключаться между коридорами, менять размеры переменного стимула, перемещать эталонный стимул.

Приоритетом данной работы является анализ влияния разработанного мультифокального $3D$ -дисплея на визуальное восприятие пользователя в оценке глубины и размеров объектов.

Методика и результаты экспериментальных исследований. На вышеописанном дисплее проводилась серия экспериментов [3], доказавших, что в восприятии признаков расстояния решающая роль принадлежит константности восприятия размера: зависимость между величиной переменного стимула и удалённостью эталонного стимула. Константность восприятия размера объекта зависит от точности оценки наблюдателем удалённости до этого объекта. При проведении эксперимента испытуемый сидел на площадке пересечения двух коридоров. В первом коридоре на расстоянии 2 м от испытуемого находился переменный стимул — световое пятно, размер которого испытуемый мог регулировать. Во втором коридоре на расстояниях от испытуемого (от 3 до 36 м) предъявлялся эталонный стимул — световое пятно, реальные размеры которого менялись вместе с расстоянием так, что оно всегда имело один и тот же угловой размер, т. е. размер сетчаточного образа был каждый раз одинаковым (чем ближе было пятно к испытуемому, тем меньше были его размеры).

Перед испытуемым стояла задача подобрать размер переменного стимула так, чтобы он казался равным эталону.

Предлагались 4 варианта сформированного пространства в условиях:

- 1) бинокулярного зрения (можно двигать головой, освещение нормальное);

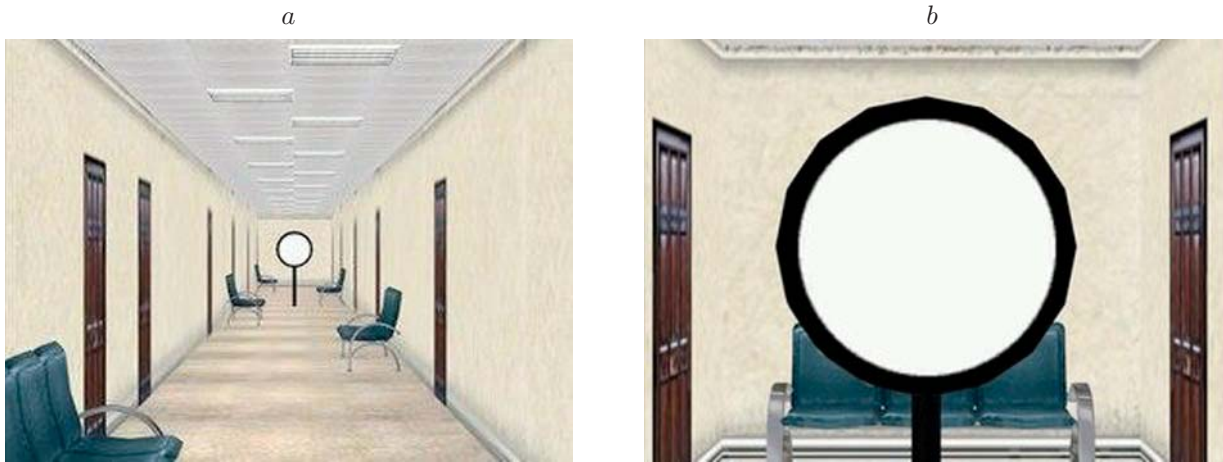


Рис. 2. Сформированное коридорное пространство с мишенями: *a* — коридор с эталонным стимулом — мишенью, размеры которой меняются с расстоянием; *b* — коридор с переменным стимулом — мишенью, размеры которой испытуемый мог регулировать

2) монокулярного наблюдения (один глаз закрыт, можно двигать головой, освещение нормальное); это исключает все бинокулярные признаки, например диспаратность;

3) монокулярного наблюдения через искусственный зрачок, т. е. маленькую дырочку (поскольку нет движений глаз и головы, такое наблюдение исключает монокулярный параллакс и линейную перспективу);

4) затемнённого помещения.

Результаты эксперимента показали, что константность восприятия величины объекта наблюдается в том случае, когда присутствует надёжная информация об его удалённости. При исключении этой информации восприятие становится аконстантным и базируется на угловых размерах объекта.

Основной целью экспериментов в данной работе являлась проверка соответствия формируемого пространства в дисплее естественному восприятию и данных эксперимента полученным в ходе исследований в [3]. В первом случае источник света (мишень) помещался в ограниченное пространство и удалялся от наблюдателя на некоторое расстояние, причём размер мишени в каждом случае менялся. Наблюдатель, в свою очередь, должен был примерно оценить размер мишени. Измерения проходили в хорошо освещённом пространстве и в темноте. Во втором случае проводились аналогичные опыты, но без изменения размера источника.

На рис. 2, *a* представлен первый коридор, в котором перемещалась мишень, и второй коридор (рис. 2, *b*) с мишенью, размер которой испытуемый должен был выставить исходя из своего восприятия размера мишени в первом коридоре.

По результатам экспериментов с пятью испытуемыми были построены графики зависимостей воспринимаемого размера мишени от расстояния до мишени. Измерения каждым испытуемым проводились 5 раз, результаты усреднялись, и на графиках отмечался разброс полученных значений.

На рис. 3, *a* линией Ideal показано фактическое изменение размера мишени в зависимости от расстояния, на которое она отнесена от наблюдателя. Испытуемый выставлял размер мишени, находящейся во втором коридоре, в соответствии с размером мишени, которую он наблюдал в первом коридоре. Мишень удалялась на расстояние 2, 4, 8, 16, 32 метра. Размер мишени изменялся, но при этом угловой размер её оставался постоянным. По кривым 1–5 видно, что наблюдатели фиксировали увеличение размеров объекта

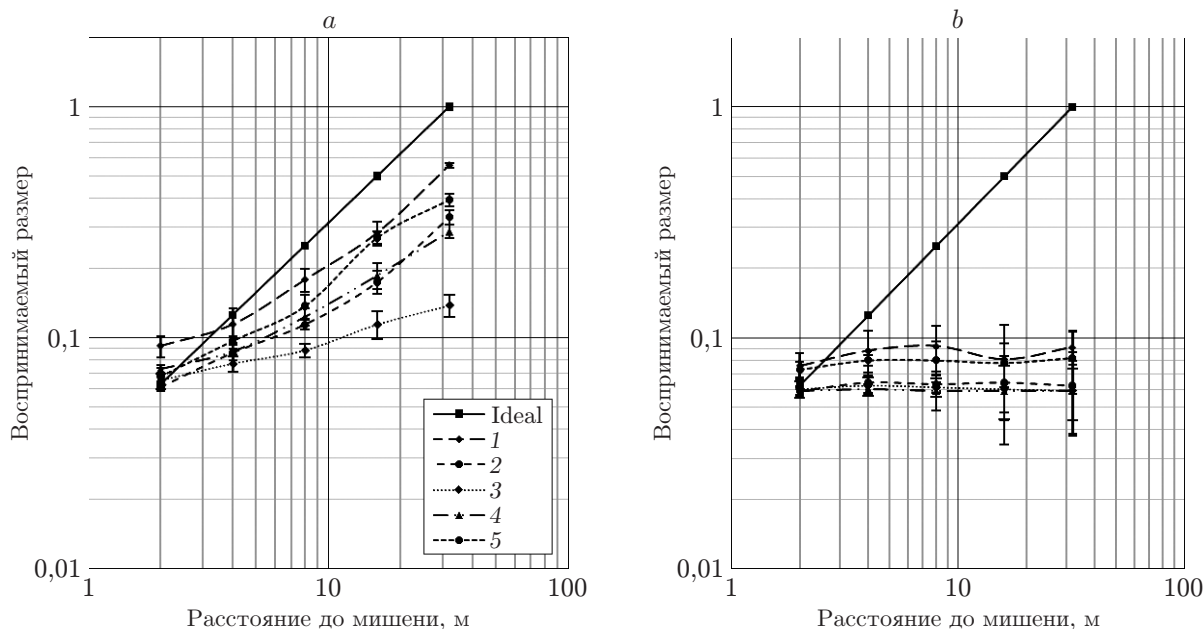


Рис. 3. Графики зависимостей воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до неё при постоянном угловом размере мишени: *a* — в условиях хорошей освещённости пространства; *b* — в условиях полной темноты

(это объясняется тем, что в условиях хорошей освещённости есть с чем визуально сравнивать размеры мишени относительно кресел, дверей, ламп освещения).

На рис. 3, *b* приведены графики (в отличие от рис. 3, *a*) по результатам, полученным в условиях темноты, но также с постоянным угловым размером мишени. Линией *Ideal* показано фактическое изменение размера мишени в зависимости от расстояния, на которое она отнесена от наблюдателя. По кривым 1–5 видно, как наблюдатели фиксировали постоянство размеров объекта. Это объясняется тем, что при отсутствии освещённости они не имели возможности визуально сравнивать размеры мишени с предметами, расположенными в коридоре, и основывались лишь на своих оценках размеров мишени, спроецированной на сетчатку глаза.

Показанные на рис. 4, *a* графики основаны на полученных результатах, снятых в освещённом пространстве (коридоре) с постоянным линейным размером мишени, но при этом с увеличением расстояния до мишени угловой размер её уменьшался, как и проецируемое изображение на сетчатке глаза. Расстояния удаления от испытуемого сохранились такими же, как и в первых двух случаях (2, 4, 8, 16, 32 м). По кривым 1–5 видно, как наблюдатели стабильно фиксировали уменьшение размеров мишени пропорционально увеличению расстояния. Однако один из наблюдателей отмечал лишь слабое уменьшение размера, при этом у остальных наблюдателей размер мишени практически совпадал с её угловым размером.

На рис. 4, *b* представлены графики по результатам, сформированным в условиях темноты, но также с постоянным размером мишени и уменьшающимся угловым размером. Линией *Ideal* показано фактическое изменение углового размера мишени в зависимости от расстояния, на которое она отнесена от наблюдателя. По кривым 1–5 видно, как наблюдатели фиксировали уменьшение объекта в размерах. Здесь данные практически совпадали с угловым размером мишени в отличие от случая с освещённым коридором, когда наблюдателям казалось, что мишень лишь слегка уменьшается в размерах.

Данные серии экспериментов также повторялись в монокулярном режиме, результаты

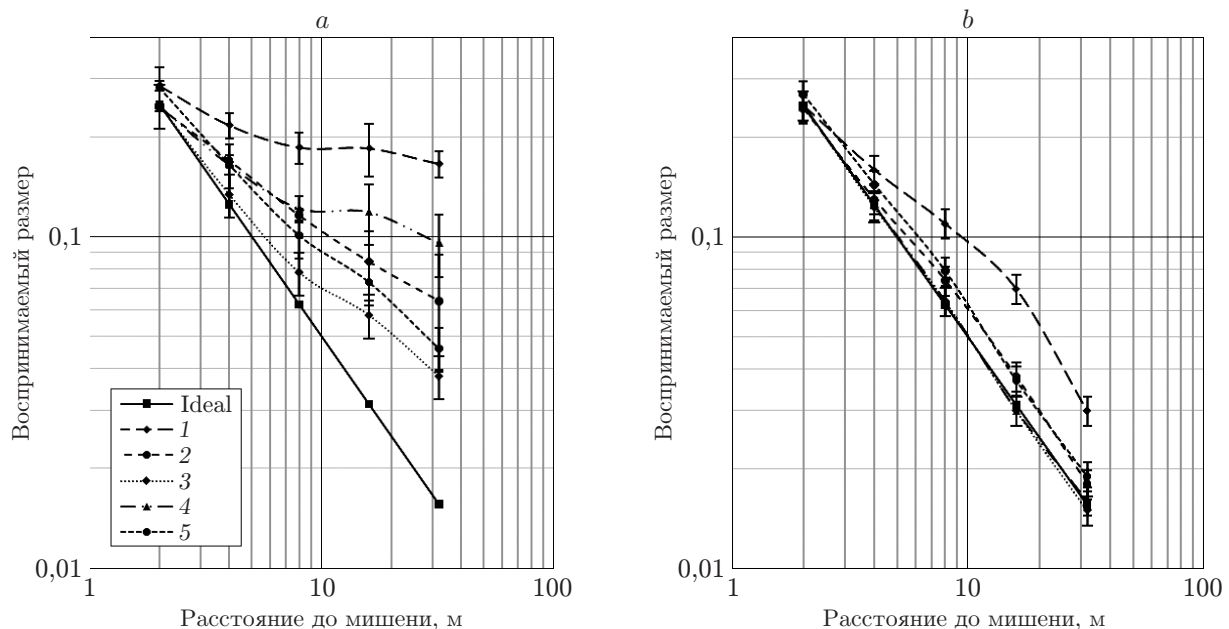


Рис. 4. Графики зависимостей воспринимаемого наблюдателем размера мишени от расстояния до неё при постоянном размере мишени (при этом угловой размер мишени уменьшается с увеличением расстояния до неё): *a* — в условиях хорошей освещённости пространства; *b* — в условиях темноты

которых совпадали с измерениями, проведёнными в бинокулярном режиме. Испытуемые отмечали, что изображение оставалось объёмным, и они отчётливо ощущали перемещение мишени по глубине. Это существенно отличает мультифокальные *3D*-дисплеи от стереоскопических.

Заключение. Проведённая серия экспериментов показывает, что мультифокальные *3D*-дисплеи предоставляют достаточно надёжную информацию об удалённости и размерах предметов, что позволяет не нарушать закона константности восприятия, установленного в [3]. Воспринимаемый размер объектов зависит от размера изображения на сетчатке глаза, а также от проксимальных сигналов для глубины. Значение угла обзора в качестве сигнала для размера и расстояния усиливается, когда доступность других сигналов уменьшается. В нашем эксперименте данный эффект наблюдался при выключении света в коридоре. Это обеспечивает чёткую теоретическую основу для понимания вероятного влияния мультифокальных *3D*-дисплеев на пространственное восприятие человека. Способность человека оценивать глубину пространства является результатом множества перекрывающихся сигналов из окружающей среды и, таким образом, сложным процессом. Хотя закон постоянства размеров гласит, что физический размер объекта правильно воспринимается независимо от его расстояния до наблюдателя или размера изображения, которое он проецирует на сетчатку, тем не менее эта связь сохраняется только тогда, когда доступна достаточная информация о пространственной глубине. Существуют факторы, которые ухудшают восприятие глубины через *3D*-дисплей по сравнению с невооружённым глазом, включающие в себя снижение остроты зрения, контрастную чувствительность, стереопсис и малый угол поля зрения, а также, вероятно, другие факторы, связанные с особенностями формирования изображений. В дальнейшем исследовании необходимо распространить на естественные условия, более широкий диапазон расстояний и иметь полную картину атрибутов окружающей среды, которые могут влиять на суждения человека о глубине отображаемого пространства и размерах предметов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания «Опτικοинформационные технологии и системы прецизионного контроля физических и пространственных характеристик трёхмерных объектов» (государственная регистрация № АААА-А17-117121270018-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шиффман Х.** Ощущение и восприятие. С.-Пб.: Питер, 2003. 928 с.
2. **Высоков И. Е.** Психология познания. М.: Издательство Юрайт, 2019. 399 с.
3. **Holway A. H., Boring E. G.** Determinants of apparent visual size with distance variant // The Amer. Journ. Psychol. 1941. **54**, N 1. P. 21–37.
4. **Ковалев А. М.** О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 86–94.
5. **Shibata T., Kim J., Hoffman D. M., Banks M. S.** The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays // Journ. Vis. 2011. **11**, Iss. 8. P. 1–29.
6. **Kim J., Kane D., Banks M. S.** The rate of change of vergence-accommodation conflict affects visual discomfort // Vis. Res. 2014. **105**. P. 159–165.
7. **Ковалев А. М., Кравченко Ю. Л., Хрящев С. В. и др.** Бифокальный объёмный стереоскопический дисплей // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «Гео-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, Ч. 1. С. 94–97.
8. **Власов Е. В., Ковалев А. М.** 3D-дисплей с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции // Приборы. 2014. № 12 (174). С. 28–30.
9. **Ковалев А. М., Власов Е. В.** Дифракционная глубина трёхмерных изображений, стимулирующих аккомодацию глаза // Автометрия. 2014. **50**, № 1. С. 3–8.
10. **Власов Е. В., Ковалев А. М.** О контрасте комбинированных изображений в 3D дисплеях, стимулирующих аккомодацию глаза // Сб. матер. Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2014». Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 45–48.
11. **Власов Е. В.** Способы повышения контраста комбинированных изображений и линейности стимула аккомодации глаза в мультифокальных трёхмерных дисплеях // Автометрия. 2018. **54**, № 3. С. 78–84.

Поступила в редакцию 10.07.2019

После доработки 25.10.2019

Принята к публикации 06.11.2019