

УДК 004.922, 004.932

О ДИСПЛЕЯХ ПЕРСОНАЛЬНОГО ПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ВИРТУАЛЬНЫХ СРЕД С ДОБАВЛЕННОЙ РЕАЛЬНОСТЬЮ

А. М. Ковалев

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru*

Рассматриваются наголовные дисплеи для оптико-информационных систем коллективного пользования трёх типов: ретрорефлективные, иммерсивные и просветные. Показано преимущество просветных дисплеев, снабжённых измерителями дальности реальных предметов и окклюзивными масками для корректной интерпозиции и окклюзии виртуальных и реальных предметов среды.

Ключевые слова: наголовные дисплеи, виртуальные среды, окклюзия, комфортное зрительное восприятие, стимулы аккомодации.

Введение. Задача создания инструментов и инфраструктур, которые позволяли бы множеству пользователей на локальном и удалённом уровнях эффективно выполнять совместную работу, до сих пор не решена в полном объёме. В [1–3] рассматриваются оптико-информационные системы коллаборации на основе стереоскопических виртуальных сред ретрорефлективного и иммерсивного типов. Такие системы дают возможность: 1) видеть виртуальную среду каждому из пользователей с помощью наголовных дисплеев в индивидуальной перспективе; 2) иметь равный и естественный доступ к выполняемой визуальной задаче; 3) воспринимать присутствие в среде реальных предметов и локальных коллаборантов; 4) осуществлять коммуникацию вербальным и невербальным способами.

Вместе с тем в концептуальных моделях известных систем обнаруживается недостаточный учёт психофизических особенностей зрительного восприятия человека, прежде всего, на малых расстояниях — в пределах рабочей виртуальной комнаты. Это касается и достоверного отображения визуальных сцен с использованием перцептивной перспективы [4, 5], и условий для комфортного восприятия стереоизображений путём создания стимулов аккомодации глаз [6]. Системы с добавленной реальностью требуют корректной окклюзии и интерпозиции виртуальных и реальных предметов. Необходимо обеспечить тактильное восприятие для захвата и перемещения виртуальных предметов. Практически не решён вопрос о представлении в среде удалённых пользователей, например, в виде аватаров [7].

Цель предлагаемой работы — анализ структурных схем наголовных дисплеев и их возможных модификаций, необходимых для применения в виртуальных средах с добавленной реальностью.

Ретрорефлективная виртуальная среда. Виртуальная среда SCAPE (Stereoscopic Collaboration in Augmented and Projective Environments) разработана в оптическом колледже университета Аризоны в Туксоне [1] и является развитием идеи виртуальной комнаты CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), предложенной лабораторией электронной визуализации университета Иллинойса в Чикаго в 1992 году [2].

Система SCAPE «размещается» в комнате $3,6 \times 3,6 \times 2,7$ м, стены которой оклеены ретрорефлективным материалом, отражающим падающий свет. Посередине комнаты уста-

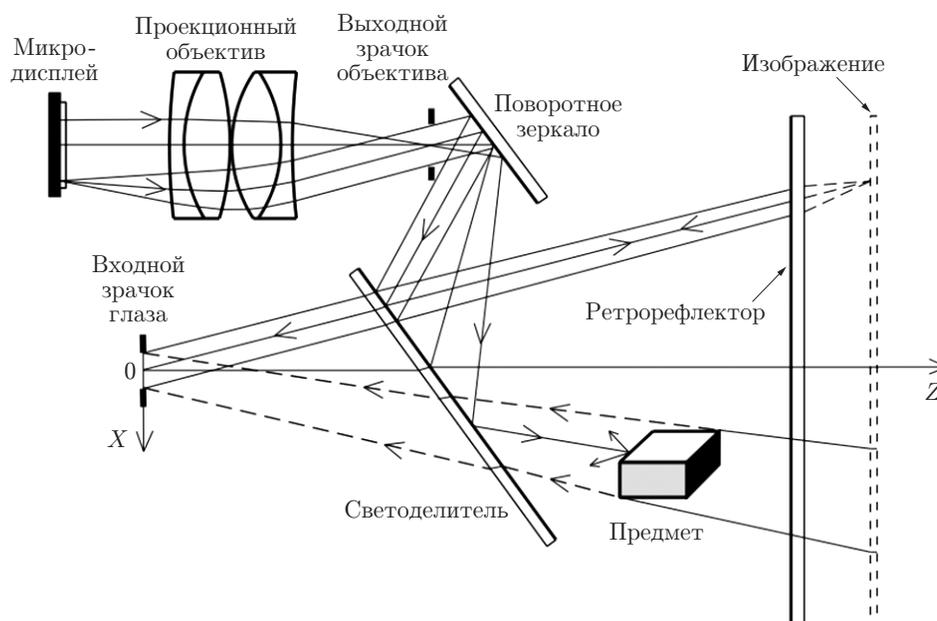


Рис. 1. Схема ретрорефлективного наголовного дисплея

новлен рабочий стол с ретрорефлективным покрытием размером $1,5 \times 0,9$ м. Каждый пользователь снабжён наголовным дисплеем (рис. 1), который позволяет видеть пространство в собственной перспективе согласно своему положению и направлению взгляда. Разные пользователи видят неискажённо виртуальные предметы, а поэтому могут работать с ними совместно. Кроме того, они видят друг друга, реальные предметы на рабочем столе и могут общаться.

Наголовный дисплей содержит микродисплей для воспроизведения виртуальной сцены, проекционный объектив, поворотное зеркало (необязательно) и светоделительную пластину, ориентированную таким образом, чтобы выходной зрачок объектива и входной зрачок глаза были зеркальным отражением друг друга. В этом случае свет проецируется на стенки комнаты как бы из глаза наблюдателя и возвращается обратно в глаз после ретрорефлективного отражения. Действительное изображение виртуальных предметов формируется на некотором «воздушном» экране в соответствии с фокусным расстоянием объектива и положением микродисплея на оптической оси.

Поскольку светоделительная пластина полупрозрачная, наблюдатель легко видит реальные предметы, расположенные перед ретрорефлектором. Если предмет непрозрачен, то затеняются все виртуальные предметы, расположенные за ним. Таким образом, выполняется корректная самостоятельная окклюзия, но сам предмет оказывается подсвеченным виртуальными предметами. И это один из недостатков схемы. Другой состоит в том, что если возникает необходимость отобразить виртуальный предмет перед реальным, необходимо второй покрывать ретрорефлективным материалом.

В целом система SCAPЕ удовлетворяет поставленным задачам коллаборации. Достоинством является естественное зрительное восприятие реальных предметов. При восприятии виртуальных предметов остаётся визуальный дискомфорт: конфликт между конвергенцией и аккомодацией, усталость глаз и головная боль при длительной работе со стереоскопическими однофокусными изображениями.

При реализации системы возникают дополнительные трудности, связанные с использованием имеющихся ретрорефлективных материалов [8]. Производится два сорта материалов: матрицы с микрошариками и с микропризмами, у которых три грани взаимно перпендикулярны. Характерный размер элемента матриц ~ 80 мкм.

Доступные материалы оптимизированы не для формирования изображений высокого разрешения, а для обеспечения, например, безопасности дорожного движения. Они отражают свет фар от дорожных знаков назад к водителю, и поэтому лучи идут под углом ω по отношению к падающим лучам (в среднем $\omega \approx 3^\circ$). Это приводит к тому, что воспринимаемые размер и глубина отражённого изображения, а также размер выходного зрачка и его положение зависят не только от угла наблюдения, но и от глубины проекции и расстояния до рефлектора. Параметры меняются по полю зрения, возникает виньетирование, зрительное поле нестабильно. Наблюдаются артефактные явления и уширение пятна на $\Delta\omega \approx 20$ угл. мин как результат дифракции на микроструктуре матриц.

Ретрорефлективная виртуальная среда требует разработки совершенных ретрорефлективных зеркал для построения изображений (с нулевым углом отражения ω и минимумом дифракции на структуре зеркала $\Delta\omega < 2-5'$), а также создания дисплеев со стимулами аккомодации.

Иммерсивная виртуальная среда. Созданная на основе иммерсивных наголовных дисплеев и стереокамер виртуальная среда является воплощением идеи смешанной реальности (Mixed Reality), разработанной японской фирмой "Canon" [3].

На рис. 2 показана структурная схема монокулярного блока наголовного стереодисплея, содержащая микродисплей для воспроизведения компьютерных комбинаций изображений виртуально-реального мира и призмный окуляр, имеющий, по меньшей мере, одну анаморфотную поверхность. Предметы реального мира через клиновидную призму с отражающей задней и полупрозрачной передней поверхностями воспринимает объектив камеры, видеосигналы от которой поступают на обработку в компьютер. Клиновидная призма способствует приближению центра проекции объектива к оптическому центру глаза. В простейшем случае компьютер накладывает изображение виртуальных предметов на изображение от видеокамеры и в итоге получают комбинированные изображения.

В системе "Mixed Reality" попытались решить задачу достоверной интерпозиции виртуальных и реальных предметов. Для этого на реальные предметы, находящиеся в области визуального интереса, наклеиваются маркеры в виде бинарных мозаик, что упрощает программный поиск соответственных точек на стереопарах, полученных видеокамерами, ускоряет 3D-реконструкцию реальных предметов и обеспечивает их взаимодействие с вир-

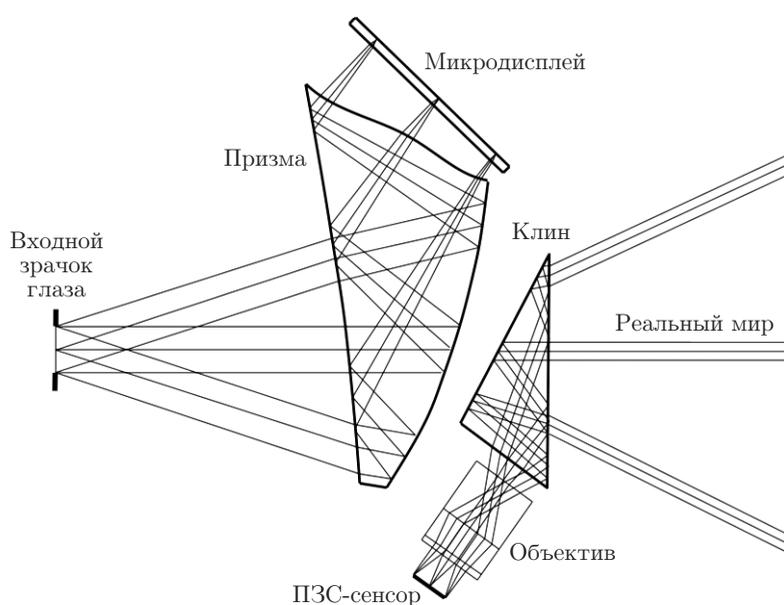


Рис. 2. Схема иммерсивного наголовного дисплея с видеокамерой



Рис. 3. Использование маркеров: *a* — реальные предметы; *b* — видимая комбинация предметов

туальными предметами (рис. 3). К сожалению, предложенный вариант не является общим, потому что «маркировать» весь реальный мир невозможно.

Другая проблема представляется более серьёзной. Известно, что изображение окружающей среды, получаемое от камеры, снабжённой оптическим объективом, не соответствует естественному зрительному восприятию той же среды человеком [4]. Показано, что искажения масштабов предметов и глубины пространства могут достигать десятков процентов как на малых, так и на больших расстояниях. Ошибки происходят из-за того, что объектив камеры строит двумерное изображение с фиксированным фокусным расстоянием (техническое зрение), в то время как зрительная сенсорная система формирует трёхмерное изображение, работая с переменным фокусным расстоянием (когнитивное зрение) [5]. Ещё одна проблема — это визуальный дискомфорт, потому что в системе «Mixed Reality» нет ни программных, ни оптических средств генерации стимулов аккомодации [6]. И, наконец, стоимость «Canon Mixed Reality» 125000 долл. чрезвычайно высока.

Для решения этих проблем предлагается схема, показанная на рис. 4. Дисплейная часть схемы содержит микродисплей для воспроизведения виртуально-реальной сцены, мультифокальный проекционный объектив с поворотным зеркалом, светоделительную пластину и непрозрачное вогнутое зеркало, проецирующее комбинированную сцену через входной зрачок в глаз наблюдателя. Монокулярный дисплей оснащён видеокамерой и КМОП-сенсором глубины. При этом реальная сцена представляется в формате $XYZ RGB$, где XYZ — положение точки, а RGB — цвет точки. Точно в таком же формате и в такой же проекции можно представить и компьютерную виртуальную сцену. Процедуры удаления невидимых поверхностей и формирования стимулов аккомодации могут работать над общим потоком данных, содержащим и реальные, и виртуальные предметы, что гарантирует достоверную интерпозицию-окклюзию предметов и отсутствие дискомфорта при проективном преобразовании, характерном для технического зрения.

Отметим, что необходимые для схемы сенсоры глубины уже получили распространение в виде недорогих матричных дальномеров, функционирующих в реальном времени. Это времяпролётные Z -камеры [9] и сенсоры со структурным освещением [10], работающие с планшетами «Nexus10» и «iPad». Характерной особенностью сенсоров является использование ИК-подсветки и КМОП-приёмников, что и отражено на рис. 4.

Иммерсивная виртуальная среда имеет преимущества перед ретрорефлективной средой, но требует создания быстродействующих мультифокальных проекционных объекти-

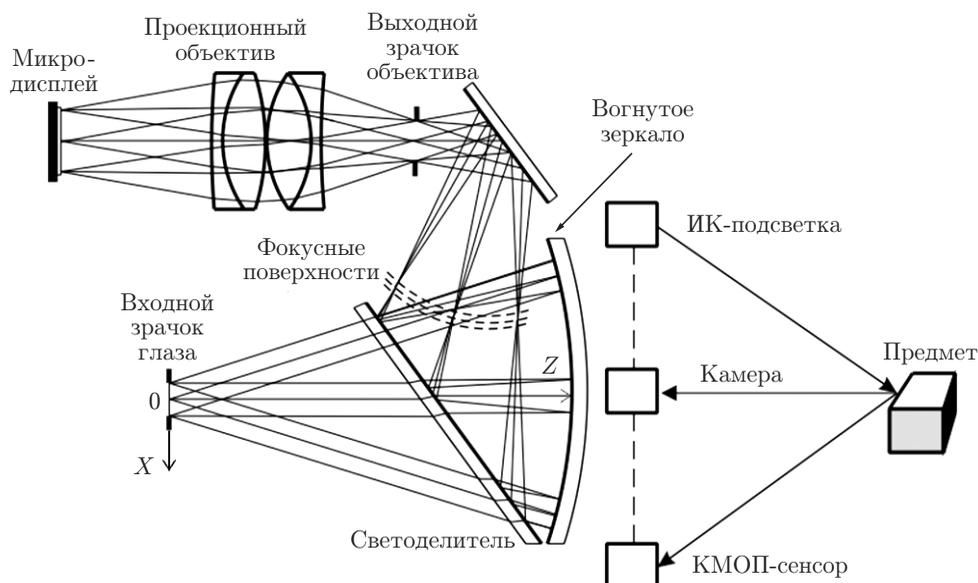


Рис. 4. Схема иммерсивного наголовного дисплея с измерителем дальности и видеочкамерой

вов и носимых на голове дальномеров с малыми весогабаритными параметрами. Единственный недостаток — это искажение естественного зрительного восприятия виртуальной среды с добавленной реальностью.

Просветная виртуальная среда. Концепция просветной среды возникла как альтернатива ретрорефлективным средам, которые трудно реализовать из-за отсутствия материалов для получения оптических изображений высокого качества. Просветная среда, как и ретрорефлективная, позволяет зрителю видеть реальные объекты и обеспечивает естественное когнитивное зрительное восприятие реальных предметов.

На рис. 5 показана концептуальная схема просветного наголовного дисплея, содержащая микро-дисплей для воспроизведения виртуальной сцены, проекционный объектив

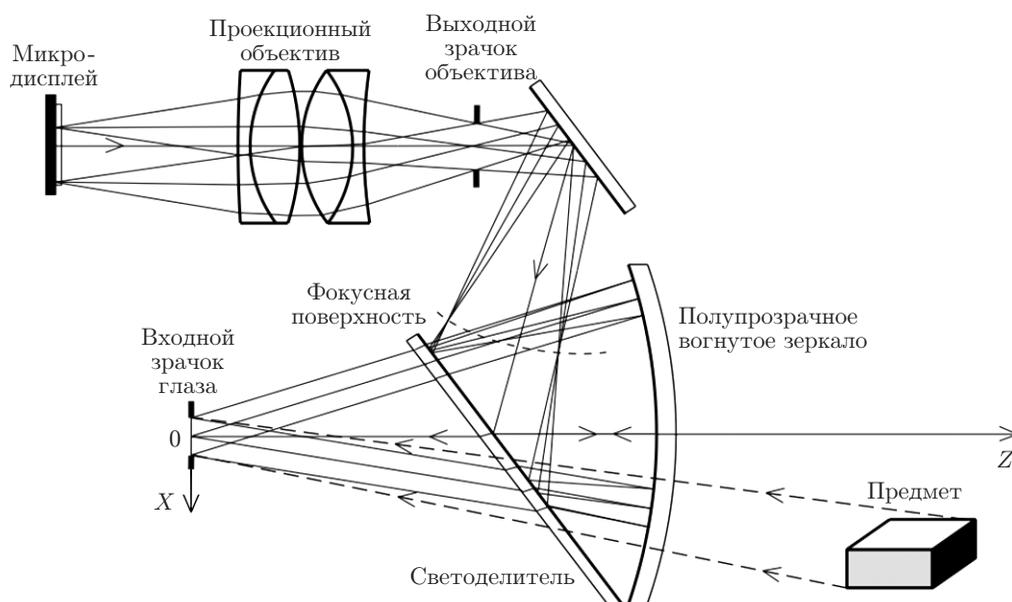


Рис. 5. Схема просветного наголовного дисплея



Рис. 6. Изображения на просветных дисплеях: *a* — 3D-модели (фирма "Laster"); *b* — навигационная информация (фирма "OdaLab")

с поворотным зеркалом и зеркальный окуляр. Окуляр состоит из светоделительной пластины и полупрозрачного вогнутого зеркала, проецирующего виртуальную сцену через выходной зрачок в глаз наблюдателя.

Поскольку светоделитель и вогнутое зеркало полупрозрачные, то наблюдатель легко видит и реальные предметы окружающей обстановки. Но в отличие от ретрорефлективной среды непрозрачные предметы не могут выполнять функцию автоматической окклюзии, т. е. закрывать следующие за ними по глубине виртуальные предметы. Таким образом, в традиционных просветных дисплеях главный косвенный стимул глубины предметов теряется. Обычно дисплеи выпускают в виде носимых очков (фирмы "Google", "Laster", "Olympus", "Lumus" и другие), которые отображают вспомогательную информацию в виде 3D-моделей (рис. 6, *a*), символическую и/или навигационную информацию (рис. 6, *b*) и т. д. Из-за отсутствия корректной глубины виртуальные картинке воспринимаются всегда на фоне реального предметного окружения.

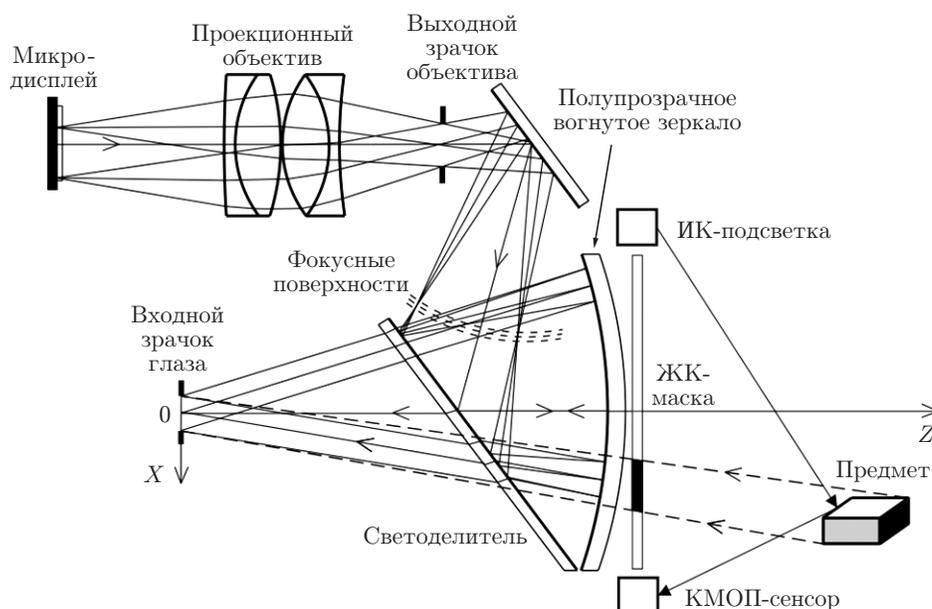


Рис. 7. Схема просветного наголовного дисплея с измерителем дальности и окклюзивной маской

Чтобы устранить отмеченный недостаток, предлагается следующая технология.

1. Встроить в наголовный дисплей сенсор глубины, измеряющий координаты положения X , Y и дальности Z реальных предметов (рис. 7).

2. При формировании виртуальной сцены в процедуре удаления невидимых поверхностей сцены методом Z -буфера учесть координаты реальных предметов с цветом нулевой яркости. В результате в тех позициях экрана, где должен появиться реальный предмет, возникнет его чёрная виртуальная тень, закрывающая все виртуальные предметы, следующие за ней. Свет от реального предмета заполнит эту тень, обеспечив тем самым корректную окклюзию.

Корректное отображение виртуальных предметов, находящихся перед реальными предметами, может быть выполнено с помощью одноразрядной жидкокристаллической маски, имеющей пиксельное разрешение по полю зрения. На том участке поля, где нужно изобразить виртуальный предмет, маской создаётся тень для реального предмета.

Наличие просветного режима наголовных дисплеев весьма актуально, так как позволяет настраивать и калибровать проективное преобразование виртуальной среды с тем, чтобы воспринимаемый образ виртуальных предметов совпадал с их реальными прототипами для естественного когнитивного зрительного восприятия.

В целом система с просветной виртуальной средой имеет преимущества перед ретрорефлективной и иммерсивной средами и удовлетворяет поставленным задачам коллаборации в наибольшей степени.

Заключение. В данной работе проведён анализ структурных схем наголовных дисплеев для виртуальных сред трёх типов: ретрорефлективной, иммерсивной и просветной. Показано, что для получения высококачественных изображений ретрорефлективная виртуальная среда требует разработки более совершенных оптических зеркал, отражающих свет с нулевым углом и минимумом дифракции на структуре зеркала. Для достижения глобальной интерпозиции-окклюзии реальных и виртуальных предметов в иммерсивной виртуальной среде предложено встроить в наголовный дисплей не только видеокамеры, но и сенсоры глубины. Для устранения некорректной окклюзии реальных и виртуальных сцен в просветной виртуальной среде потребуется добавить в наголовный дисплей сенсор глубины реальных предметов и окклюзивную маску. Для обеспечения визуального комфорта в любой из виртуальных сред необходима дальнейшая разработка многоплановых, мультифокальных наголовных стереодисплеев, стимулирующих аккомодацию глаз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hua H., Brown L. D., Gao C. SCAPE: Supporting stereoscopic collaboration in augmented and projective environments // IEEE Comput. Graph. and Appl. 2004. **24**, N 1. P. 66–75.
2. Cruz-Neira C., Sandin D. J., DeFanti T. A. Surround-screen projection-based virtual reality: The design and implementation of the CAVE // SIGGRAPH'93: Proc. of the 20th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. N. Y.: ACM, 1993. P. 135–142.
3. MR (Mixed Reality) System. URL: <http://www.canon.com/technology/approach/special/mr.html> (дата обращения 13.05.2014).
4. Ковалев А. М. О моделях визуального пространства // Оптика и спектроскопия. 2006. **100**, № 1. С. 134–141.
5. Ковалев А. М., Лищенко В. Е., Степанов М. В. О системах перспектив для компьютерной графики // Автометрия. 2007. **43**, № 3. С. 48–56.
6. Ковалев А. М., Власов Е. В. О качестве трёхмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 33–40.

7. **Бартош В. С., Белого И. В., Лаврентьев М. М., Травина И. А.** Полёты в виртуальности и наяву // Наука из первых рук. 2013. **49**, № 1. С. 7–21.
8. **Hua H., Girardot A., Gao C., Rolland J. P.** Engineering of head-mounted projective displays // Appl. Opt. 2000. **39**, N 22. P. 3814–3824.
9. **Chiabrando F., Piatti D., Rinaudo F.** New sensors for cultural heritage metric survey: the ToF cameras // CIPA Heritage Documentation. URL: <http://cipa.icomos.org/fileadmin/template/doc/PRAGUE/124.pdf> (дата обращения 13.05.2014).
10. **Occipital.** URL: <http://occipital.com> (дата обращения 13.05.2014).

Поступила в редакцию 13 мая 2014 г.
