

# Эффективный метод восстановления освещения в системах смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены

Н.Н. Богданов<sup>1</sup>, И.С. Потемин<sup>1</sup>, Д.Д. Жданов<sup>1</sup>, А.Д. Жданов<sup>1</sup>, М.И. Сорокин<sup>1</sup>  
nrbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|ddzhdanov@mail.ru|andrew.gtx@gmail.com|vergotten@gmail.com  
<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

*Одна из основных проблем устройств смешанной реальности – физически правильное представление распределения яркости для виртуальных объектов и их теней в реальном мире. Другими словами, восстановление корректного распределения яркости сцены является одним из ключевых параметров, позволяющих решить проблему корректного взаимодействия между виртуальным и реальным мирами, однако нейронные сети не позволяют определить положение источников света, которые не находятся в прямой видимости. В работе предлагается метод восстановления параметров источников освещения исходя из анализа теней, отбрасываемых объектами. Приводятся результаты работы предложенного метода, оценивается точность восстановления положения источников света и демонстрируется визуальное отличие изображения сцены с исходными источниками света от этой же сцены с восстановленными параметрами источников света.*

**Ключевые слова:** смешанная реальность, распределение яркости, изображение в широком динамическом диапазоне, 3D-сцена, дополненная реальность, восстановление положения источника света, непрямоe освещение, прямоe освещение, точечный источник света.

## The efficient method of illumination restoration in mixed reality systems with use of HDR image of 3D scene

N.N. Bogdanov<sup>1</sup>, I.S. Potemin<sup>1</sup>, D.D. Zhdanov<sup>1</sup>, A.D. Zhdanov<sup>1</sup>, M.I. Sorokin<sup>1</sup>  
nrbogdanov@corp.ifmo.ru|ipotemin@yandex.ru|ddzhdanov@mail.ru|andrew.gtx@gmail.com|vergotten@gmail.com  
<sup>1</sup>ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

*One of the main problems of mixed reality devices is the physically correct representation of the brightness distribution for virtual objects and their shadows in the real world. In other words, restoring the correct distribution of scene brightness is one of the key parameters to solve the problem of correct interaction between the virtual and real worlds, but neural networks do not allow to determine the position of light sources that are not in line of sight. The paper proposes a method for restoring the parameters of light sources based on the analysis of shadows cast by objects. The results of the proposed method are presented, the accuracy of restoring the position of light sources is estimated and the visual difference between the image of the scene with the original light sources from the same scene with the restored parameters of light sources is demonstrated.*

**Keywords:** mixed reality, luminance distribution, High-Dynamic Range Image, 3D-scene, augmented reality, reconstruction of light source position, indirect illumination, direct illumination, point light source.

### 1. Введение

В настоящее время технологии VR (виртуальная реальность), AR (дополненная реальность), MR (смешанная реальность) развиваются очень быстро [1, 2, 3]. На рынке представлено множество устройств VR, AR, MR от различных производителей [4, 5, 6], а над улучшением качества восприятия и повышением эффективности данных технологий работают многие исследовательские группы [7, 8, 9]. Существует ряд реализованных пилотных проектов, использующих эти технологии не только в индустрии развлечений и игр, технологии находят применение в медицине [10], в архитектуре [11], в военном деле [12] и в других областях.

Технология смешанной реальности сложнее технологий виртуальной или дополненной реальностей. Если в системе виртуальной реальности человек полностью погружен в виртуальный мир и не видит окружающее пространство, а в системе дополненной реальности человек наблюдает вспомогательные элементы, такие как, например, данные навигации или информационные сообщения, то в системе смешанной реальности человек видит виртуальные объекты, добавленные в пространство реального мира, при этом у него не должно возникать конфликта зрительного восприятия. Для того, чтобы виртуальный объект выглядел

достаточно реалистично, необходимо выполнить несколько условий. Во-первых, виртуальный объект должен иметь соответствующие текстуры и оптические свойства поверхности (отражение, пропускание, преломление). В некоторых случаях свойства поверхности (текстура, оптические свойства) могут быть назначены вычислительной системой или пользователем произвольно, но на основе данных из достоверной библиотеки материалов.

Вторым важным условием реалистичного восприятия виртуальных объектов является их способность отбрасывать тени в соответствии с условиями освещения. Виртуальные объекты должны визуализироваться таким образом, чтобы их виртуальные тени коррелировали с тенями от реальных объектов и не вызывали чувства дискомфорта при наблюдении смешанного изображения.

В данной статье авторы предлагают эффективный метод восстановления положения источников света (ИС) для систем смешанной реальности с учетом освещения реального мира.

### 2. Анализ существующих работ

Ранее авторы рассматривали вопрос восстановления распределения яркости методом трех сфер, который

заключался в определении координат положения источника света в пространстве сцены [13]. В статье было показано, что разработанный метод определения координат положения источника света на основе анализа HDRI может обеспечить достаточно точные результаты. Тем не менее, метод имеет ряд недостатков, таких как:

1. Работоспособен только при условии, что поверхности имеют свойства отражения, близкие к закону Ламберта, то есть идеально "матовые" или диффузно отражающие поверхности.
2. Метод эффективен только для одного точечного источника света.

Предлагаемый метод лишен этих недостатков. Он может работать с произвольными диффузными поверхностями (заданными ДФР), а также с несколькими источниками света.

Вопросами восстановления условий освещения реальных объектов занимаются различные группы исследователей. В работе [14] представлен метод, основанный на высококачественной оценке освещенности методами сверточной нейронной сети (СНС, англ. - CNN). Авторы обучают СНС, используя синтезированные изображения, и впоследствии применяют ее для анализа реальных изображений. Чтобы поддерживать точность и эффективность метода, результаты оценки освещенности объединяются от нескольких экземпляров СНС. Экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый метод дает достаточно точные оценки при анализе изображений реального мира.

В работе [15] представлен метод визуализации теней с помощью освещения, полученного в ходе анализа изображений в приложениях дополненной реальности. Для аппроксимации результатов освещения и затенения окружающей среды система использует купол с разноцветными источниками света. Цвет каждой тени определяется областью окружающей среды за источником света. В результате становится возможным устанавливать непосредственное влияние изменений условий освещения на отбрасывание теней виртуальными объектами.

В статье [16] предложена концепция анализа теней в режиме реального времени для приложений дополненной реальности, использующих теневые объемы. Концепция была реализована в прототипе «shadowAReality» с положительными результатами. Тени значительно улучшают реальную сцену и предлагают пользователю более интуитивный и реалистичный мир. Как представлено в статье [17], алгоритм анализа теневого объема может быть улучшен за счет использования порталов, окклюзии и методов отбора усеченного вида, позволяющих избежать рендеринга ненужных теневых объемов. Кроме того, возможно улучшение алгоритма теневого объема с использованием языка затенения nVIDIA Cg [18, 19].

Авторы работы [20] представляют метод восстановления освещения и свойств поверхности по случайно отсканированной геометрии. Это означает быструю и потенциально шумную процедуру сканирования немодифицированных и неструктурированных сцен с помощью стандартного датчика RGB-D. В отличие от процедур восстановления светотехнических характеристик объектов, требующих тщательной подготовки в лабораторных условиях, этот метод работает с данными, которые могут быть получены пользователями в полевых условиях. Чтобы обеспечить надежную процедуру восстановления, авторы сегментировали полученную геометрию на поверхности с однородными свойствами материала и рассчитали перенос излучения на этих сегментах. С такими входными данными авторы решили обратную задачу рендеринга – факторизацию освещения и свойств материала, используя итеративную оптимизацию в

форме сферических гармоник. Это позволяет учитывать самозатенение и восстанавливать зеркальные свойства объектов. Полученные данные можно использовать для генерации широкого спектра приложений смешанной реальности, включая рендеринг синтетических объектов с соответствующим освещением в заданной сцене, а также синтез изображения сцены (или ее части) с новым освещением. Была продемонстрирована надежность данного подхода на реальных и синтезированных примерах в различных условиях освещения и проведено сравнение с исходными данными.

Для восстановления параметров естественного и искусственного освещения по HDRI изображениям существует ряд работ [21-23], которые позволяют найти и выделить яркие источники света, создающие блики и тени. Однако для гарнитур смешанной реальности при нахождении параметров естественного освещения (положение солнца) более естественный подход должен основываться на анализе параметров датчиков, позволяющих найти положение солнца, используя данные его модели (широта, долгота, дата и время).

Рассмотренные работы предлагают эффективные подходы для восстановления распределения освещения в системах смешанной реальности, что в ряде случаев позволяет получить удовлетворительные результаты. С другой стороны, рассмотренные подходы хорошо работают, когда в сцене присутствует только один источник света (солнце или искусственный источник света) или источники света находятся на значительном расстоянии (практической бесконечности). В реальном мире присутствует множество источников света. Поэтому авторами предложен новый подход, который может восстановить параметры освещения в сложных сценах с несколькими источниками света.

### 3. Метод

Алгоритм разработанного метода продемонстрирован на рисунке 1 и состоит из следующих этапов:

1. Получение входных данных от MR-устройства:
  - HDR RGB изображение видимого пространства,
  - карта глубины сцены.
2. Построение 3D модели на основе полученных данных.
3. Поиск по 2D HDR изображению и 3D модели теней и распознавание объектов, которые их отбрасывают.
4. Добавление в 3D модель горизонтальных поверхностных детекторов света. Их количество зависит от высоты помещения, шаг между соседними детекторами составляет 0.1 – 0.2 м (в среднем 5-10% от высоты помещения).
5. Добавление в 3D модель виртуальных узких конических источников света по контурам теней (точка контура «обстреливает» тонкими пучками соответствующий объект, создающий тень, по всему его видимому контуру). Количество источников выбирается в зависимости от сложности контура тени. Для восстановления положения источников света рекомендуется размещать виртуальные источники для каждого объекта, имеющего тень. В общем случае 3D модель не является необходимой составляющей данного алгоритма. Изображение сцены с картой ее глубин, привязанной к системе координат наблюдателя, формирует достаточный набор данных для формирования пучков лучей по контуру объекта.
6. Направление виртуальных ИС, расположенных по контуру тени, на контур предмета.



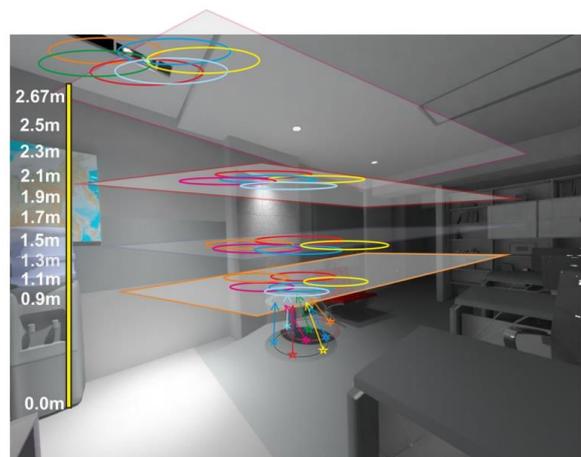
**Рис. 1.** Алгоритм восстановления освещения с использованием HDR-изображения 3D сцены

7. Излучение света виртуальными коническими источниками и его регистрация на поверхностных приемниках. Для каждого источника будет сформирован соответствующий контур тени на приемниках. Результаты моделирования по результатам данного этапа продемонстрированы на рис.2. В данном случае круглый стол освещался одним источником света малого размера.
8. На приемниках света анализируется относительная площадь пересечения большинства теней по отношению к суммарной площади теней. Чем ближе к источнику света расположен приемник, тем меньше относительная площадь пересечения большинства теней, и чем дальше удалены приемники, тем больше относительная площадь пересечения. В ближайшей к виртуальным

источникам света области площадь пересечения всех теней будет минимальна.

9. Зная координаты точки в горизонтальной плоскости и положение этой плоскости можно говорить о полном восстановлении координат реального источника света и расположить точечный источник света по вычисленным координатам. Повторяя данное действие для всех восстановленных координат, можно расставить все точечные источники света в сцене.
10. Синтезировать изображения сцены с виртуальными объектами для левого и правого глаза.
11. Вывести синтезированное изображение виртуального предмета на MR устройство.

Стоит отметить, что пока метод реализован частично. Авторы не решали вопросы пунктов 1, 2, 3 данного метода, поскольку они уже решены другими исследователями. Решение проблем, связанных с распознаванием теней, связью теней с отбрасывающими их объектами, выделением контуров объектов, подробно описаны в работах [24-27]. Оценка работоспособности метода была произведена в виртуальном прототипе реального мира, где в качестве наблюдателя использовался виртуальный прототип реального MR устройства. Данный метод исследования визуального восприятия систем смешанной реальности был детально описан в работе [28].



**Рис. 2.** Графическое представление метода

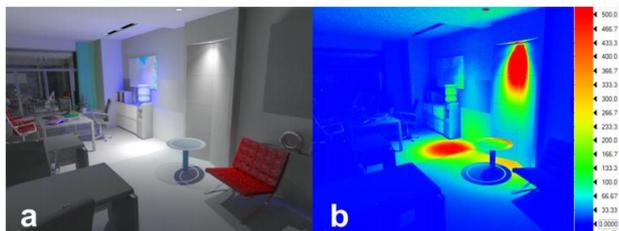
#### 4. Результаты моделирования

Приведенный выше алгоритм был реализован на Python в системе фотореалистичной визуализации Lumicept. Модификация сцены офисного помещения, включающая расстановку детекторов излучения и узких конических источников света (каждый контур формировался источником света своего цвета), с началом координат на границе тени и направленных на точки, находящиеся на границе объекта, была реализована на Python. Далее, используя Lumicept API, запускался метод прямой стохастической трассировки, который формировал распределения освещенности на детекторах излучения. Далее приложение, написанное на Python, анализировало изображения, полученные на детекторах излучения, и находило детекторы, в которых линии контуров от источников света имели общую точку пересечения (область максимального пересечения контуров была минимальна). Данные детекторы (координата Z) и области на детекторах (координаты X, Y) принимались за ориентировочные положения источников света.

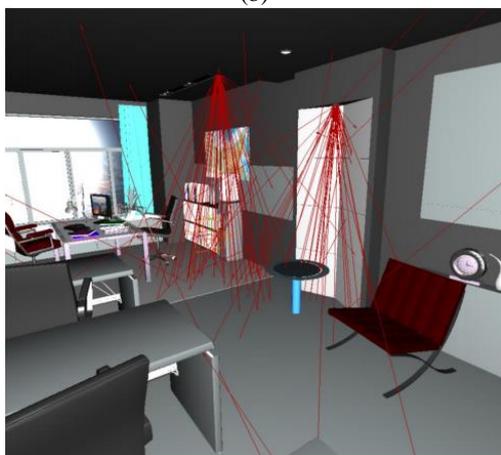
Основное время работы алгоритма занимал расчет освещения в системе Lumicept (порядка минуты на Intel Core

i5) и анализ изображения линий контуров (до пяти минут на высоком разрешении детекторов).

На примере модели офисного интерьера авторы рассмотрели метод восстановления освещения для приложения смешанной реальности с использованием HDR-изображения трехмерной сцены. На следующих рисунках 3 и 4 представлено синтезированное HDR-изображение интерьера реального офисного помещения, карта яркости и визуализация лучей.



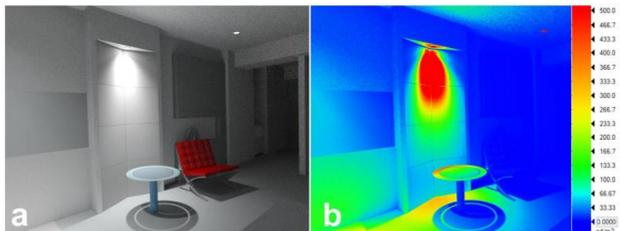
**Рис. 3.** Синтезированное HDR-изображение интерьера офисного помещения (a) и соответствующая карта яркости (b)



**Рис. 4.** Визуализация лучей в интерьере офисного помещения

Данный интерьер имеет сложную геометрию, которая освещается искусственными источниками света.

Рисунок 5 показывает участок интерьера, где проводился численный эксперимент. В сцене присутствуют предметы мебели, такие как кресло, журнальный столик, точечные светильники на потолке.

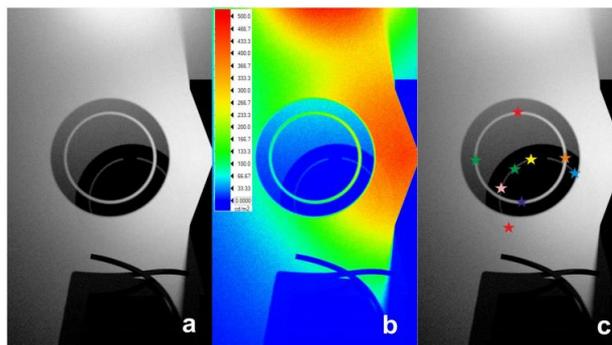


**Рис. 5.** Синтезированное HDR-изображение области эксперимента (a) и соответствующая карта яркости (b)

На этапе получения входных данных были определены геометрия предметов и теней. Далее эти объекты сохраняются и используются. Например, круглый журнальный столик отбрасывает две тени, которые были распознаны и связаны с этим объектом. На данный момент этап распознавания теней, предмета и привязка их к координатам изображения (и соответственно сцены) проводится вручную.

На рисунке 6 графически представлен следующий этап. Программа размещает виртуальные источники света по

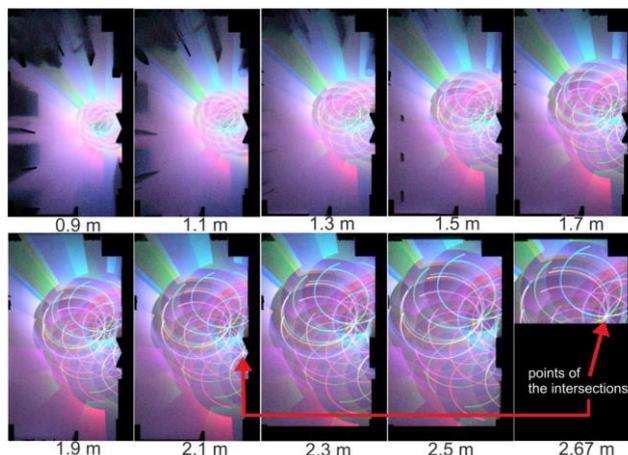
контурам теней в виртуальной модели офиса. В этом случае были определены две круглые тени, отбрасываемые журнальным столиком.



**Рис. 6.** Вид теней на полу (a), его карта яркости (b), координаты для виртуальных источников света (c)

На следующем этапе программа формирует узкие пучки лучей, направленные на точки, лежащие на краю журнального столика. В данном исследовании авторы обозначили источники света, формирующие контур, отдельным цветом. Далее программа создавала несколько поверхностных детекторов света на разных уровнях. Узкие конические источники света позволяли создать контрастные силуэты на всех поверхностных приемниках излучения. Предполагалось, что на некотором уровне появится область с минимальной площадью пересечения большинства всех теней, и это позволит найти положение источника света. Анализ изображения на детекторах производился с помощью приложения, написанного на Python.

В виртуальном прототипе использовалось только два источника света, а другие источники света были отключены. Первый источник света имел координаты XYZ = (1.5, 0.4, 2.2) метра, где третья координата (Z) это высота от поверхности пола. Второй имел координаты XYZ = (0.9, 1.8, 2.7) метра. В модели присутствовало несколько поверхностных детекторов, ближайшие к реальным источникам света находились на уровне 2.1 метра и на уровне 2.67 метра. Авторы предполагают, что если погрешность отклонения от целевого значения будет составлять не более 5%, то это не окажет значительного влияния на распределение яркости в сцене и человек сможет наблюдать виртуальные объекты без заметного дискомфорта. Следующий рисунок 7 показывает результаты моделирования.



**Рис. 7.** Расчётные плоскости на разных уровнях и определенные точки пересечения силуэтов

В результате моделирования было получено, что первое пересечение имеет координаты XYZ = (1.48, 0.39, 2.1) метра, второе пересечение имеет координаты XYZ = (0.88, 1.77, 2.67) метра. Координаты пересечений очень близки к реальному положению источников света. В таблицах 1 и 2 приведены сводные данные для исходных и восстановленных координат положения света.

Ось	X	Y	Z
Исходное положение источника света, м	1.5	0.4	2.2
Восстановленное положение источника света, м	1.48	0.39	2.1
Абсолютная погрешность положения источника света, м	-0.02	-0.01	-0.1
Относительная погрешность положения источника света	0.013	0.025	0.04

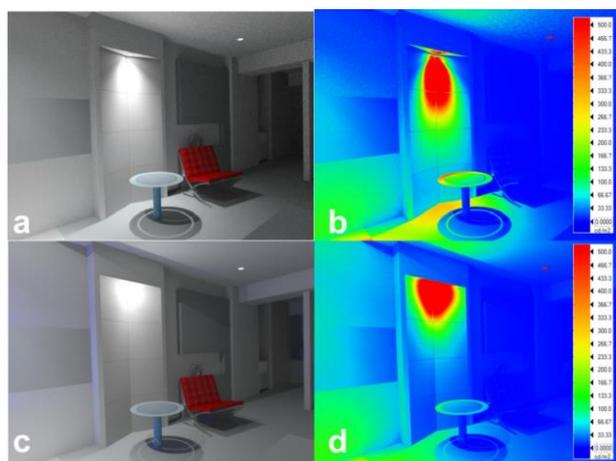
**Таблица 1.** Исходные и восстановленные координаты положения первого источника света

Ось	X	Y	Z
Исходное положение источника света, м	0.9	1.8	2.7
Восстановленное положение источника света, м	0.88	1.77	2.67
Абсолютная погрешность положения источника света, м	-0.02	-0.03	-0.03
Относительная погрешность положения источника света	0.022	0.016	0.01

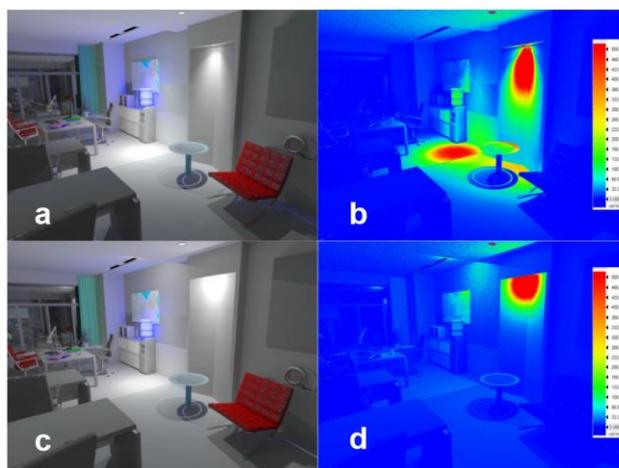
**Таблица 2.** Исходные и восстановленные координаты положения второго источника света

На следующем этапе в центр пересечения теней были установлены точечные источники света, после чего можно было визуально оценить качество восстановления источников света.

Для проверки визуального восприятия интерьера с использованием восстановленных положений источников света было синтезировано изображение исходной сцены с использованием полученных параметров освещения. На рисунке 8 и рисунке 9 показаны результаты синтеза изображения исходной сцены с исходными и восстановленными источниками света.



**Рис. 8.** Вид на экспериментальную зону. Интерьер с реальными источниками света (а) и с восстановленными источниками света(с), (b, d) соответствующие карты яркости



**Рис. 9.** Вид на комнату. Интерьер с реальными источниками света (а) и с восстановленными источниками света(с), (b, d) соответствующие карты яркости

## Заключение

В данной работе было показано, что разработанный метод определения координат положения источников света на основе анализа теней с использованием HDR1 позволяет обеспечить достаточно точное восстановление положения источников света, при условии отсутствия сильного зашумления входных данных. Несмотря на то, что данный алгоритм был реализован на Python в системе Lumiscript и его производительность не соответствует требованиям систем реального времени, в ближайшее время планируется его реализация на GPU и в дальнейшем на кристалле для использования в новых устройствах смешанной реальности. Кроме того, планируется усовершенствовать алгоритм определения минимальной области пересечения контуров, формируемых тенями, в случае сложного освещения протяженными источниками света, и алгоритм определения границ объекта, формирующего тень.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-79-10190).

## Литература

- [1] Parsons, S. and Cobb, S., "State-of-the-art of virtual reality technologies for children on the autism spectrum," *European Journal of Special Needs Education* 26(3), 355-366 (2011).
- [2] Palmarini, R., "A systematic review of augmented reality applications in maintenance," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 49, 215-228 (2018).
- [3] Izadi, S., "The Reality of Mixed Reality," *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction. ACM*, 12 (2016).
- [4] Oculus Rift, <https://www.oculus.com> (10 April 2019).
- [5] Epson Moverio, <https://moverio.epson.com> (10 April 2019).
- [6] Microsoft HoloLens, <https://www.microsoft.com/en-us/hololens> (10 April 2019).
- [7] William, R. and Craig, A., [Understanding virtual reality: Interface, application, and design], Morgan Kaufmann, (2018).
- [8] Iis, T. P., Jung, T. H., and Claudia M. D., "Embodiment of wearable augmented reality technology in tourism experiences," *Journal of Travel research* 57(5), 597-611 (2018).
- [9] Trout, T., "Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making," *Next-Generation Analyst VI. Vol. 10653. International Society for Optics and Photonics*, (2018).
- [10] Sheena, B., Anandasabapathy, S. and Shukl, R. "Use of augmented reality and virtual reality technologies in endoscopic

training," *Clinical Gastroenterology and Hepatology* 16(11), 1688-1691 (2018).

[11] Kiljae, A., Ko, D., and Gim, S. "A Study on the Architecture of Mixed Reality Application for Architectural Design Collaboration," *International Conference on Applied Computing and Information Technology*. Springer, Cham, 4861 (2018).

[12] Livingston, M., Zhuming, A., and Decker, J. W., "Human Factors for Military Applications of Head-Worn Augmented Reality Displays," *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*. Springer, Cham, 56-65 (2018).

[13] Wang, X., Zhdanov, D. D., Potemin, I. S., Wang, Y. and Cheng, H., "The efficient model to define a single light source position by use of high dynamic range image of 3D scene," *Proc. SPIE 10020, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IV*, 100200I (31 October 2016)

[14] Mandl, D., Yi, K. M., Mohr, P., Roth, P. M., Fua, P., Lepetit, V., Schmalstieg, D. and Kalkofen D., "Learning lightprobes for mixed reality illumination," *2017 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 82-89(2017).

[15] Supan, P., Stuppacher, I. and Haller, M., "Image Based Shadowing in Real-Time Augmented Reality," *IJVR* 5.(3), 1-7 (2006).

[16] Haller, M., Drab, S. and Hartmann, W., "A real-time shadow approach for an augmented reality application using shadow volumes," *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology*. ACM, 56-65 (2003).

[17] Everitt, C. and Kilgard, M. J., "Practical and Robust Stenciled Shadow Volumes Hardware-Accelerated Rendering," *arXiv preprint cs/0301002* (2003).

[18] Randima, F. and Kilgard, M. J., [The Cg Tutorial: The definitive guide to programmable real-time graphics], Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., (2003).

[19] Kirk, D., [CG Toolkit, User's Manual], Nvidia Corporation, Santa Clara, CA, (2002).

[20] Richter-Trummer, T., "Instant mixed reality lighting from casual scanning," *2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, 27-36 (2016).

[21] А.Г. Волобой, В.А. Галактионов, Э.А. Копылов, Л.З. Шапиро. Расчет солнечного освещения, заданного изображением с большим динамическим диапазоном // Труды 16-ой международной конференции по компьютерной графике и ее приложениям - *ГрафиКон'2006*, Россия, Новосибирск, июль 1-5, 2006, с. 467-472.

[22] Волобой А.Г., Галактионов В.А., Копылов Э.А., Шапиро Л.З. Моделирование естественного дневного освещения, задаваемого изображением с большим динамическим диапазоном // "*Программирование*", № 5, 2006, с. 62-80.

[23] Валиев И.В., Волобой А.Г., Галактионов В.А. Физически корректная модель солнечного освещения, задаваемая изображением с большим динамическим диапазоном// "*Вестник компьютерных и информационных технологий*", № 9, 2009, с. 10-17.

[24] Hariharan, Bharath, et al. "Simultaneous detection and segmentation." *European Conference on Computer Vision*. Springer, Cham, (2014).

[25] Gupta, Saurabh, Pablo Arbelaez, and Jitendra Malik. "Perceptual organization and recognition of indoor scenes from RGB-D images." *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (2013).

[26] Kim, Dong, Muhammad Arsalan, and Kang Park. "Convolutional neural network-based shadow detection in images using visible light camera sensor." *Sensors* 18.4 (2018): 960.

[27] Ji, Jing, Xudong Jiang, and Wei Sun. "Shadow detection using double-threshold pulse coupled neural networks." *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. IEEE, 2016.

[28] Potemin I.S., Livshits I., Zdanov D., Zhdanov A., Bogdanov N. An application of the virtual prototyping approach to design of VR, AR, and MR devices free from the vergence-accommodation conflict. *Proceedings of SPIE – (2018), Vol. 10694*, pp. 1069404

## Об авторах

Богданов Николай Николаевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail [nnbogdanov@corp.ifmo.ru](mailto:nnbogdanov@corp.ifmo.ru).

Потемин Игорь Станиславович, к.т.н., доцент кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail [ipotemin@yandex.ru](mailto:ipotemin@yandex.ru).

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф.-м.н., заведующий кафедрой технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail [ddzhdanov@mail.ru](mailto:ddzhdanov@mail.ru).

Жданов Андрей Дмитриевич, аспирант кафедры технологий визуализации Университета ИТМО. Его e-mail [adzhdanov@corp.ifmo.ru](mailto:adzhdanov@corp.ifmo.ru).

Сорокин Максим Игоревич, аспирант кафедры визуализации (базовой) факультета программной инженерии и компьютерной техники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Его E-mail [vergotten@gmail.com](mailto:vergotten@gmail.com).