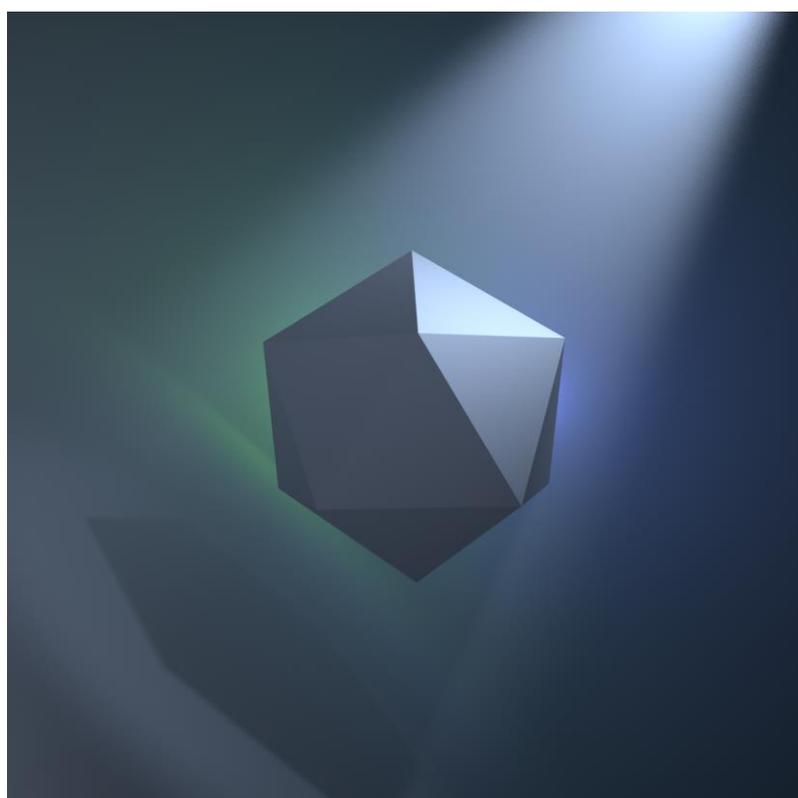




**А.С. Андреев, А.Н. Васильев,  
А.А. Балканский, Ю.И. Безбах, Д.О. Махлай  
А.М. Спиридонова, В.И. Чернева**

**ОСВЕЩЕНИЕ В ИСКУССТВЕ,  
ФОТОГРАФИИ И 3D-ГРАФИКЕ**



**Санкт-Петербург  
2019**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**А.С. Андреев, А.Н. Васильев,  
А.А. Балканский, Ю.И. Безбах, Д.О. Махлай  
А.М. Спиридонова, В.И. Чернева**

**ОСВЕЩЕНИЕ В ИСКУССТВЕ,  
ФОТОГРАФИИ И 3D-ГРАФИКЕ**  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлениям подготовки: 09.04.04 «Программная инженерия»  
(специализации «Технологии трехмерного моделирования и виртуальной  
реальности в культуре и искусстве», «Моделирование и обработка цифровых  
изображений, звука и видео»), 09.03.04 «Программная инженерия»  
(специализации «Трёхмерное моделирование и промышленный дизайн»,  
«Разработка графических и веб-приложений»), 44.03.04 «Профессиональное  
обучение» (специализации «Компьютерная графика и дизайн», «Компьютерная  
графика и мультимедиа в образовании»), 09.04.02 Информационные системы и  
технологии (специализация «Компьютерная графика в дизайне») в качестве  
учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования бакалавриата и магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург  
2019**

Андреев А.С., А.Н. Васильев, А.А. Балканский, Ю.И. Безбах, Д.О. Махлай, А.М. Спиридонова, В.И. Чернева, Освещение в искусстве, фотографии и 3D-графике. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 64с.

Рецензент: Смолин Артем Александрович, к.ф.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники Университета ИТМО.

Данное методическое пособие предназначено для академического бакалавриата и магистратуры. В пособии приведены общие сведения о постановке света для успешного выполнения лабораторных работ по фотографии, видеосъемке и 3D-визуализации. Описаны системы света, использующиеся в фотографии и 3D-графике. Помимо общей технической информации рассмотрен вопрос развития алгоритмов поведения света и материалов в виртуальном пространстве. Проанализированы картины выдающихся художников с точки зрения постановки выразительного света. Комплексные знания помогут обучающимся повысить качество работ, связанных с визуализацией.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Андреев А.С., А.Н. Васильев, А.А. Балканский, Ю.И. Безбах, Д.О. Махлай, А.М. Спиридонова, В.И. Чернева, 2019

## Содержание

Введение.....	4
1. Особенности проектирования сценариев освещения.....	5
1.1 Общие понятия.....	5
1.2 Анализ естественного освещения.....	15
1.3 Способы управления светом.....	17
1.3 Проектирование света: постановка задачи.....	27
2. Свет в классической живописи XVI–XVIII веков.....	29
3. Роль света в 3D-графике.....	43
3.1 Разновидности систем освещения в 3D-редакторах.....	43
3.2 Комплексная работа с освещением в 3D-редакторах.....	48
4. Применение программируемого света в CG.....	53
4.1 Что такое шейдер?.....	53
4.2 Как задаются углы, применяемые при задании шейдера?.....	56
4.3 Трассировка лучей и технология Nvidia RTX.....	60
Задания для самопроверки.....	62
Вопросы для самопроверки.....	62
Методические указания по выполнению заданий.....	63
Список использованной литературы.....	64

## Введение

Еще до наступления эры цифровых технологий признанными мастерами работы со светом и объемной формой считались скульпторы, архитекторы и художники. Подобно иллюзионистам, они использовали прикладные знания для достижения впечатляющих визуальных эффектов в пространстве и на плоскости. Самые выдающиеся произведения вошли в фонд Мирового искусства.

В первом разделе методического пособия приведены различные аспекты и практические рекомендации по работы со светом в живописи и фотографии. Рассматриваются понятия естественного и искусственного освещения; прямого, отраженного, рассеянного света; визуального восприятия цвета, объема и глубины пространства.

Во втором разделе анализируется работа художников со светом на примере нескольких произведений, ставших переломными в истории Мирового искусства. Применяя знания, полученные из первой части, вы сможете понять, почему именно эти картины настолько важны для истории визуальных медиа.

В третьем разделе рассматриваются ключевые характеристики, из которых складывается восприятие освещения и материалов объекта в 3D-редакторах.

В четвертом разделе показана тесная связь между визуальной выразительностью и прикладной математикой. Рассматривается развитие алгоритмов просчета света в виртуальном пространстве за последние десятилетия.

Вдумчивый анализ света и формы позволяет добиться высокого уровня мастерства, поэтому в заключительной части пособия даны задания и вопросы для самопроверки.

Пособие предназначено для бакалавров и магистров, изучающих дисциплины: Алгоритмы компьютерной графики; Виртуальные среды в образовании; Дизайн виртуальных интерьеров; Живопись; Мировая художественная культура и дизайн; Моделирование освещения в компьютерной графике; Рисунок и пластическая анатомия; Световой дизайн в фотосъемке; Современный театр как коммуникационное пространство; Технологии виртуальной и дополненной реальности; Технологии моделирования и визуализации трехмерных сцен; Трехмерное моделирование; Фотографические технологии. Пособие рекомендовано для подготовки к лабораторным работам и при выполнении домашних заданий и курсовых проектов.

# 1. Особенности проектирования сценариев освещения

## 1.1 Общие понятия

Для того чтобы лучше понимать работу с освещением в 3D-моделировании, полезно разобрать основы формирования трехмерного изображения на плоскости в традиционных изобразительных техниках.

Такие понятия, как «**композиция**», «**тон**», «**свет**» лежат в основе творческого процесса художника.

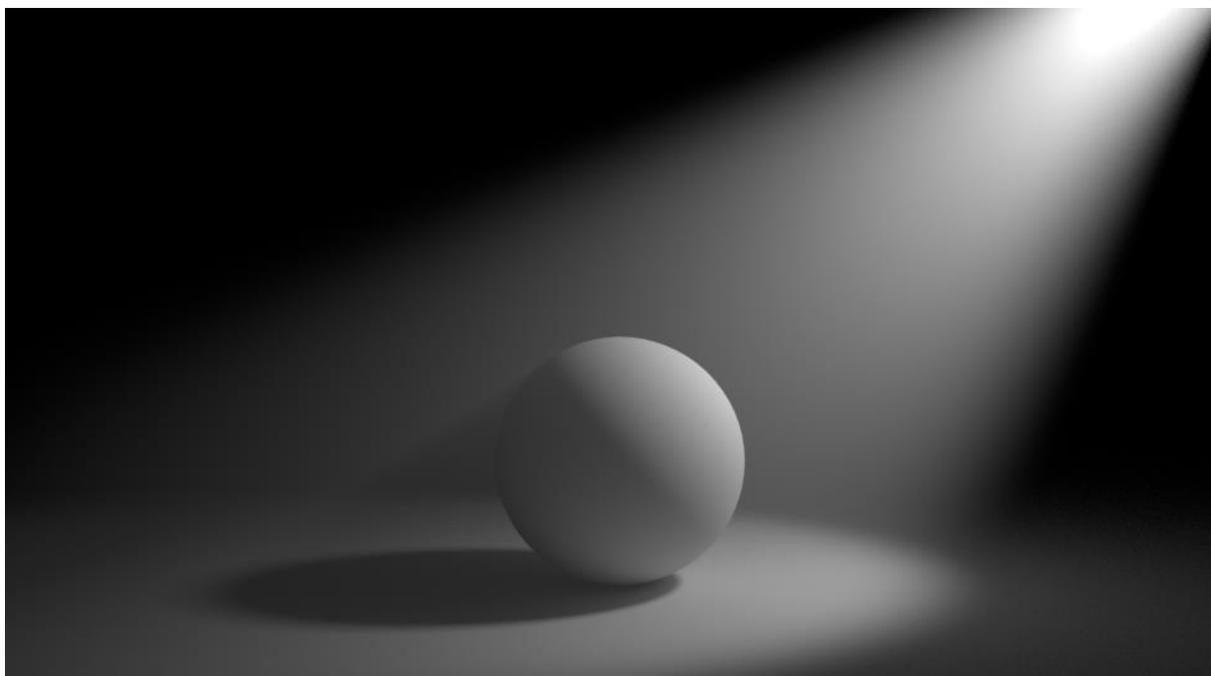
Чтобы верно представить объект на холсте, художник много лет учится работать с базовыми элементами, формирующими визуальный образ.

При работе с объемом на плоскости требуется видение ахроматических элементов и цветовых характеристик предметов.

К цветовым характеристикам относят: цвет, яркость, светлоту, насыщенность и цветовой тон.

В цвете художник решает взаимоотношения внутри произведения, делит всю композицию на крупные цветовые пятна и их соотношение по теплохолодности и насыщенности.

Тоновая композиция строится из следующих ахроматических характеристик: свет, блик, полутон, тень, рефлекс (Рис. 1).



*Рис. 1 Ахроматические элементы объемного тела*

**Построение трехмерного объема предмета на плоскости** заключается в анализе изображаемого объекта и разделении общей тоновой композиции на доминирующий свет, средний тон и самые темные участки.

Художник ведет свою работу **от светлого к темному**.

**Свет** в изображении – это самые светлые участки поверхностей объекта.

**Блик** в изображении – это самый светлый участок освещенной поверхности. Он создает иллюзию сияния и позволяет понять характер материала. Например, у металла будет жесткий блик, у стекла будет много бликов, у матовой поверхности блик будет слабо выражен (Рис. 2). Зачастую художник-акварелист оставляет в местах блика оригинальный цвет материала, на котором пишется работа, чтобы добиться иллюзии самого светлого участка. В других техниках можно использовать белила.



*Рис. 2 Ахроматические элементы на разных поверхностях*

**Полутон** (полусвет) – это широкая область пограничного перехода между светом и тенью. На характер полутона влияет количество света и форма объекта. Полутона с разных сторон одного и того же объекта могут сильно отличаться.

**Тень** – это область изображения, куда не проникает прямой свет. Насыщенность тени зависит от интенсивности источника освещения. Тени подразделяют на «собственные» и «падающие».

**Рефлекс** – это свет, отраженный от освещенной поверхности на неосвещенную поверхность. Например, на Рис. 2 торец трубы, лежащий рядом с зеркальным кубом, высветлен за счет отражения света от зеркальной грани куба. Следовательно, рефлекс заметнее всего в собственной тени объекта. Рефлекс может быть цветным, если материал соседствующего предмета имеет иную светосилу и окраску. На глянцевых поверхностях отраженный свет воспринимается ярче, чем на матовых.

Если ахроматические характеристики плохо выражены, то художник сознательно усиливает собственную тень и рефлексы объекта, чтобы проявить объем и форму.

Художники уделяют большое внимание композиции тени и света, тем самым добиваясь выразительности не только в натюрмортах, но и в пространственных композициях. Например, в картине Яна Вермеера «Астроном» (Рис. 3) можно наблюдать падающую тень от боковой стены, скрывающую часть шкафа в темноте, а также тень от шкафа, снижающая яркость отраженного света на стене, и золотистый рефлекс под окном, образовавшийся отражением от поверхности стола.

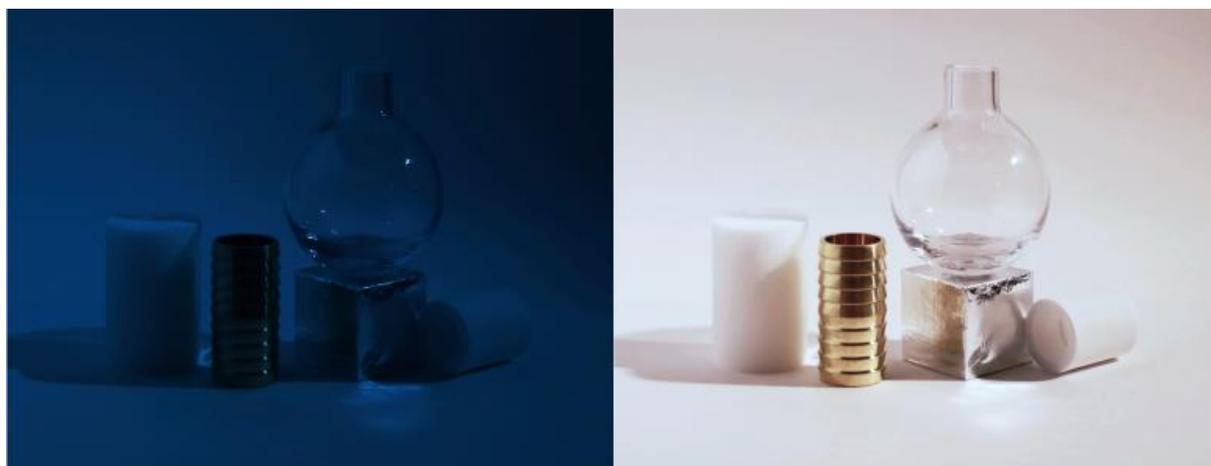


*Рис. 3 Фрагмент картины Яна Вермеера «Астроном», ок. 1668 г.*

**Объем в пространстве** определяется количеством света и контрастом тени. Для выразительного объема художник делит пространство по высоте, горизонтали и глубине.

Объем в картине Яна Вермеера формирует боковой свет от окна, поэтому, хорошо видно разделение по горизонтали: чем ближе к источнику освещения, тем ярче поверхности. Аналогичным образом можно представить тоновое разделение по вертикали. Но как художнику удастся передать глубину на плоскости холста? Мы видим, что передний план затемнен. Судя по всему, в комнате, где находится астроном, свет исходит только от окна. Окно сдерживает поток солнечного света своими размерами, поэтому под ярким освещением оказываются только самые важные области картины с точки зрения художника: окно, небесный глобус и лицо ученого. В результате формируется естественный контраст между светлыми и темными зонами изображения.

Понятие «**Контраст**» подразумевает значительную разницу между двумя состояниями, видимую невооруженным глазом. По отношению к свету контраст определяется разницей между светлыми участками и затемненными участками изображения (т.е. яркостью света в сцене). Если темных областей больше (Рис. 4а), то зритель обращает внимание, в первую очередь, на светлые участки и наоборот (Рис. 4б).



а)

б)

*Рис. 4 Пример зависимости восприятия объектов от количества света: а) имитация лунного света, внимание на блики, б) имитация солнечного света, внимание на тени*

Таким образом, меняя баланс темного и светлого, яркого и тусклого, цветного и ахроматического, художник добивается выразительной разницы в пространстве картины.

Обычно в фотографии и видеосъемке глубина пространства разделяется на **передний, средний и дальний** планы. В действительности это разделение очень условно, так как при сложном освещении пространство делится на множество слоев. Например, в ветреный облачный день, когда препятствием на пути солнечного света становятся облака, проецирующие свои тени на плоскость земли, в городском или природном ландшафте можно наблюдать множество чередующихся участков, освещенных и неосвещенных Солнцем.

На Рис. 5 представлен город в облачную погоду, фотографии сделаны на фокусном расстоянии в 300 мм, поэтому вся перспектива города сжата в одной плоскости кадра, и только тоновое разделение позволяет передать глубину объема. На фотографии 5(а) представлен неконтрастный свет, при котором разница переднего, среднего и дальнего планов слабо выражена. На фотографии 5(б) тень от облака закрыла пространство перед высоким зданием и полностью затенила задний план, тем самым выделив светлые дома на темном фоне. На фотографии 5(в) весь передний план затенен, в среднем плане достаточно освещения, чтобы разобрать детали; дальний

план разбит на две части: теньевую и освещенную, тем самым подчеркивается глубина пространства.



*Рис. 5 Разница контраста планов в облачный день*

На фотографиях 5(а, б, в) собственной тени у здания в центре кадра не видно, из чего можно сделать вывод о том, что в момент съемки тень была слишком короткой, чтобы проявиться в таком ракурсе. На фотографии 5(г) видна тень дома, следовательно, Солнце находится ближе к горизонту, свет становится интенсивнее, небо – темнее, поэтому здание хорошо контрастирует на темном фоне дальнего плана. Но прямой интенсивный свет, попадая на высокое здание, выбеляет тени, из-за чего теряется объем среднего плана.

Сравнивая четыре кадра, можно заметить, что первая фотография 5(а) смотрится наименее выразительно, так как тоновое разделение планов не соответствует глубине пространства. Для наглядности переведем фотографии в оттенки серого (Рис. 6). Теперь очевидно, что лучше всего глубина пространства читается на рисунках 6(б) и 6(в).



*Рис. 6 Разный контраст планов в облачный день в черно-белом варианте*

Знаниями о тоновом разделении активно пользуются живописцы, сознательно увеличивая контраст между планами для достижения большей выразительности. Если картина строится на низком тоновом контрасте, то художник, зачастую, компенсирует отсутствие тоновой глубины цветовым разнообразием (Рис. 7).

Пример низкого тонового контраста в живописи можно увидеть на картине Эжена Будена (Рис. 6). Выразительность достигается за счет множества деталей на переднем плане, ярких акцентов в одежде персонажей, а также в фактурном написании неба. Для дополнительного объема художник использует горизонтальный градиент: небо темнее справа, передний план темнее слева.

На Рис. 7 для наглядности с правой стороны картины приведена шкала изменения цвета в пространстве по глубине.



*Рис. 7 Эжен Буден «Время купания в Довиле», 1865 г.; цвета*

Это лишь один пример того, как живопись адаптирует под свои задачи окружающую действительность. К сожалению, фотография может только цитировать то, что происходит вокруг, однако изображения с низким контрастом в большинстве случаев считаются браком, а не произведением искусства.

Решение этой проблемы в 1938 году предложил фотограф-пейзажист Энсел Адамс, прославившийся своими фотографиями в 30-40-х годах XX века. Он путешествовал по Национальным паркам Америки (Рис. 8) и с помощью своих фотографий стремился защитить красоту природы.

Первая половина XX века с технической точки зрения – непростое время для фотографа-пейзажиста. За каждым снимком скрыта история экспедиции, требующей транспортировки своими силами всего необходимого для жизни и съемки в походных условиях. У пленочного фотоаппарата не было дисплея, чтобы оценить качество экспозиции, пленка была ограничена количеством кадров, поэтому у фотографа не было права на ошибку. Кроме того, съемка в горах таит в себе некоторые

технические особенности: атмосферная дымка может исказить объем в итоговом изображении; широкий разброс между светом и тенью требует внимательных расчётов экспозиции, а капризы погоды и ветер требуют действовать «здесь и сейчас».



а)

б)

Рис. 8 а) Д.Ф. Кенсетт «Lake George», 1869 г; б) Э. Адамс «Вечер, озеро Макдональд, национальный парк Глейшер», 1942 г.

Черно-белый цвет, отсутствие дисплея, ограниченное количество кадров на все путешествие – достаточно сложные условия, в которых приходилось работать Энселю Адамсу. Сравнивая возможности travel-фотографов XXI века, начинаешь особенно ценить его черно-белые снимки. С точки зрения тонового разделения и художественной выразительности, эти фотографии уступают живописи только в цвете (Рис. 8, 9).



а)

б)

Рис. 9 а) Каспар Шейрен «Koenigssee bei Berchtesgaden», 1869 г; б) Э. Адамс «Вершина Титона и река Снейк», 1942 г.

Основываясь на своем опыте расчётов экспозиции и проявки пленки в походных условиях, фотограф разработал зонную теорию, которую сейчас принято называть «Зонная теория Адамса».

Для получения выразительной глубины в фотографии Адамс разделил тоновое пространство изображения на 11 зон. Число ступеней светотени было выбрано не случайно: каждая следующая ступень отличается по тону от предыдущей ровно в два раза. На схеме (Рис. 10) можно увидеть, что с точки зрения цвета система строится из десяти тонов, а «0» – это белый, равный отсутствию света на листе фотобумаги.

Представьте комнату, залитую дневным светом. Если фотография не будет пересвечена, то для качественной передачи объема пространства, с точки зрения тонового разделения в черно-белом варианте изображения должны присутствовать все типы зон: теньевые, среднего тона, световые и блики. Чем шире разница между тоновыми делениями, тем лучше воспринимается объем.



Рис. 10 Классификация тонов по зонной системе Э. Адамса

Теперь давайте еще раз посмотрим на фотографию Энселя «*Вершина Титона и река Снейк*» (Рис. 9б) и проанализируем ее с точки зрения зонной системы. Например, зона 0 представлена в виде бликов на реке и в облаках; зона 8 – темных областей на поверхности воды; зона 6 – темных областей в облаках слева; зона 4 – темных областей в лесу справа; зона 1 – силуэтов елок на переднем плане.

Таким образом, мы видим в рамках одного кадра «представления» каждого вида зоны по классификации Энселя. А в сумме изображение передает нам объем пространства, масштаб и настроение. Естественно, все характеристики будут меняться в зависимости от общего количества света, но чем больше световых зон будет охвачено, тем более выразительной будет световая сцена.

Со временем для упрощения оценки тонового диапазона фотографы стали делать сокращенные варианты, объединяя некоторые тона в укрупненные группы: черный, тени, темно-серые, светло-серые, светлые, блики, белый.

В результате, когда появились цифровые камеры и первые редакторы цифровых фотографий, тоновое и цветовое пространство отображалось в виде кривой: от темного к светлому. Кривая, описывающая тоновое пространство кадра, строилась по графику, где вертикаль определяла насыщенность, а горизонталь – светлоту тона. В современных редакторах эту кривую можно увидеть на графике, который называется **гистограммой**.

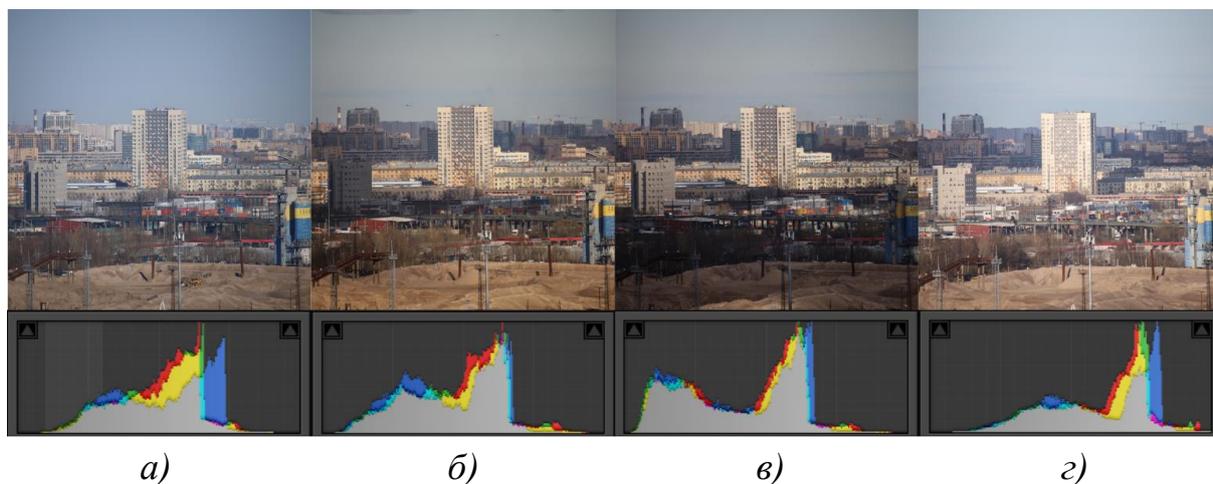
На гистограмме тоновое разделение условно представлено четырьмя типами: очень темные области, средний темный, средний белый, очень светлые области.

Крайней точкой темного участка в фотографии является черный цвет, что считается «провалом» теневой зоны снимка на гистограмме. С прикладной точки зрения это означает следующее: если что-то важное на фотографии ушло в черный цвет, то вернуть эту информацию при постобработке будет крайне затруднительно, так как фактически в черной точке кадра не будет никакой информации об освещенности и истинном цвете объектов, кроме черного цвета.

Крайней точкой светлого участка в фотографии является белый цвет, что считается «провалом» светлой зоны снимка на гистограмме. При постобработке проблема «восстановления» информации в зонах засвета будет аналогичной черным участкам.

Теперь можно по-новому взглянуть на тоновое пространство фотографий города, сделанных в дневной солнечный день, и оценить их с точки зрения графика гистограммы.

Следуя логике Адамса, мы должны выбрать те кадры, в которых кривая захватывает больше зон по горизонтали. Вертикальные перепады показывают, в какую зону приходится большая часть тона изображения. Так как дневной свет дает равномерное освещение по всему кадру – большая часть тона на четырех фотографиях попадает в средний светлый диапазон. Фотография 11(б) содержит более контрастные тени, поэтому гистограмма показывает подъем кривой не только в среднем, но и в темном пространстве тона. Фотография 11(г) снята в вечернее время, солнечный свет интенсивнее, поэтому на гистограмме кривая «сжата» в правую сторону.



*Рис. 11 Вид на город в облачный день, фотографии с гистограммой*

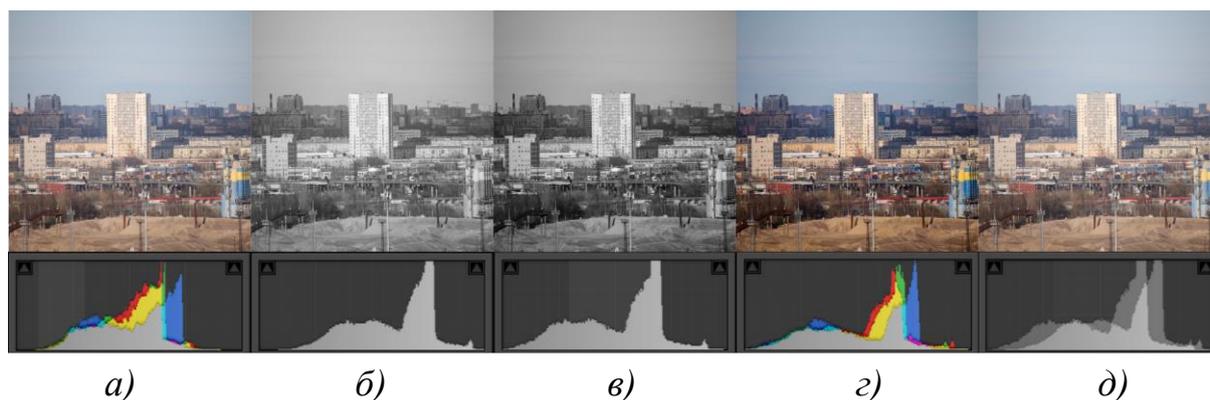
Оценивая гистограммы четырех изображений, мы подтверждаем догадку, сделанную ранее исключительно из визуальной оценки. Именно фотографии 11(б) и 11(в) содержат наибольший охват и по горизонтали, и по вертикали. При этом гистограмма показывает, что на постобработке следует добавить светлоты и черного для придания свету еще большей выразительности.

Так как у современного фотографа есть удобные редакторы, можно посмотреть, как преобразится изображение 11(г), которое, исходя из показателей кривой, является сейчас наименее контрастным.

Используя сокращенную систему, давайте посмотрим, как будет меняться изображение, если расширить диапазон, согласно кривой на графике.

На фотографии 12(а) показан исходник; гистограмма содержит серые и цветные кривые, чтобы было нагляднее, переведем изображение в оттенки серого 12(б). Теперь видно, насколько центральная область кадра потеряла контраст, крыша высокого дома практически сливается с цветом неба.

С точки зрения выразительности, небо находится позади всех объектов, и, если у него такой нейтральный цвет, необходимо «отодвинуть» его на дальний план. С помощью интерфейса программы обработки изображений достаточно изменить несколько параметров, отвечающих за экспозицию: например, снизить «сияние» белого позволяет шкала «Highlights», а добавить в темный диапазон черных тонов – шкала «Shadows». В некоторых интерфейсах графических программ корректировка кривой осуществляется сразу в окне гистограммы, в таком случае нужно следить за тем, чтобы кривая начала пролегать в большем количестве тоновых областей.



*Рис. 12* *Корректировка изображения с учетом кривой*

В случае с фотографией 12(б) необходимо дополнить светлые тона средним диапазоном и добавить темных тонов для придания глубины. Для чистоты эксперимента будем проводить корректировку, ориентируясь на тон черно-белого изображения. Результат корректировки виден на фотографии 12(в) в оттенках серого и 12(г) в цветном варианте. На

фотографии 12(д) для удобства сравнения выставлен оригинальный снимок и наложение двух черно-белых гистограмм. Визуально изменения в гистограмме кажутся незначительными, но, сравнивая результаты обработки, преимущество скорректированного изображения становится очевидным.

Гистограмма помогает скорректировать кадр на постобработке или отследить выразительность текущей сцены, если такая функция доступна на дисплее цифрового фотоаппарата.

Хотелось бы отметить, что для учебного примера была выбрана максимально нейтральная картина с эмоциональной точки зрения (город), поэтому, несмотря на то, что гистограмма улучшила результат, сам снимок так и остался неинтересным по цветовой и сюжетной составляющей. В живописи и 3D-графике свободы значительно больше, так как и художник, и 3D-моделлер «лепят» с натуры «адаптированную» реальность в пустом пространстве холста/редактора. То есть, если в процессе создания произведения не хватает каких-то акцентов, они просто добавляют свет или тень туда, где это нужно.

Так как фотография зачастую «цитирует» действительность, фотографы вынуждены выбирать правильный момент и место для съемки, чтобы получать высокохудожественный результат с точки зрения сценария освещения. Для решения этой задачи необходимо разобраться с тем, какой свет бывает и как им лучше пользоваться.

## 1.2 Анализ естественного освещения

Главным естественным источником освещения является Солнце. Солнечный свет определяет длину светового дня, но, в зависимости от положения лучей относительно поверхности Земли, сам свет меняется и изменяет восприятие освещенных объектов.

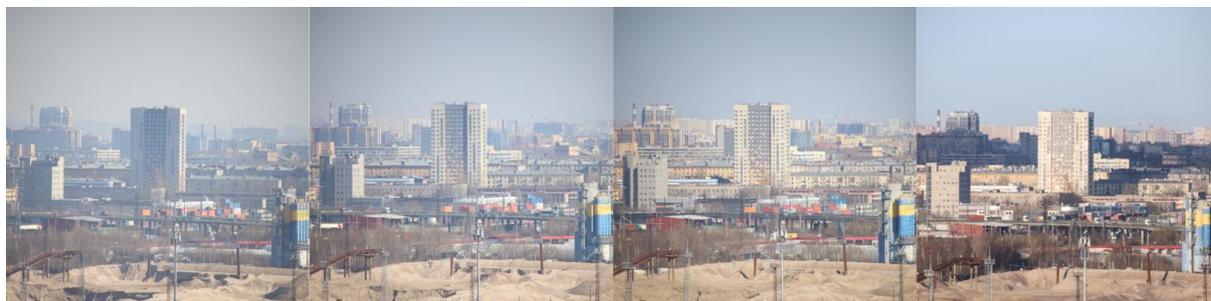
В природе поток солнечного света на открытых пространствах можно условно считать неконтролируемым. Попадая на поверхность, солнечный свет может по-разному представлять пространство в зависимости от интенсивности и температуры. Когда на пути света возникают препятствия, на поверхности начинают формироваться тени разной плотности, что дает фотографу возможность подстроиться под динамично меняющийся световой сценарий и создать нужный кадр.



*Рис. 13 Изменение температуры солнечного света на восходе Солнца*

**Интенсивность** – это разница между светом и тенью.

Температура солнечного света меняется в зависимости от угла к поверхности Земли, широты, погоды и времени года. На Рис. 13 показан пример изменения температуры света на восходе Солнца.



*Рис. 14 Изменение светотеневого представления объектов в течение дня*

Интенсивность и ракурс существенно влияют на восприятие объема и глубину пространства. На Рис. 14 показан переход от утреннего света к дневному, по зданиям видно, насколько меняется представление формы. Рассматривая фотографии (Рис. 14), обратите особое внимание на то, как тень меняет свое положение и моделирует объем.



*Рис. 15 Изменение цвета утром и вечером*

Чаще всего фотографы-пейзажисты предпочитают использовать вечерний или утренний свет. На фотографиях (Рис. 15) видно, что в это время свет приобретает определенную цветовую тонировку. Фотографы называют данный отрезок рабочего времени «золотым часом». Он был так назван, потому что переход света от золотого к сумеркам происходит за достаточно короткий промежуток времени с большим цветовым диапазоном.

Применение «низкого света» можно увидеть во многих картинах и фресках, начиная с эпохи Проторенессанса. Некоторые примеры будут разобраны во втором разделе.

В тот момент, когда Солнце заходит за горизонт, его сменяют менее контрастные источники естественного освещения: звезды и Луна. Зачастую эти небесные светила дают недостаточно света для информативной презентации пространства. Эффективней всего Луна работает как источник света в период полнолуния. При этом света становится достаточно для передачи художественного образа (Рис. 16).



*Рис. 16 Куинджи. «Дарьяльское ущелье». 1890–1895 гг. Государственная Третьяковская галерея, Москва*

### **1.3 Способы управления светом**

Анализируя различные состояния объектов в разные часы, можно сделать вывод, что полуденный свет не создает достаточного тонового разделения для корректной презентации глубины в кадре. В то же время, если в часы «низкого» света интенсивность слишком высока, то объект теряет объем.

Следовательно, прямой неконтролируемый солнечный свет не всегда пригоден для выразительного результата.

После прочтения второго раздела и выполнения заданий для самопроверки станет очевидным, что художники уже давно нашли все эти закономерности в природе, а фотографы всего лишь усовершенствовали инструменты с технической точки зрения.

Практически все сценарии освещения, применяющиеся в студии, можно найти в картинах художников, которые не использовали источники искусственного освещения. Давайте рассмотрим эти закономерности.

Например, когда Солнце проходит через листву деревьев или облака, интенсивность света падает, а взамен автор произведения получает красивый теневой рисунок для художественной игры с объемом. В фотосалоне мы можем организовать съемку, в которой свет будет проходить через ажурные занавески на окне, или установить специальные маски на осветительный прибор, искусственно создающие эффект «фигурной тени».

Еще одним приемом с непрямым потоком света может стать перегородка, возникающая на пути светового потока. Если перегородка выполнена из

непросвечивающего материала, то образующуюся тень можно использовать для создания разноплановости кадра. В некоторых случаях интенсивность света настолько высока, что световой поток огибает перегородку, не оставляя видимую тень за ней. При этом интенсивный свет смешивается с падающей тенью объекта, образуя участок с меньшей интенсивностью, что можно использовать как художественный прием.

Если перегородка выполнена из просвечивающего материала, то световой поток рассеивается и смягчается, т.е. происходит диффузия света. Если свет попадает на перегородку под непрямым углом относительно точки обзора, то свет будет отражаться от поверхности, но с меньшей интенсивностью.

Естественную диффузию (Рис. 17) можно наблюдать в облачную погоду. Искусственным рассеивающим материалом может стать зонт, занавеска на окне и т.д.



*Рис. 17 Солнечный свет в пасмурную погоду (рассвет в 5:30): а) 7 утра; б) 10 утра в) 13 дня г) 17 вечера*

Когда в сцене присутствует туман, дымка или осадки, мы вдруг замечаем, что воздух, который вроде бы должен быть прозрачным, на самом деле имеет свою плотность и цвет. Дело в том, что в воздухе присутствуют микрочастицы, которые, подобно облакам, могут служить препятствием в распространении света. Это также можно использовать как элемент выразительности. Например, дымка, через которую проходит свет, делает лучи видимыми; туман скрывает часть объектов; осадки снижают контраст сцены и т.д.

На Рис. 18 видно, что в зависимости от цвета и плотности тумана меняется восприятие среды с психологической точки зрения: от ощущения восторга на фото 18(а) до ощущения тревожности на фото 18(в). Опять же, восприятие зависит от общего концепта, например, фото 18(а) можно воспринять как предвестник пожара.



а) б) в) г)  
 Рис. 18 а) дымка на рассвете б) плотный туман с) снег вечером д) снег ночью

Моделируя свет в павильоне, профессиональные фотографы ориентировались на работы живописцев. Например, в портрете «Дама с горностаем» (Рис. 19а) на лице женщины нет контрастных переходов между светом и тенью. Если рассматривать другие картины Леонардо да Винчи, то можно заметить, что он писал портреты в естественном рассеянном свете от окна. Чтобы воспроизвести световую схему его картин в павильоне, достаточно организовать на окне рассеиватель или снимать в облачную погоду на фоне теневой стены, когда солнечный свет смягчается естественным образом, а стена создает контрастный фон.

Понять, насколько свет «жесткий» или «рассеянный» можно по бликам на объектах. Разница становится заметна при сравнении картин на Рис. 19.



а) б)  
 Рис. 19 а) Леонардо да Винчи «Дама с горностаем», 1489–1490 гг.  
 б) Караваджо «Пишущий Святой Иероним» 1607–1608 гг.

Если анализировать световые схемы Караваджо (Рис. 19б), то можно заметить, насколько у него «направленный» свет с жёсткими переходами, выхватывающий фигуры из тени. Следовательно, перед светом нужно создать препятствие, чтобы световой поток был ограничен в нужном по

замыслу направлении. Темный фон при этом образуется естественным образом: ограниченный свет не может осветить все пространство.

В попытках воспроизводить и придумывать что-то новое фотографы провели весь XX век. Постепенно появились специальные рефлекторы, собирающие свет в направленный пучок. В зависимости от формы рефлектора можно было регулировать поток света. Современные рефлекторы можно дополнить различными насадками, не только создавая направленный свет нужного размера, но и моделируя характер каждого источника освещения.

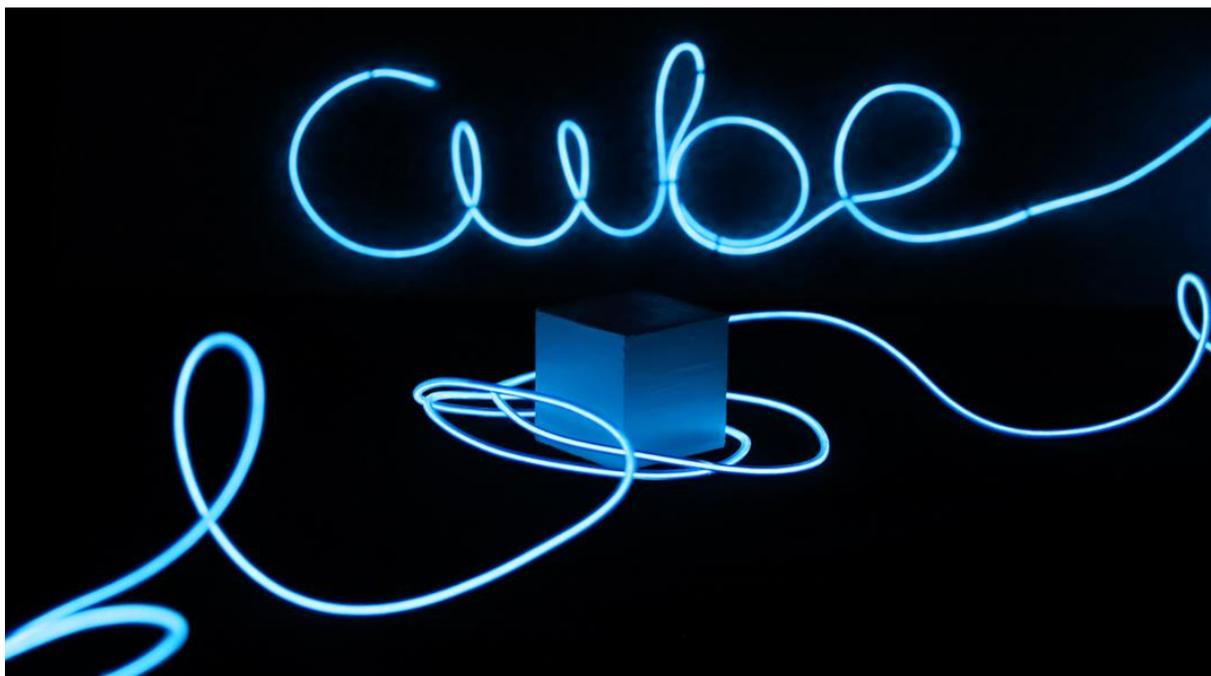
Кроме того, появились компактные и универсальные поверхности-отражатели/рассеиватели, которые могут выполнять сразу несколько функций: создавать плотную тень, отражать свет, перенаправляя его в неосвещенную область сцены или, если снять плотный чехол с зеркальной поверхностью, рассеивать освещение объектов.

В современной фотографии моделирование света может происходить при помощи источников постоянного и импульсного света. Постоянные источники светят все время, следовательно, фотограф сразу видит, какой свет получится в кадре. До распространения светодиодных технологий в фото- и видеопроизводстве применялись достаточно массивные источники постоянного света, которые могли использоваться только в специальном помещении-студии. Поэтому, из-за потребности моделировать свет в любом месте и в любое время, фотографы предпочитали использовать импульсный свет, т.е. вспышки.

В природе аналогом импульсного света является молния: мощный поток чистой энергии внезапно озаряет пространство жестким светом. Молния является примером самосветящегося объекта. Мощности светового потока молнии достаточно, чтобы осветить большое пространство, но из-за непредсказуемости грозу сложно использовать в моделировании света.

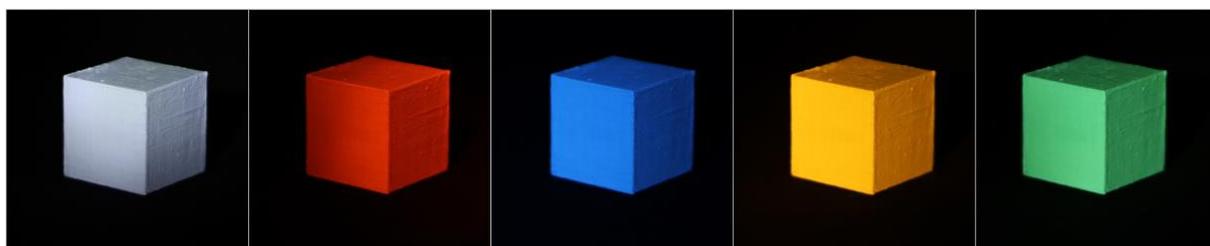
То же самое до какой-то степени ощущает начинающий фотограф, пытаясь работать с импульсным светом: сложно моделировать нужную картинку, когда не видишь сразу итоговый результат. Поэтому импульсный свет считается инструментом профессиональных фотографов, просто потому, что они очень хорошо натренировались с ним работать и заранее прогнозируют нужный световой рисунок. К еще одному недостатку импульсного света можно отнести высокий расход элементов питания, если источники света планируется использовать автономно.

Развитие светодиодных технологий позволило получить компактные, легкие, портативные источники постоянного света, поэтому теперь возможности моделирования света не ограничены даже у начинающих фотографов.



*Рис. 20 Пример подсветки объекта при помощи люминесцентного шнура*

Сначала с неоновым, а потом и со светодиодным освещением фотографии получили возможность создавать пространства, освещенные цветным светом.



*Рис. 21 Пример окрашивания объекта цветными фильтрами в фотографии, исходный объект белого цвета*

С точки зрения проектирования, цветной свет – это отличная возможность направить внимание зрителя в определенные логические точки, подчеркнуть объект или фрагмент объекта в пространстве (Рис. 20). Если учитывать эмоциональные характеристики цветного света, то можно сформировать определенное настроение среды. Различные точки зрения на психологическое восприятие цвета выдвигали многие ученые, подробнее об этом можно почитать в книге Герхарда Цойгера «Учение о свете»[8].

Помимо привлечения внимания своим внешним видом, у цветного света есть очень важное свойство - он красит объекты (Рис. 21). Эту особенность полезно использовать в темное время суток, когда реальный цвет объекта исчезает в темноте или передается с искажением.



*Рис. 22 Пример акцентирующего цветного света*

В зависимости от концепта, используя данное свойство, можно поддерживать облик пространства в одинаковом виде и днем, и ночью или создать абсолютно новое видение привычных вещей.

Как видно на фотографиях, цветной свет может быть слишком интенсивным (Рис. 22), поэтому при проектировании виртуального пространства с цветным светом не лишним будет учитывать основы визуального восприятия и контролировать уровень насыщенности. Особенно это важно при продумывании интерактивных сценариев и дизайна элементов интерфейса.



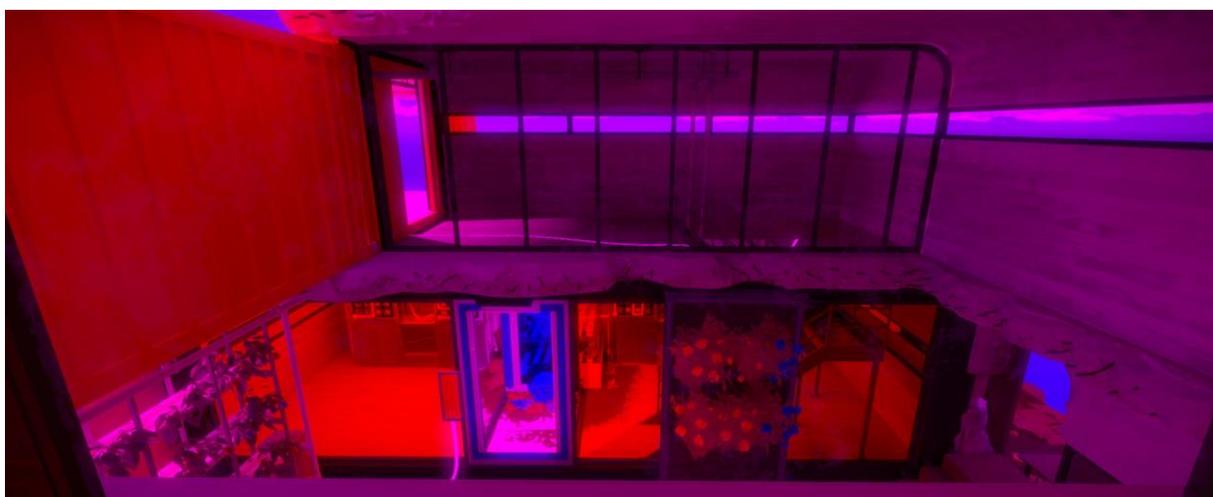
*Рис. 23 Пример нейтрального освещения в цветном павильоне в игре The Witness*

Так, например, в игре студии THEKLA Inc. «The Witness» издания 2016 года одна из пространственных головоломок строится на визуальном смещении цветов (Рис. 23).



*Рис. 24 Вид на ту же комнату сквозь красное окно в игре The Witness*

Игрока отправляют в павильон из цветного стекла, где он должен самостоятельно проанализировать обстановку, найти закономерность и решить задачу для каждого «чистого» цвета. В связи с этим игрок вынужден достаточно продолжительное время находиться в виртуальном пространстве, заполненном интенсивным цветным светом.



*Рис. 25 Вид на ту же комнату сквозь синее окно второго этажа в игре The Witness*

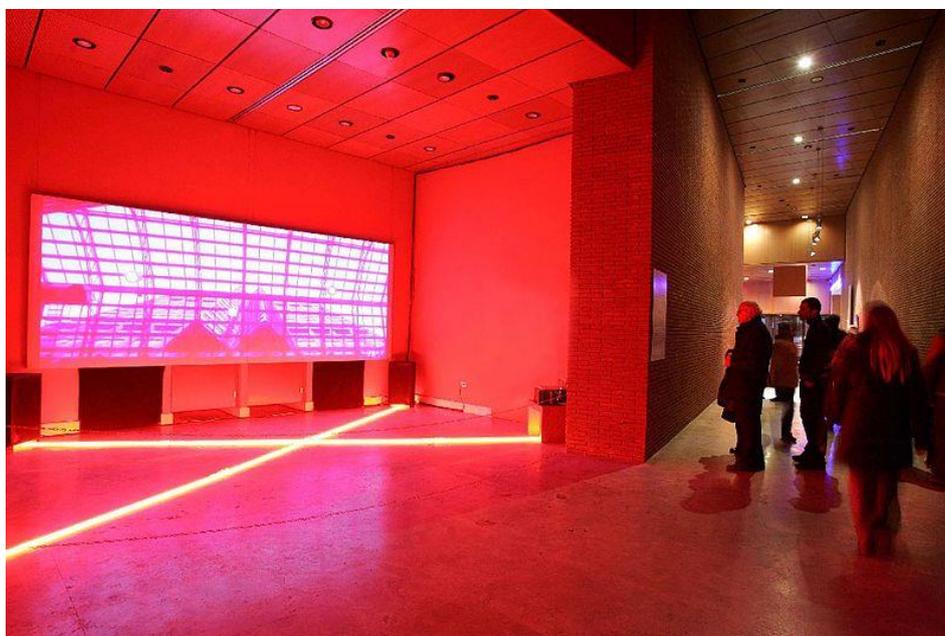
Если в цветах, приближенных к естественным (Рис. 23), игрок чувствовал себя относительно комфортно, то в условиях полностью красной (Рис. 24), сиреневой (Рис. 25), синей и зеленой комнаты (Рис. 26) воспринимать информацию становилось затруднительно.



*Рис. 26 Интерьеры цветного павильона в игре The Witness: синяя и зеленая комнаты*

Даже смотря на скриншоты, достаточно сложно рассмотреть детали интерьера, что уж говорить про самочувствие игрока, который должен был активно перемещаться между цветными пространствами для поиска решения загадки.

Может показаться, что такая проблема характерна только для виртуальных миров, но сложности в восприятии информации через призму активного цветного света возникают и в реальном мире.



*Рис. 27 Пример использования цветного света в пространстве*

На Рис. 27 можно увидеть, насколько активно красный свет влияет на восприятие зрителей. Заметьте, что напротив инсталляции нет ни одного человека, люди аккуратно рассматривают павильон из-за угла, находясь на границе комфортного и яркого освещений. Это связано не только с

высокой интенсивностью цвета, но и с подсознательной ассоциацией красного как опасности или предупреждения.

Для того чтобы лучше понять восприятие информации в условиях пространства, освещенного интенсивным цветным светом, рекомендуем ознакомиться с экспериментом, проведенным А.Г. Приходько в Московском архитектурном институте [11].

### **Подведем итоги:**

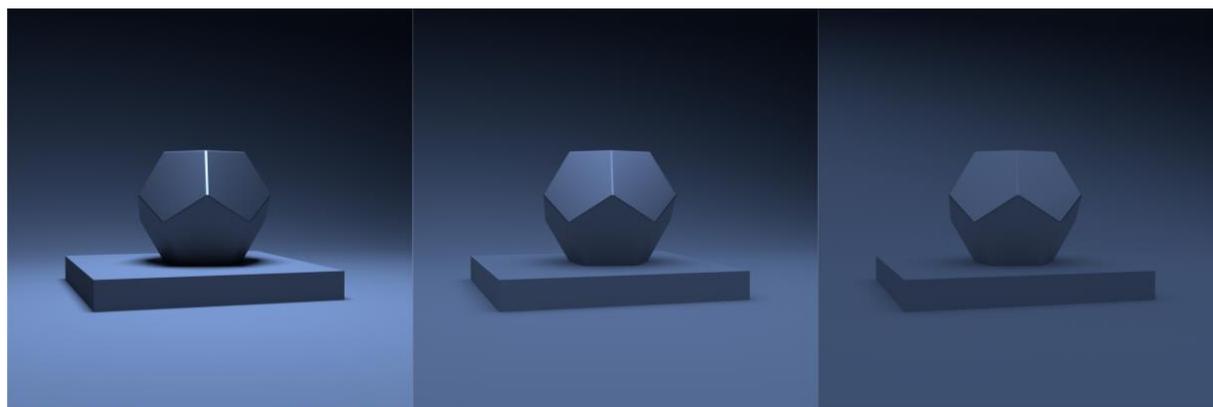
Свет может быть прямым и непрямым, на поток света можно влиять различными приспособлениями или приспособить окружающее пространство под свои задачи.

Если свет ограничить, например, насадкой или непросвечивающей перегородкой, то мы получим **направленный поток**.

Если на пути света установить плотную светлую поверхность, с её помощью можно перенаправить часть света для смягчения контраста в тенях. При этом **отраженный свет** будет меньшей интенсивности, чем прямой свет.

Если на пути света поставить просвечивающую перегородку, то мы получим мягкий переход между светом и тенью по всей поверхности, которая ограничена размером рассеивателя. Такой свет будет называться **рассеянным**.

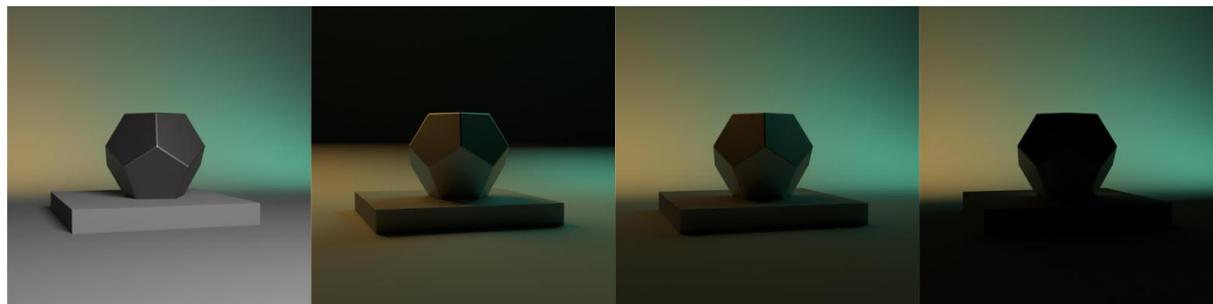
Давайте представим один абстрактный объект в нейтральной сцене, где выразительным средством будет работать только свет. Как в таком случае будет восприниматься форма объекта?



*Рис. 28 Пример схемы с одним источником: а) жесткий свет; б) рассеянный свет; в) слишком рассеянный свет*

На Рис. 28 схема света состоит из одного источника освещения, направленного сверху вниз. Рекомендация: старайтесь избегать ситуации,

показанной на иллюстрации 28(в), где структура объекта растворилась в неконтрастном освещении.



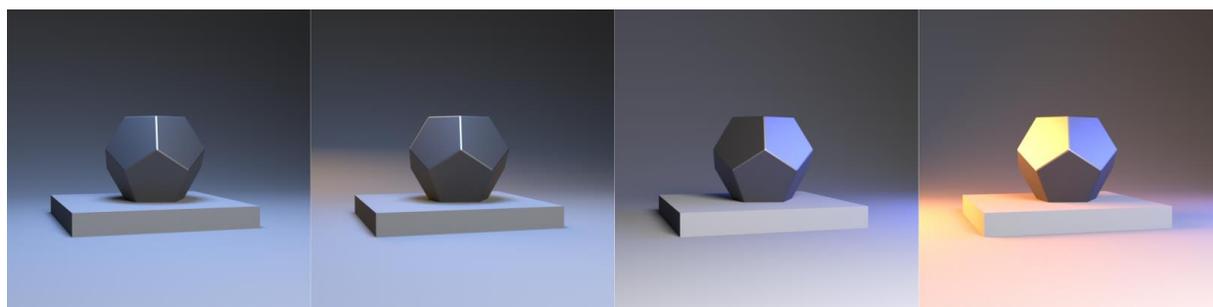
*а) б) в) г)  
Рис. 29 Примеры с тремя источниками света, работа с фоном*

На Рис. 29(г) свет только в фоне, информация об объекте практически не читается, силуэт не узнается, фотография кажется невыразительной.

На Рис. 29(в) часть фонового освещения присутствует на объекте, низкая интенсивность источников переднего плана позволяет определить форму объекта, сохраняя контраст переднего и дальнего плана.

На Рис. 29(б) фон затенен, так как свет не попадает на поверхность стены, источники освещения дальнего плана находятся ближе к объекту, оставляя контурный блик на верхней грани. Поверхность стола частично отражает свет на нижние грани объемного тела.

На Рис. 29(а) форма объекта читается хорошо, по характеру блика можно оценить материал поверхности, фоновые источники освещают дальний план, создавая контраст ахроматического объекта с цветным светом.



*а) б) в) г)  
Рис. 30 Пример того, как свет влияет на восприятие среды*

На Рис. 30(а): объект представлен в нейтральном свете. Серый объект на сером фоне с низким тоновым разделением акцентирует внимание на блике грани в центре кадра.

На Рис. 30(б): появился цветной блик источника освещения за объектом. Оранжевый контур позволил частично отделить объект от заднего плана,

объем «читается» лучше, белый блик по центру кадра уже не так сильно перетягивает на себя внимание, относительно общей формы.

На Рис. 30(в): объект подсвечен сбоку источником света синего цвета, сделан акцент на яркую синюю грань, контрастирующую с остальной теплой серой гаммой.

На Рис. 30(г): объект подсвечен с двух сторон цветным светом. Большой акцент приходится на грань, подсвеченную оранжевым, так как теплые оттенки имеют свойство перетягивать на себя большую часть внимания.

### **1.3 Проектирование света: постановка задачи**

Приступая к постановке света в фотографии или 3D-сцене, важно учитывать не только функциональное освещение, но и эстетическую выразительность пространства. Для достижения нужных визуальных эффектов рекомендуем в процессе проектирования определиться с ответами на следующие вопросы:

1. Как правильно расставить акценты внимания?
  - 1.1. На что зритель должен обратить внимание в первую очередь?
  - 1.2. Что должно быть «скрыто» от чрезмерного внимания зрителя?
  - 1.3. Как взгляд зрителя будет следовать по представленной работе (освещенные области, яркие цветовые пятна, сложные контуры)?
  - 1.4. В какой форме будет презентоваться итоговый продукт: в виде статичного кадра, видео или интерактивной виртуальной среды с обзором 360°?
2. Для статичного рендера (или фотографии):
  - 2.1. Является ли свет только техническим средством для презентации объекта?
  - 2.2. Какого масштаба планируется сцена (сколько объектов попадает в кадр)?
  - 2.3. Все ли объекты должны попадать в итоговый кадр полностью?
  - 2.4. Нет ли чрезмерных световых областей в периферической зоне внимания, которые будут создавать нежелательный акцент на границе кадра?
  - 2.5. Каким будет баланс темных и светлых областей в демонстрируемой сцене?
  - 2.6. Нужно ли формировать у зрителя определенные ассоциации и эмоции при рассмотрении кадра (рендера)?

- 2.7. Каким будет сценарий переключения внимания зрителя при рассмотрении итоговой визуализации? Чего автор хочет добиться от зрителя, направляя его внимание именно по такому «маршруту» из акцентных точек?
3. Для виртуальной среды 360°:
  - 3.1. Является ли свет только техническим средством для презентации среды?
  - 3.2. Нужно ли формировать у зрителя определенные ассоциации и эмоции при взаимодействии с виртуальной средой?
  - 3.3. Какие эмоции должен испытывать зритель, находясь в среде?
  - 3.4. Сколько света нужно для формирования характера сцены согласно концепту?
  - 3.5. Как второстепенные источники света будут формировать объем пространства?
  - 3.6. Как основные и второстепенные источники света будут влиять на движение внимания зрителя по виртуальному пространству?
  - 3.7. Как источники света будут мотивировать зрителя на желаемые взаимодействия с виртуальной средой согласно концепту?

В данном разделе мы постарались показать вам различные способы анализа готовых референсов: природного света, картин, рендеров - и способы их переноса на решение собственных задач. Умение анализировать окружающий мир и достижения признанных мастеров позволит допускать меньше ошибок и быстрее научиться создавать качественные сценарии освещения для конкретной задачи.

## 2. Свет в классической живописи XVI–XVIII веков

История искусств - это кладезь всевозможных приемов. Поскольку одной из задач 3D-графики является создание реалистичного освещения, специалист в области трехмерного моделирования может многое почерпнуть из классической живописи XVI–XVIII веков.

Вопросы трехмерного изображения интересовали художников на протяжении столетий. Художники разных стран и разных эпох решали в своих работах сложнейшую задачу: как трехмерный объемный мир можно представить на двухмерной плоскости листа, картона или холста. В рамках данного раздела мы поговорим о некоторых способах, которые использовали художники в XVI–XVIII веках.

Человек постигал феномен света с древнейших времен, выстраивая свою общественную и частную жизнь в согласии с небесными светилами. Множество памятников архитектуры Древнего мира посвящено свету. Грандиозные неолитические кромлехи (например, Стоунхендж) называют древними обсерваториями, ориентированными на движение светил.

В средневековом искусстве свет стал трактоваться как носитель божественного, поэтому перед художниками не стояла задача изобразить пространство и освещение реалистично. Свет маркировал сакральное измерение, неподвластное разуму и чувствам человека. Святые на иконах не отбрасывают теней, так как представлены в божественном мире. Он непознаваем, также как и феномен света, при помощи которого и показывают непостижимое и божественное.

В эпоху Ренессанса произошел переворот. Человек обратился к земному миру и стал изображать его предельно точно и детально как удивительное произведение Господа Бога. Художественные знания, навыки и техники накапливались на протяжении XIV и XV веков и в результате обрели завершенный систематизированный характер в живописи и теоретических работах Высокого Возрождения (первая треть XVI в.).

Поскольку художники сосредоточились на репрезентации земного мира, то важнейшим инструментом, помимо света, становится тень. Именно постижению тени посвящены многие страницы трактата Леонардо да Винчи «О живописи». Итак, в эпоху Возрождения свет и тень становятся важными инструментами для изображения действительности.

Трактат «О живописи» стал руководством для многих поколений художников. Предлагаем вам ознакомиться с основными положениями раздела «О зрении, свете, тепле и Солнце», рассматривающего, в частности, работу со светом и тенью в живописи.

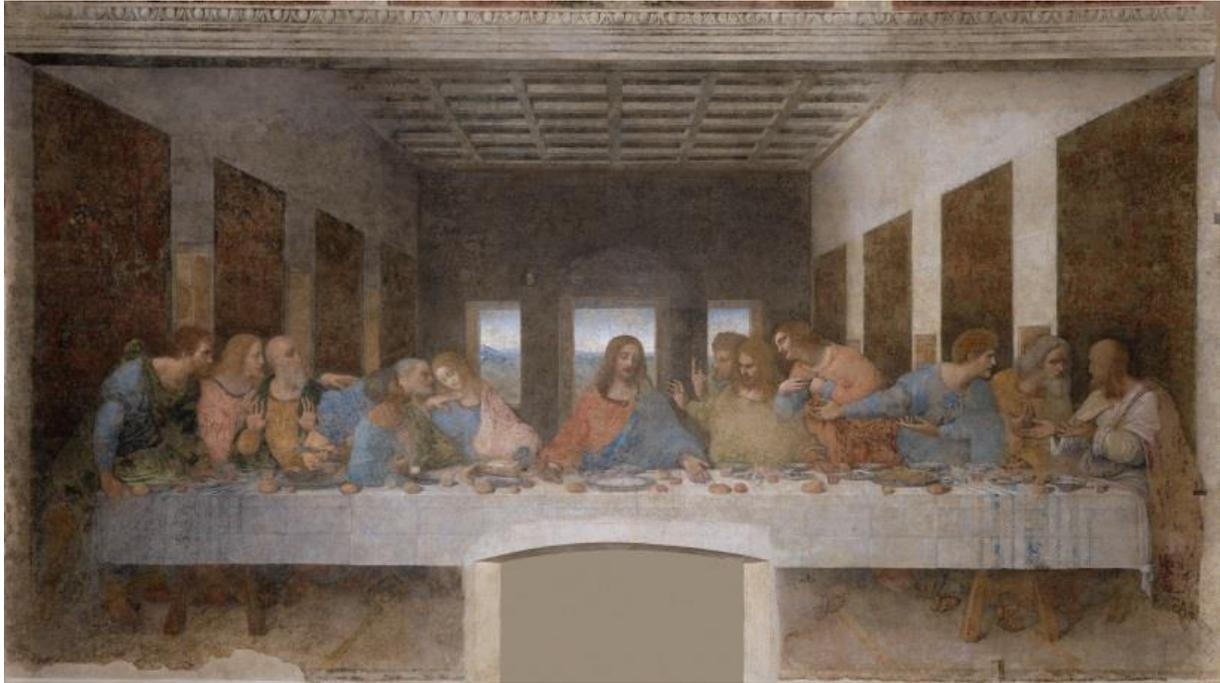
Леонардо да Винчи называл тенью «ослабление освещения, лежащего на поверхности тел, которое начинается там, где кончается свет, а кончается там, где мрак» [2]. Он говорил, что именно свет и тень создают эффект объемной фигуры, поэтому заявил о важности «одевать» фигуры в свет и тень. При этом он отмечал, что равномерный свет или равномерная темнота не в состоянии создать объемное изображение.

Лица он советовал освещать сверху, так как именно такое освещение, по мысли Леонардо да Винчи, делает лица особенно рельефными и выразительными. При таком освещении затемняется область под бровями и возникает тень на губах под носом. Также он предлагал помещать портретируемого между темными стенами, создавая, таким образом, более рельефный эффект. Действительно, многие портреты XV–XVI веков изображают человека именно на темном фоне. Заметим, он ни в коем случае не советует освещать лицо снизу, ведь лицо станет безобразным.

Способность создавать иллюзию объема Леонардо считает более важным умением живописца по сравнению с колористическим навыком. Он полагал, что в создании мнимого рельефа и заключается главная загадка живописи, ведь сами по себе цветные краски создает не художник, а мастер. Во многих произведениях Леонардо да Винчи мы наблюдаем приглушенный колорит и тщательную проработку объемов.

При работе над сценами, происходящими на природе, художник предлагал избегать прямого солнечного света и «прятать» Солнце в туман или облако, с тем, чтобы «границы теней и светов» не были такими резкими. Он советовал избегать резких светотеневых контрастов, предлагал размывать границы: «пусть мягкие света неощутимо переходят в приятные и очаровательные тени, это сообщает прелесть и красоту». [2]. Этот принцип лег в основу важного живописного приема – сфумато, открытого Леонардо да Винчи в процессе изучения воздушной перспективы. Итальянское слово *sfumato* переводится как размытый, расплывчатый, нечеткий, расплывающийся. Художник предлагал изображать воздух не только в глубине – на горизонте, но и на переднем плане, размывая контуры фигур, словно погружая их в туман или дым. Таким образом, очертания предметов слегка растушевываются, становятся более мягкими, окутанные воздухом.

В трактате Леонардо да Винчи многократно предостерегал от резких светотеневых контрастов. Как же выстраивать свет, если следовать заветам Леонардо да Винчи? Ответ прост: освещение должно быть всесторонним, а не односторонним. Одностороннее освещение создаст большое количество теней, в результате чего получится неестественный эффект, фигуры покажутся раскрашенными: «Большое, но не сильное освещение обнимает рельеф тел, и произведения». [2].



*Рис. 31 Леонардо да Винчи. Тайная вечеря. 1495—1498 гг. Санта-Мария-делле-Грацие, Милан*

Пример такой световой партитуры мы можем видеть в миланской фреске «Тайная вечеря» (Рис. 31). В этом произведении Леонардо использовал три источника света, которые расположены спереди, позади и сбоку (фронтальный, контровой и боковой свет). Такая световая теневая схема создает эффект глубины пространства, в результате чего фреска воспринимается как продолжение интерьера монастырской трапезной. Таким образом, интерьер выстраивается не только красками и линиями, но и светом.

Подобную световую схему мы видим в другом важном произведении Высокого Возрождения – в «Афинской школе» Рафаэля Санти (Рис. 32). Художник продолжил поиски Леонардо да Винчи. Как и «Тайная вечеря» Леонардо да Винчи, это фреска, то есть настенная роспись по сырой штукатурке. Фреска украшает папский дворец в Ватикане. Композиция Рафаэля гораздо сложнее, поскольку включает больше персонажей. Рафаэль усложнил и световую композицию: изображенное пространство более глубокое, чем в «Тайной вечере». Вновь мы видим фронтальный, контровой и боковой свет. Но на заднем плане изображена сложная архитектура: три арки, между которыми находятся просветы. Для зрителя эпохи Возрождения такой подход воспринимался визуально актуальным, ведь здесь показана и сложная архитектура, отсылающая к античному наследию, и продемонстрировано знание перспективы, создающее правдоподобную глубину. Такой архитектурный эффект создается и за счет эффектного освещения. Три арки, затененные внутри, и три просвета

с голубым небом помогают выстроить трехмерное пространство на двумерной плоскости.



*Рис. 32 Рафаэль Санти. Афинская школа. 1511 г. Апостольский дворец, Ватикан*

Это стремление к созданию эффектов трехмерного пространства будет раскрыто в плафонной живописи эпохи Барокко. Художники XVII–XVIII веков в сложнейших плафонных и настенных композициях доводили приемы, открытые в эпоху Возрождения, до совершенства.

В искусстве XVII века художники продолжили разрабатывать проблему света в живописи. Эта эпоха предлагает несколько законченных световых систем.

Один из самых выдающихся художников Италии XVII столетия – Микеланджело да Караваджо. Он пересмотрел заветы Леонардо да Винчи. Если Леонардо да Винчи выступал за множественные источники света и предлагал избегать яркого освещения, предпочитая рассеянный свет, то Караваджо предложил миру свою уникальную систему. Он сделал доминирующим боковое освещение. Караваджо предпочитал работать в полутемных помещениях: занавешивал все окна, оставляя одно окно или отверстие в нем открытым. Так он добивался фактически прожекторного освещения. Герои на его картинах погружены во тьму, действие происходит или ночью, или в мрачных помещениях. Картина «Призвание апостола Матфея» (Рис. 33) повествует о встрече Иисуса Христа и

апостола Матфея. Апостол был сборщиком податей. На картине Иисус Христос застаёт будущего ученика в момент подсчета денег. Яркий поток света врывается в помещение из окна, проходит над Иисусом Христом и апостолом Петром и освещает других участников сцены. Конечно, это не единственный источник света в картине, но, безусловно, самый мощный источник, создающий сильные контрасты светотени и темные густые тени, куда почти не проникает свет. Прием бокового освещения привлекает внимание к главным фигурам, выделяет значимые детали и добавляет драматизма.



*Рис. 33 Караваджо М.М. Призвание апостола Матфея. 1599 г. Сан-Луиджи-деи-Франчези, Рим*

Согласно высказыванию искусствоведа С. Даниэля, «Светотень, доведенная до предельной выразительности, становится у Караваджо важнейшим композиционным фактором» [3, С. 105]. Это очень важное замечание: светотень Караваджо – главный инструмент композиции не только для моделирования и выделения формы, но и для создания композиции.

Такой прием – приглушенный фронтальный свет и мощный боковой свет из правой или левой части – он использует в большинстве картин. Так, Караваджо при помощи света создает напряженные драматичные

произведения. В темных пространствах разворачивается драматургия света Караваджо. Такой театральный прием был оценен деятелями сценических искусств. Мартин Скорсезе признавался, что изучал живопись Караваджо и многому у него научился [7].

Караваджо, мастера светотени, притягивал мрак. В итоге мрак поглотил художника: его обвиняли в убийстве человека, и последние годы жизни он провел в скитаниях и бегстве от преследований.

Светотеневая драматургия Караваджо увлекала многих художников, как современников, так и потомков. Возникло течение караваджизм (Х. Тербрюгген, О. Джентилески и М. Де Фьори, Д. Бабюрен, Х. Рибера).

В Голландии в XVII столетии развивалось реалистическое направление, в рамках которого получили развитие разные жанры: портретный, бытовой, натюрморт, анималистический, несколько разновидностей пейзажа и др. Многие приемы освещения можно почерпнуть у художников Голландии XVII века.

Противоположностью Караваджо можно назвать гения Рембрандта. Рембрандт Харменс ван Рейн также погружал своих героев в полумрак, но работал с более мягким освещением. Если Караваджо создавал драматические эффекты при помощи яркого прожекторного света, то Рембрандт использовал светотень для создания интимного разговора о самом сокровенном. Рембрандт создает сложные эмоциональные пространства, в которых свет раскрывает тончайшие нюансы отношений и человеческой души.



*Рис. 34 Рембрандт Х.Р. Ночной дозор. 1642 г. Государственный музей, Амстердам*

На светотеневую партитуру Рембрандта раннего этапа творчества сильное влияние оказал Караваджо. В знаменитом произведении 1642 г. «Ночной дозор» (Рис. 34) Рембрандт создал эффектные контрасты светотени: стрелки выступают из ночной тьмы, но только фигуры трех главных мушкетеров освещены в полный рост, лица остальных лишь выхватчены светом. Чуть ранее, в 1630-х гг. сложился особый подход Рембрандта к освещению лиц в портретах. При такой схеме освещается только половина лица, другая половина остается в тени, кроме маленького треугольника на щеке. Итак, он уделяет особое внимание затененной части, но, в отличие от Караваджо, он обнаруживает во мраке и свет. Такой прием делает фигуру более объемной и живой и активно используется в фотографии.

Рембрандтовское освещение служит не только для передачи объема. По словам искусствоведа Е.И. Ротенберга, «светотень у Рембрандта превратилась в нечто более значительное – в эмоциональную субстанцию образа, в средство, воплощающее неразрывную связь объекта и окружения» [5, С. 40].



а)

б)

*Рис. 35 Рембрандт Х.Р. а) Портрет старика в красном. Около 1652-1654 гг. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург, б) Возвращение блудного сына. Ок. 1666-1669 гг. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург*

Феномен светотени Рембрандта заключается в создании светящейся атмосферы. Искусствовед Н. Дмитриева назвала это «сиянием во мраке» [4, С. 342]. Свет, падающий на героев, посредством бликов и рефлексов распространяется и озаряет пространство сложно уловимым сиянием.

Такого эффекта художник достигал, в том числе, и при помощи цвета. По словам искусствоведа Е.И. Ротенберга, «Свет Рембрандта имел и колористические характеристики. Это всегда теплый свет, сияющий, который озаряет всю картину теплыми бликами. Ее проникающая способность распространяется и на колорит. Частицы красочной материи как бы изнутри заряжены светом, отчего возникает эффект горящих и тлеющих красочных тонов <...> градации красного распространяются в костюмах действующих лиц от глубокого темно-зеленого, словно втягивающего в себя лучи света, через интенсивный тон, напоминающий оттенок раскаленных углей, к ярким, а затем угасающим тонам оранжевого» [5, С. 44].

Лучшей иллюстрацией этого приема служат картины позднего периода мастера из собрания Государственного Эрмитажа «Портрет старика в красном» и «Возвращение блудного сына» (Рис. 35). Они выдержаны в коричнево-охристо-красноватой гамме. На портрете старик изображен в красном одеянии, из-за чего вся картина создает впечатление теплого огня, который светится в душе и глазах героя. В картине «Возвращение блудного сына» частицы красноватого света распространяются по всему полотну, от одного героя к другому, рассеивая мрак и перенося теплое сияние во все зоны живописного пространства. Картина, рассказывающая о любви и прощении, словно соткана из созидющего света Рембрандта.



*Рис. 36 Вермеер. Вид Делфта. 1661 г. Маурицхейс, Гаага*

Современник Караваджо и Рембрандта голландец Ян Вермеер сосредоточился на созерцании и поэтизации бытовой жизни и предпочитал солнечный свет и дневное время суток.

Ян Вермеер был мастером в передаче света и воздуха. Из 36 сохранившихся работ только две являются пейзажными, но и в них он проявил новаторство. Давайте рассмотрим картину «Вид Делфта» (Рис. 36). Основной интерес представляет световая схема, которая строится на естественном освещении в облачную погоду. Примечательно то, как художник разделяет планы между собой. Облако препятствует попаданию солнечного света на средний план картины. Для того чтобы показать, что это тень от облака, художник прописывает светлыми красками дальний план, который выглядывает из-за затененных домов. Для увеличения контраста между передним светлым и средним темным планом возникает светлое пятно неба, отраженного в воде. Темные силуэты отраженных зданий подчеркивают переменчивое дневное освещение в облачный день. Таким образом, с композиционной точки зрения мы видим контраст темного на светлом. Поэтому люди, находящиеся на переднем светлом плане, уходят на второй смысловой план, по сравнению с контрастным пейзажем центральной области картины.

Ян Вермеер прославился неприхотливыми бытовыми сценками, которые в основном писал в мастерской своего дома, поэтому на них часто повторяются предметы и обстановка. В своих работах Вермеер исследовал световоздушное пространство комнаты и делал это настолько тщательно, что современные исследователи его подозревают в использовании камеры-обскуры и других оптических инструментов.

Искусствовед Е.И. Ротенберг охарактеризовал свет в живописи Вермеера как «всепроницающие частицы серебристого света» [5, С. 56]. Главными действующими лицами его картин являются люди, которые музицируют, читают письмо, пишут картину, или же не спеша наливают молоко (Рис. 37). По словам искусствоведа Ж. Базена, для Вермеера «свет становится главным инструментом для придания материальной формы таинственной жизни души» [1, С. 102].

Художник применял принципы световоздушной перспективы в пространстве комнаты и добивался очень важных результатов. Он передавал движение воздуха, блики, рефлексии, тончайшие переливы одного цвета в другой. Жемчужно-серый цвет объединяет живописное пространство. Стену или другую поверхность он никогда не писал одним цветом, а прорабатывал множество оттенков, выявляя неуловимые нюансы.

Рассмотрим типичную световую схему Вермеера, по которой фигура человека находится в боковом свете окна (Рис. 37). Обратите внимание,

как разнообразно написаны затененные стороны лиц. У молочницы (Рис. 37а) тень достаточно контрастная, у географа (Рис. 37б), напротив, теневая сторона лица высветлена за счет отражения света из комнаты. Художник не случайно выбрал такие схемы освещения. Тень на лице молочницы создает контраст лица с цветом фона. В случае с географом, сохранение естественной темной тени на лице в сочетании с темными деталями переднего плана сконцентрировало бы внимание зрителя на светлой поверхности шкафа позади фигуры человека, что нарушило бы смысловую композицию. Поэтому художник добавил отраженный свет, чтобы создать контраст светлого лица на относительно темном фоне, а «пересвет» щеки и карты в данном случае является художественным приемом для усиления контраста между композиционным центром и фоном.



а)

б)

*Рис. 37 Ян Вермеер а) Молочница. 1658—1660 гг. Государственный музей, Амстердам, б) Географ. 1668 г. Штеделевский художественный институт, Франкфурт*

В Голландии XVII века процветал и натюрмортный жанр. В.К. Хеда, В. Калф и многие другие художники славились передачей фактур разных предметов в живописных завтраках. В.К. Хеда в картине «Завтрак с омаром» (Рис. 38) лепит объемы светотенью, выявляя разнообразные поверхности яств и утвари. Можно долго рассматривать то, как мастерски художник передает отражение света от серебряной посуды, стеклянных бокалов, фарфоровых блюд, то, как свет отображается на материалах поверхностей. Этот и другие натюрморты – методическое пособие по фактурам бытовых предметов.



*Рис. 38 В.К. Хеда. Завтрак с омаром. 1648 г. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург*

Стоит отметить натюрморты французского художника Жан-Батиста Шардена (Рис. 39), творившего в XVIII веке. Детальная прорисовка взаимодействия света с различными материалами делает предметы на его работах «живыми». Философ Дени Дидро так высказывался о мастерстве художника: «О, Шарден, это не белая, красная и черная краски, которые ты растираешь на своей палитре, но сама сущность предметов; ты берешь воздух и свет на кончик своей кисти и накладываешь их на холст!» [6, С. 14]



*Рис. 39 Жан-Батист Шарден. Атрибуты искусства. 1766 г. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург*

Теперь давайте рассмотрим особенности и подходы классицистической системы живописи XVII века.

В классицистическом искусстве, где все воспринималось через призму образцового античного искусства, сформировались определенные принципы для создания идеализированной картины мира. Соответственно, в живописи появилась своеобразная система освещения. Создателем классицистического направления в живописи стал французский художник Николя Пуссен. В его картинах рассеянное освещение создает мир, в котором царит разум и все контролируется человеком.

Важно понимать, что все произведения классицисты создавали в мастерской, поэтому могли применять специфические приемы и даже своеобразные устройства. Известно, что Н. Пуссен для работы над картинами использовал модели: он создавал 20-сантиметровых глиняных персонажей, одевал их, располагал на смоделированной объемной сцене с нарисованным пейзажным или архитектурным задником и помещал в коробку. По бокам коробки он делал небольшие отверстия, в которые направлял свет. Через другое отверстие на передней стенке конструкции он рассматривал сцену.

Историческая и мифологическая живопись Пуссена является наглядным пособием по выстраиванию пространства при помощи света. Для придания пространству объема он использует естественные эффекты солнечного света. Чем драматичнее сюжет, тем ниже Солнце относительно линии горизонта и тем контрастней освещены фигуры.



*Рис. 40 Пуссен Н. Исцеление слепого. 1665 г. Лувр, Париж*

Одним из наглядных примеров работы Пуссена со светом является картина «Исцеление слепого» (Рис. 40). Художник выбирает предзакатный час, когда Солнце находится достаточно низко к горизонту. Боковой свет и низкое положение источника освещения создают сильный контраст между

освещенными областями и тенями. Для того чтобы усилить контраст между передним и дальним планом, художник возводит стену на пути движения света с левой стороны, за счет чего средний план погружается в глубокую тень. Горы на горизонте, залитые лучами Солнца, не могут быть такими же яркими, как передний план, поэтому художник создает иллюзию дымки, приглушая дальний план.

Клод Лоррен, другой подданный Франции, стал первым художником в мировом искусстве, кто исследовал освещение в пейзаже в разное время суток и проблему светонасыщенности в атмосфере. В серии «Времена суток» он продемонстрировал особенности освещения в утренние часы, в полуденное время, в сумеречный период и ночью. Важнейшим компонентом, раскрывающим состояние природы, в этих работах является свет. Художник избегал резкой светотени, напротив, выстраивал мягкие переходы от света к тени.

В зрелом творчестве он создал цикл работ, в которых наблюдал рассветы в гавани. В Государственном Эрмитаже хранятся две картины из этой серии: «Утро в гавани» 1634 г. и конца 1630-х - начала 1640-х гг. (Рис. 41).



а)

б)

*Рис. 41 К. Лоррен Утро в гавани. а) 1630 г. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург, б) конец 1630-х - начало 1640-х гг. Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург*

Полотна посвящены свету, его распространению в пейзаже в один из кульминационных моментов – во время восхода Солнца. Свет льется из глубины, заливая и окрашивая воздух и здания золотистым сиянием. Художник прорабатывает утреннюю светящуюся дымку, прописывает солнечные блики на воде и зданиях, словно прокладывая путь солнечных лучей. Строения играют и другую важную роль в картине: свет, отраженный от архитектурных сооружений, бликует на водную гладь – это наблюдение делает работу со светом еще более тонкой и правдоподобной.

Клод Лоррен исследовал свет и его распределение – озарение пространства особым золотистым сиянием, тем самым он повлиял на развитие европейского пейзажа.

В конце XVIII века английский художник Джозеф Райт из Дерби создал несколько ночных пейзажей, где решил проблему не ночного мрака, а ночного света. Его интересовали разнообразные световые эффекты, например, фейерверки или извержение вулкана. В работе «Кузница. Вид снаружи» (Рис. 42) он пишет одновременно теплый свет огня и холодный лунный. Решение этой сложной задачи представляется нам следующим шагом в истории освещения в живописи: это одновременно контраст света и цвета.



*Рис. 42 Джозеф Райт из Дерби. Кузница. Вид снаружи. 1773 г.  
Государственный Эрмитаж, Санкт-Петербург*

Итак, мы с вами рассмотрели совершенно разные живописные системы XVI–XVIII веков с индивидуальными подходами художников к освещению. Как видите, этот период хранит множество приемов в работе со светом. Формат методического пособия не позволяет рассмотреть образцы живописи XIX–XXI вв., поэтому советуем вам самостоятельно изучить работы зарубежных и русских художников, например, Э. Делакруа, Г. Курбе, К.П. Брюллова, С.Ф. Щедрина, А.И. Куинджи, И.Е. Репина, В.А. Серова, И.И. Шишкина, художников-импрессионистов и др. Мы надеемся, что смогли вас вдохновить на изучение истории искусств – сокровищницы знаний для современного дизайнера.

### **3. Роль света в 3D-графике**

Одной из важнейших задач, решаемых разработчиком сцен в редакторах 3D-графики, является управление качеством представления материалов и света в итоговой презентации продукта. Процесс преобразования виртуальной среды в итоговый продукт называется визуализацией (рендерингом). В профессиональных проектах требования к визуализации прописываются в техническом задании, но результаты опытного разработчика и новичка могут сильно различаться. Это связано с тем, что на уровень итогового представления виртуальной среды оказывает влияние не только сложность стилизации объектов, но и качество материалов, светотени и атмосферных эффектов.

На сегодняшний день 3D-графика широко применяется в разработке компьютерных игр, кинопроизводстве, инженерном проектировании и прототипировании, а также в обучении, научных исследованиях и для решения различных презентационных задач. Поэтому понимание процессов качественной настройки рендеринга является востребованной профессиональной задачей.

В редакторах 3D-графики среда виртуального пространства изначально не обладает законами реального физического мира: здесь нет погоды, Солнца, силы тяготения и иных внешних факторов до тех пор, пока разработчик виртуальной среды не назначит определенные параметры виртуальному миру. Поэтому, чтобы «погрузить» зрителя в виртуальный мир, необходимо достоверно презентовать пространство и объекты. Для создания убедительных и реалистичных визуализаций важно достичь узнаваемости материалов 3D-моделей, а также достоверно передать условия существования этого объекта в представленной среде. В решении этой задачи ключевую роль играет постановка света и настройка поведения материала.

Результат визуализации можно презентовать в различных формах: в виде изображения, видеоряда, интерактивного 3D-приложения. Каждый из перечисленных форматов имеет свои особенности в постановке света, а также в требованиях к оптимизации моделей и текстур.

#### **3.1 Разновидности систем освещения в 3D-редакторах**

Существует множество 3D-редакторов, которые можно условно разделить на пять больших групп: редакторы полного цикла задач (3Ds Max, Blender, Maya и т.д.), специализированные редакторы для решения определенных задач по моделированию (AutoCad, SolidWorks, Zbrush, 3D-Coat и т.д.), для решения задач по сложному текстурированию (Substance Paint), для решения задач по эффектам и постобработке (Nuke, Cinema 4D),

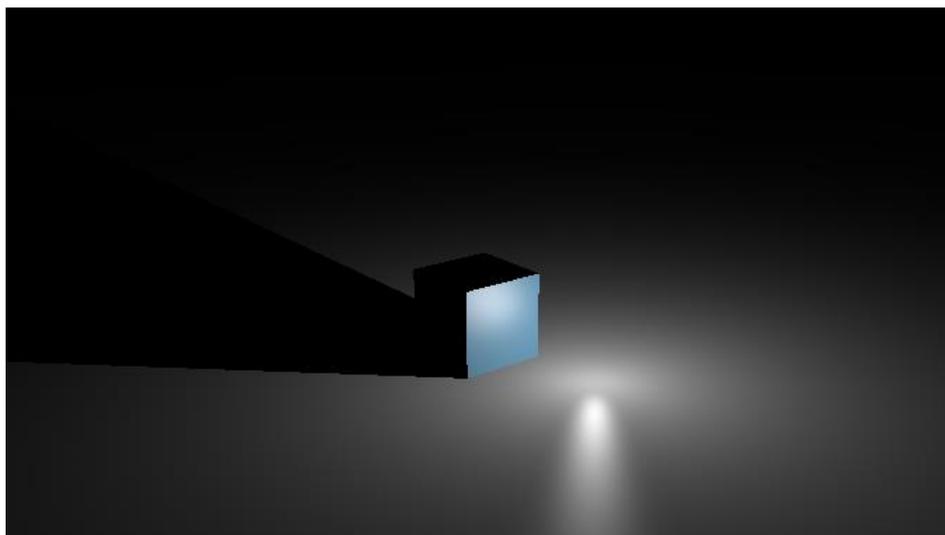
интерактивные движки (Unity, Unreal Engine). Кроме того, существуют программы с узкой специализацией в области компьютерного проектирования освещения для решения определенного рода задач (IESviewer, DialLUX).

Так как большинство начинающих разработчиков 3D-графики используют универсальные редакторы, в данном пособии приведены практические рекомендации на примере интерфейса программы Blender. Программа является бесплатным 3D-редактором и доступна для скачивания на официальном сайте. Кроме того, она хорошо оптимизирована и позволяет решать большой спектр задач по моделированию, скульптингу, анимации и визуализации даже на компьютерах с небольшой производительностью. Следует учитывать, что большинство редакторов 3D-графики весьма требовательны к ресурсам компьютера (процессор, оперативная память, видеокарта) в процессе работы и, в частности, настройке света.

Как сформировать общие представления по работе света в 3D, если рассматривать интерфейс конкретного редактора? Дело в том, что любая программа по работе с 3D-графикой включает внутреннюю стандартную систему освещения и камер, благодаря которой пользователь может видеть форму 3D-моделей. Несмотря на большое количество графических редакторов и визуальное различие их интерфейсов, в основе лежат схожие математические алгоритмы преобразования виртуального образа. Данный вопрос будет подробнее рассмотрен в следующем разделе.

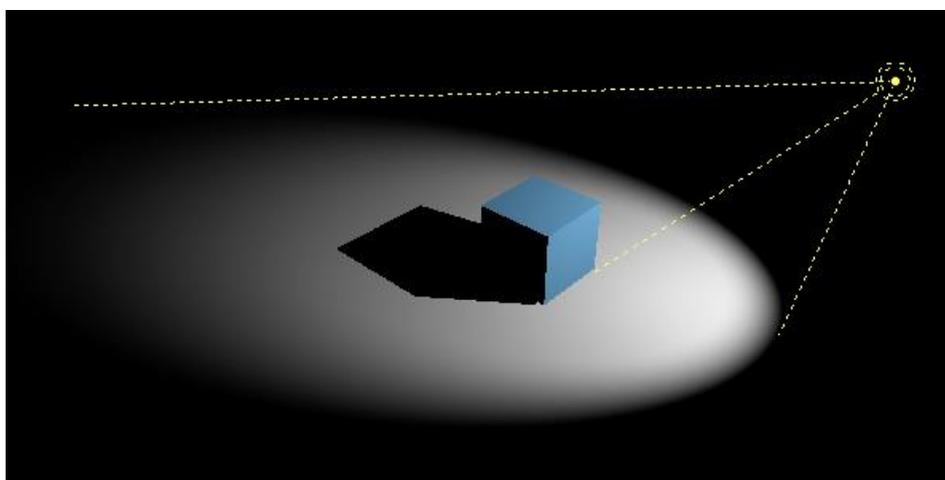
Зачастую в программы включены основные типы источников освещения, которые схожи по количеству и принципу работы в аналогичных 3D-редакторах. Среди них могут встречаться: **всенаправленные** источники света (в интерфейсах чаще именуется как omni или point light), **направленные** (target light, spot light), **протяженные источники света** (area light), **заполняющие** полусферические источники света (skylight или hemi-light), **системы естественного освещения** (sun light, day-light), рассеянное освещение (ambient light).

**Всенаправленный источник света** (Рис. 43) представляет собой равномерный поток света, распространяющийся из точки во всех направлениях. Являясь точечным источником света, он чаще используется для имитации света ламп, свечи, при создании световых эффектов. Как правило, такой тип источников света ограничен в количестве настраиваемых параметров. К ним следует отнести: цвет света, диапазон освещаемой области, интенсивность светового потока и, конечно, координаты расположения источника в виртуальной среде.



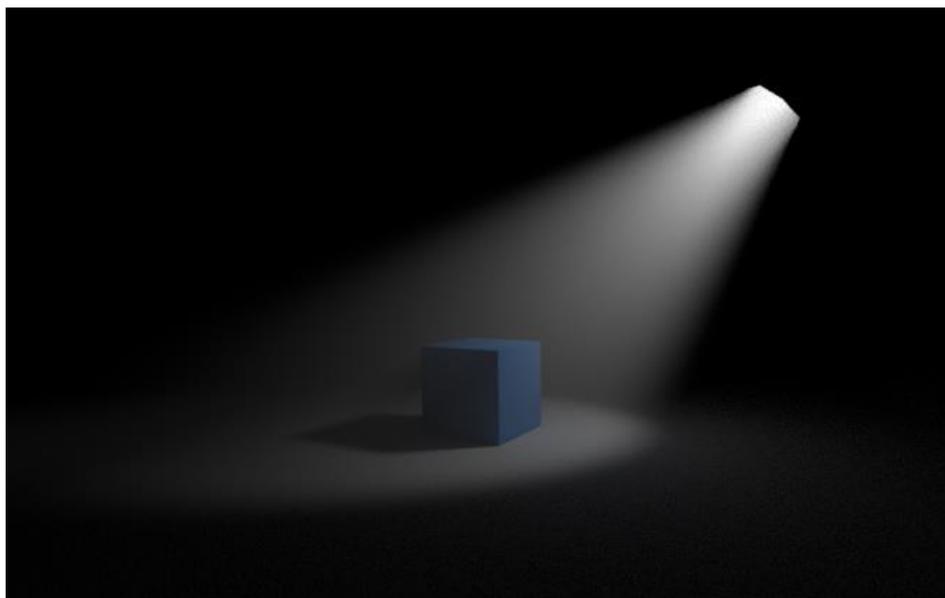
*Рис. 43 Демонстрация работы Spot с пониженной интенсивностью, относительно стандартного значения*

**Направленный источник света** (Рис. 44) позволяет имитировать свет от прожектора. В данном случае световой поток можно настраивать не только с точки зрения дистанции, но и области рассеивания света. Обычно в интерфейсах редакторов к уже перечисленным выше параметрам добавляется степень светотеневого перехода, что позволяет получать на поверхностях мягкие или жесткие падающие тени от объектов.



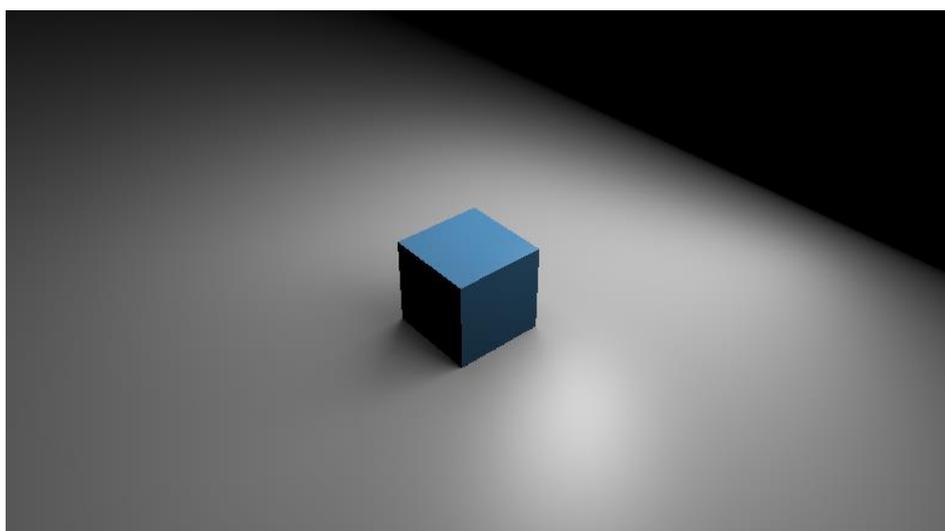
*Рис. 44 Демонстрация работы Spot Light в Blender*

Используя дополнительные алгоритмы настройки направленного источника освещения, можно добиться эффекта объемного света (Рис. 45), имитирующего прохождение сквозь поток мельчайших частиц пыли, висящих в воздухе.



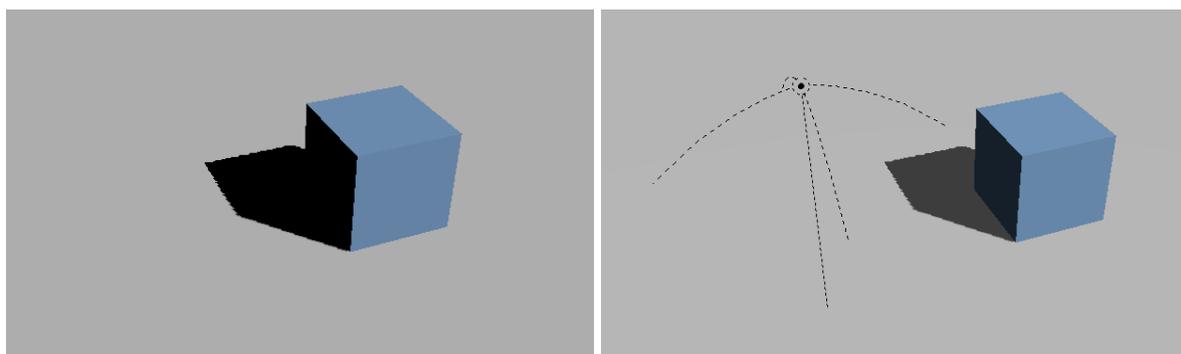
*Рис. 45 Демонстрация работы объемного Spot Light в Blender*

**Протяженные источники света** (Рис. 46) позволяют пустить световой поток по области. Это важно при заполнении светом замкнутых пространств и при имитации отраженного света от поверхностей.



*Рис. 46 Демонстрация работы источника света Area Light в Blender*

**Заполняющий свет** (Рис. 47) позволяет заполнить всю сцену интенсивным не рассеивающимся светом, подобно световому куполу. Также этот тип источника используют для того, чтобы проявить геометрию в тенях, так как при одном источнике света пиксели в тенях принимают глубокий черный цвет.

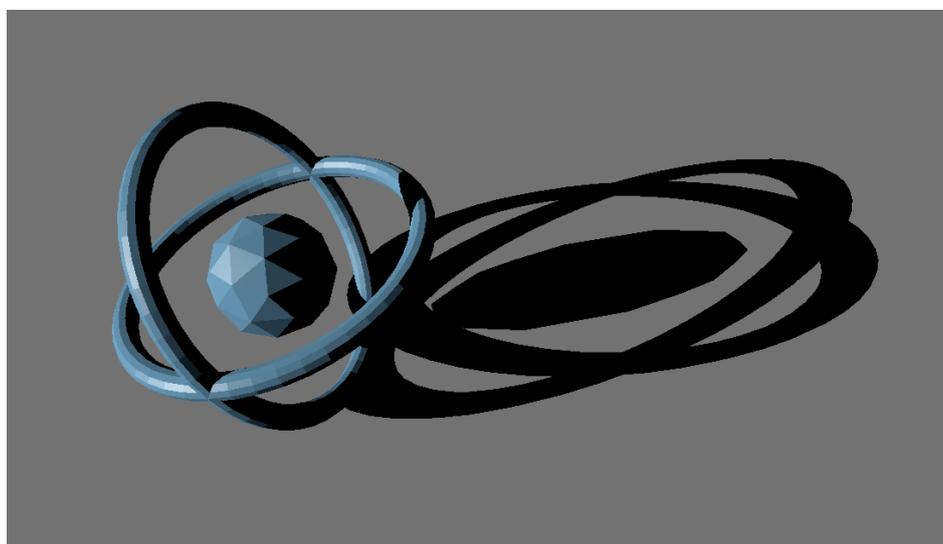


а)

б)

*Рис. 47 Пример сцены в Blender а) без использования заполняющего света, б) с применением Hemisphere Light*

**Источники естественного света** (Рис. 48) применяются для имитации солнечного освещения. Чаще всего их используют при создании 3D-сцен с открытым пространством (например, для визуализации экстерьера архитектурного сооружения). В отличие от других типов источников света, данный источник воздействует на всю сцену, подобно Солнцу. В связи с этим положение точки света относительно объекта не имеет значения. Характер света определяется наклоном вектора относительно плоскости, который влияет на температуру освещения. Отдельно можно настроить интенсивность света, благодаря чему создать иллюзию естественного освещения в разное время суток, а также при разных погодных условиях (смотрите раздел 1).



*Рис. 48 Пример использования Sun Light в Blender*

Некоторые редакторы (в том числе Blender) или расширения для них позволяют организовать системы **глобального освещения** (Global Illumination). Это комплекс сложных алгоритмов, при помощи которых в процессе визуализации просчитывается не только прямой свет от источников света, но также отраженный и рассеянный свет от различных

поверхностей. Если для решения задачи генерации освещения поверхностей применяется трассировка лучей (raytracing), такие методы называют **фотон мэппинг**.

Глобальное освещение передает объем 3D-моделей корректнее, чем это делает стандартная система рендеринга. Благодаря этому можно добиться более правильной светотеневой моделировки и реалистичной передачи характера поверхностей.

### 3.2 Комплексная работа с освещением в 3D-редакторах

Существует множество способов создания выразительного света в 3D-редакторе. Эта особенность является главным преимуществом 3D-графики: в процессе прототипирования один и тот же продукт можно представить в различных условиях света еще до этапа производства.

Зачастую для формирования эффектной итоговой визуализации недостаточно одного источника света (Рис. 49). Если задача требует постановки выразительного сценария освещения, то рекомендуется спланировать результат, найти подходящие референсы, используя, например, наследие мировой истории живописи. После этапа планирования можно приступить к проектированию света в 3D. Отметим, что результат будет зависеть не только от количества и типов источников света, но и от настроек каждого из них. Однако не следует забывать, что восприятие сцены формируется в результате взаимодействия света и материала.

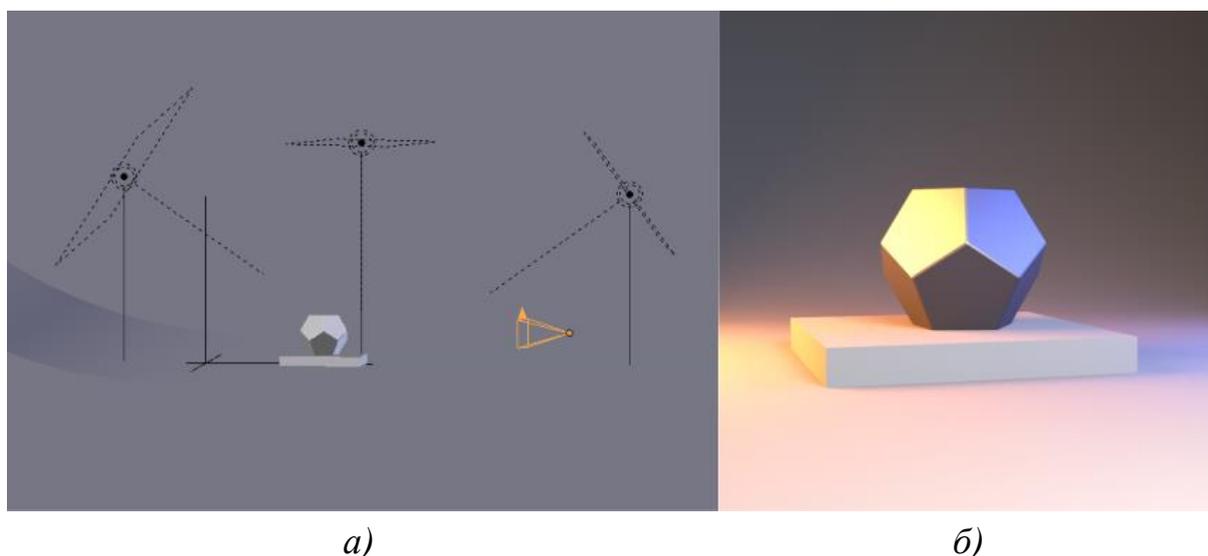
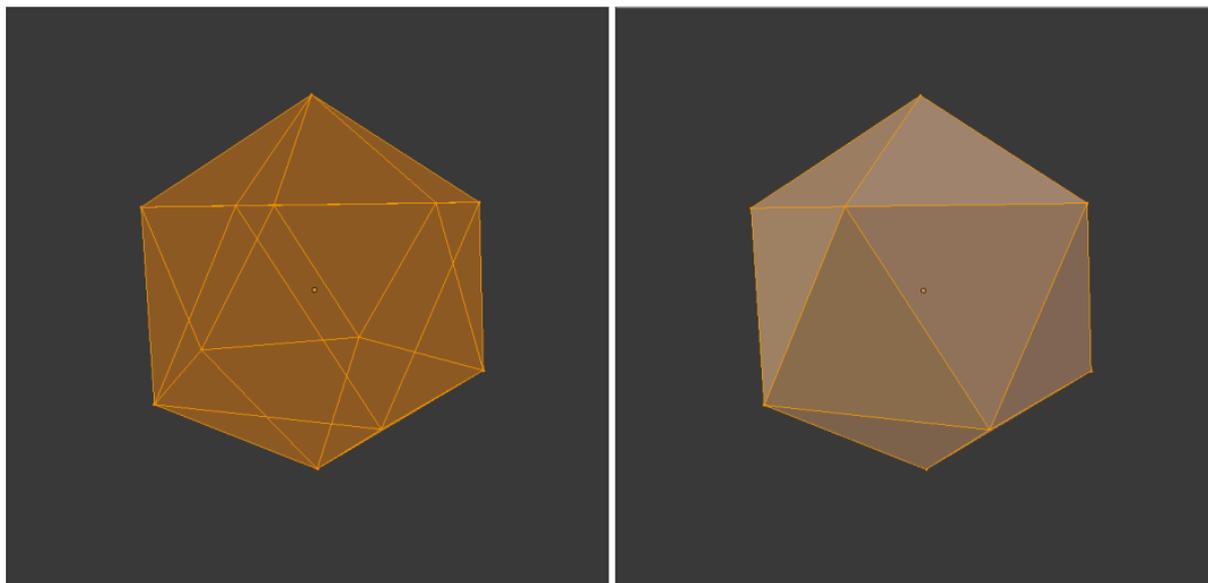


Рис. 49 Пример постановки светового сценария из 3-х источников света в Blender а) в окне редактора, б) результат визуализации

Для воссоздания образа реалистичного материала в виртуальном мире следует понимать базовую структуру полигональной 3D-модели и смысл

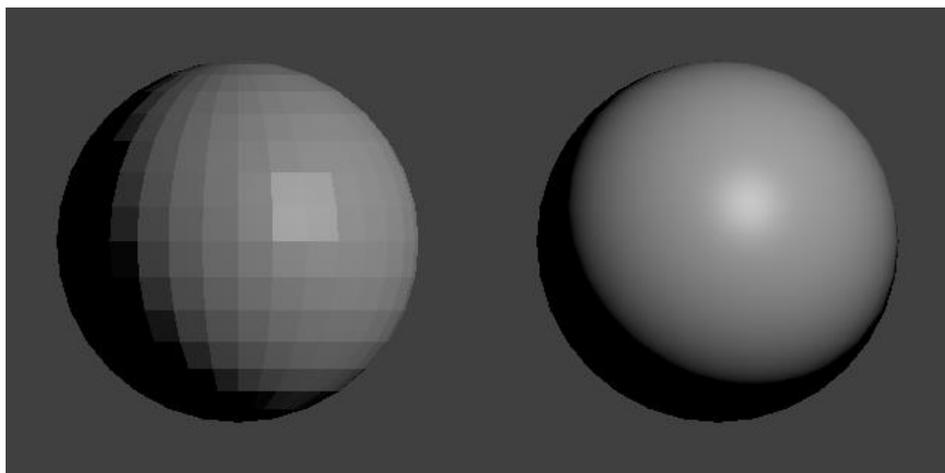
таких понятий, как: текстурная карта, процедурная карта, карта диффузий, карта отражений, альbedo, рельефное текстурирование, ambient occlusion и др.



*Рис. 50 Каркас примитива IcoSphere в Blender*

В основе трехмерных объектов, смоделированных полигональным способом, лежит **полигональная сетка (mesh)**. **Каркас модели (Рис. 50)** в таком случае строится из следующих подобъектов: вершины (vertices), ребра (edges), полигоны (сегменты), нормали (normals). **Вершины** являются наименьшей структурной единицей каркаса и содержат информацию о местоположении в 3D-пространстве (X,Y,Z), цвете, текстурных координатах, векторе нормали. **Ребра** представляют собой соединения двух вершин. **Полигон** (также сегмент или face) – поверхность, образованная замкнутой петлей из ребер, лежащих в одной плоскости. **Минимальная структура полигона** – поверхность в виде треугольника. Но также могут быть полигоны, состоящие из 4х и более вершин.

**Нормаль** – вектор, перпендикулярный поверхности 3D-модели в данной точке. По направлению нормали 3D-редактор определяет, под каким углом следует отражать луч света (Рис. 51). Также нормаль помогает установить, как именно следует рассчитать освещение при визуализации поверхности в условиях, когда она находится в тени от заслоняемого предмета. Кроме того, нормали направлены под определенным углом к вершинам. Меняя угол направления, можно повлиять на отображение одной и той же 3D-модели с позиции сглаженности поверхностей.



*Рис. 51 Сфера с углом нормалей вершин в  $90^{\circ}$  (слева) и с усредненным значением (справа)*

**Текстурная карта (Texture map)** – схема проецирования изображения на компоненты 3D-сцены (полигоны 3D-моделей, материалы, источники света, фон, системы частиц), которая представляет собой или прямоугольный массив (растровые изображения), или математический алгоритм (процедурные текстурные карты).

**Наложение (Mapping)** текстурной карты – это математическая процедура, позволяющая спроецировать текстуру на компонент 3D-сцены или связать ее с объемным визуальным эффектом (например, эффектом тумана, объемного света, систем частиц).

Для корректного наложения текстуры на 3D-модель применяется метод **текстурных разверток (UV-mapping)**. Это процесс сопоставления между координатами точек поверхности 3D-модели (X,Y,Z) и координатами пикселей у текстуры (U,V).

**Карта «диффузии» (Diffuse Color/Map)** может трактоваться по-разному в зависимости от типа редактора. В игровых движках под картой диффузии понимается базовый цвет материала (еще может именоваться картой «альbedo»). Также этот канал может использоваться как база для цветной текстуры. Если игровой движок позволяет обрабатывать свет, тени и блики, то карта диффузий обычно не содержит информации об освещении, так как за это отвечают другие каналы (карты отражений или карты нормалей).

Для рендеринга в его классическом понимании диффузная карта может означать канал, обеспечивающий контроль распространения любого света, отражаемого от поверхности материала.

**Карта зеркального отражения (Specular Color/Map)** – карта, отвечающая за интенсивность и цвет отраженного света от поверхности материала. Если в качестве карты specular использовать изображение с alpha-каналом,

это позволит определить 3D-редактору, в каких частях поверхность 3D-модели должна отражать больше света, а в каких – меньше. Черные области alpha-изображения означают отсутствие зеркальных отражений, белые области – максимальное отражение света.

Карта **bump** позволяет создать иллюзию шероховатости (или фактуры) поверхности 3D-модели. При этом моделирование сложной геометрии мелких деталей в данном случае не предполагается. В качестве карты bump обычно используется монохромное изображение. В зависимости от оттенков серого (или интенсивности цвета текстуры) карта bump передает 3D-редактору информацию о том, как необходимо отобразить зрителю деформацию поверхности по глубине (выпукло или вогнуто за счет освещения). К недостаткам карты bump следует отнести небольшой угол обзора, при котором сохраняется эффект иллюзии деформации поверхности. Также ощущение иллюзии теряется при относительно близком расположении точки взгляда к рассматриваемой поверхности. Поэтому такой прием чаще используется в совокупности с другими способами рельефного текстурирования.

**Карта нормалей (Normal map)** – специализированное RGB-изображение, которое хранит в каждом пикселе направления нормалей по отношению к поверхности 3D-модели. Красный, зеленый и синий каналы используются для управления направлением нормали каждого пикселя. Данная карта обычно применяется для создания иллюзии наличия деталей и деформаций высокого разрешения на моделях с более низким числом полигонов. При этом контур исходной модели не меняется.

**Карта высот (Displacement map)** является еще одним приемом рельефного текстурирования. В отличие от предыдущих методов, карта высот подразумевает проецирование изображения в оттенках серого на геометрию и, как следствие, управление положением ее вершин вдоль оси глубины. При этом, чем темнее участок изображения, тем меньше будет деформаций поверхности и, наоборот, чем больше светлых областей – тем сильнее будет деформироваться поверхность вдоль оси глубины. Первым недостатком данного приема является требующаяся высокая плотность полигональной сетки 3D-моделей (чаще всего достигается за счет автоматического процесса тесселяции, т.е. программного уплотнения полигонов). Вторым недостатком является необходимость просчета детализации геометрии на стадии рендеринга, что может значительно увеличить время ожидания итоговой визуализации.

**Карта прозрачности (Transparency map)** – текстурная карта, позволяющая достигать эффекта прозрачности поверхностей 3D-модели в заданных координатах. Карта используется для объектов, которые имеют в совокупности либо прозрачные, либо полностью непрозрачные фрагменты. Такая карта позволяет пропускать световой поток в местах прозрачности,

что в результате дает реалистичные падающие тени на окружающих объектах.

**Карта Metallicity** отвечает за степень отражательной способности металлической поверхности (управление интенсивностью характерного металлического блеска). Обычно параметр канала *metallicity* варьируется от 0 до 1. Чем он ближе к 0, тем материал больше выглядит как неметалл, и чем ближе к 1, тем более металлическим выглядит материал поверхности.

**Карта ambient occlusion (АО)** позволяет создать эффект мягкого затенения модели, как если бы она освещалась не прямым светом, а в облачный день (с учетом отражения и рассеивания лучей света). Иными словами, это метод создания иллюзии системы глобального освещения. Интенсивность и дистанцию затенения можно варьировать с помощью параметров 3D-редактора. В результате получаются светотеневые переходы на поверхностях, визуально приближенные к реальности. Особенно данный эффект нагляднее в труднодоступных для света местах: впадинах, нишах, щелях.

**Обычно карта АО** получается процедурой «запекания» из геометрии, потому что эффект затенения создается с использованием светового решения не в реальном времени. Итоговый результат может быть либо сохранен в текстуре, либо в цветах вершин модели.

Существует также технология **Screen Space Ambient Occlusion (SSAO)**, чаще применяющаяся в игровых приложениях. Это метод генерации АО всех объектов в пределах экрана в реальном времени. Особенностью метода является то, что здесь вообще не требуется запекать АО текстуры, однако может потребоваться более мощная видеокарта для расчетов, а еще не везде затенение будет гарантированно корректным.

**Self-illumination** – эффект свечения поверхностей. Обычно параметр варьируется от 0 до 1. Чем выше параметр, тем, соответственно, больше материал объекта «излучает» свет, т.е. становится более ярким и менее восприимчивым к внешним источникам света. Однако важно отметить, что окружающие 3D-модели при этом не освещаются от «излучения» объекта с материалом самосвечения.

После настройки всех свойств материала и света можно приступить к просчету картинки, но зачастую во время просчета представления проявляется **шум**. Процент шума в освещенной области и тенях зависит от количества прогонов (операций вычисления) движка рендеринга. Поэтому важно настраивать не только источники света, но также материалы 3D-моделей и параметры визуализации.

## 4. Применение программируемого света в CG

Начиная свой путь в 3D, мы знакомимся с основными идеями: что привычные предметы можно описывать с помощью большого числа треугольников, что треугольники содержат по три вершины, а каждой из вершин можно сопоставить некие значения. Например, чтобы изображение стало реалистичным, используется карта текстур, но чтобы текстура оказывалась в нужных местах, вершинам следует сопоставить текстурные координаты UV. Стремясь к еще большему реализму, 3D художник реализует карты нормалей, transparency, metallicity, рассчитает карты displacement, ambient occlusion, thickness и получает, считывая атрибуты из этих карт по интерполированным текстурным координатам, изображение предметов со сложными материалами.

То время, когда результат работ одиночек, посвятивших себя в трехмерной графике, воспринимался сообществом как профессиональный, давно прошло. В современной индустрии – будь то кино, проектирование, разработка компьютерных игр и т.д., конкурентными преимуществами обладают те, кто научился разделять работу между квалифицированными специалистами, когда каждому удастся поддерживать уровень мастерства. Инновационные разработки по оптимизации 3D графики продвигаются за счет известных брендов корпораций или в групповых исследованиях мировых университетов. И, тем не менее, чтобы понимать фундамент процессов, с которыми прикладник сталкивается каждый день, полезно знать имена первопроходцев и тесную взаимосвязь визуализации и математики.

### 4.1 Что такое шейдер?

Этот термин возник давно и связан с процедурой растушёвки, когда технические рисунки или чертежи с помощью акварели или туши превращали в полноцветные изображения. Так как такие чертежи выполнялись с помощью графопостроителей, то есть содержали лишь цветные линии на белом фоне, возникла задача автоматизировать и описанный процесс. А с появлением цветных мониторов, когда изображение рассчитывается центральным процессором и передается видеокarte с достаточным объемом ОЗУ, стал употребляться термин рендеринг, это слово имеет ряд значений и сходно с нашим многозначным словом «представление». Слово «шейдер» стало обозначать программу, рассчитывающую затенение (shade) для материала, характеристика которого могла быть задана как для объекта целиком, или для отдельных вершин по-разному.

В конце 70-х годов рабочие станции стали применяться в конструировании, в системах САД-САМ. До появления динамичных игр оставались годы, рендеринг простейших сцен мог занимать часы. Специалисты по компьютерной графике мечтали научиться получать изображения, схожие с теми, что мы видим на фотографиях – эта проблема стояла, например, в дизайне автотранспорта, бытовой техники, интерьеров и мебели. И ее по-своему решали и специалисты по технической эстетике, и дизайнеры интерьеров, но полагаясь на техники рисунка, акварели, аэрографии или акриловых красок. Хотя такие работы впечатляли, например, сходством с фотографиями, как раз субъективность и определяла границы использования сделанных от руки изображений.

При этом оптические свойства материалов могут быть точно измерены при использовании специального прибора-гониометра, и представлены в виде таблиц или выражены с необходимой точностью аналитическими формулами. Запускаемые на центральном процессоре программы, реализующие определение атрибутов вершин или пикселей с помощью подходящих аналитических формул, стали называть шейдерами, добавляя фамилию ученого, введшего их в практику, например – шейдер Гуро, Фонга, Варда, Торренса и т.п., или указав материал – *Metallic paint*, *Porcelain*, *Marble*. В последнем случае часто шейдер содержит комбинации нескольких формул, процедурные генераторы, когда атрибут цвета или блеска вычисляется в зависимости от трех координат, разнообразные оптимизации и т.д.

Распространение процессоров архитектуры RISC, применявшихся в конце 80х годов и первой половине 90х для решения задач проектирования, как и запрос индустрии кино, отделяло элитарный мир инженеров и художников от мира пользователей ПК. Графика использовала ПО, написанное на языках C и C++, которое можно было откомпилировать под ОС UNIX и запускать на чрезвычайно дорогих рабочих станциях, обладавших нужной производительностью и объемом памяти. Язык Pixar RenderMan развился для описания формы объектов и материалов, он не определяет, как именно вычисляются атрибуты пикселей. Этот язык описывает, что должно быть визуализировано, а возможность достигать лучшего результата, используя передовые техники, обеспечило этому языку долгую жизнь.

Следует обратить внимание: такой подход к визуализации отличается от конвейера, который мы привыкли видеть в системах реального времени – Direct3D или OpenGL. Воплощенный в системе Reyes, он формирует изображение последовательно, участок за участком, и разбивает поверхности на элементы меньше пикселя, так, чтобы не было видно никаких треугольников. Он описывает точки на изображении как пятимерную выборку, добавляя два измерения для моделирования глубины резкости: два для антиалиасинга и еще один для смазывания при

движении (эффект motion blur). Кроме того, он может учесть эффекты полупрозрачности и нужен для получения изображения с качеством, ожидаемым в кино. К слову, с его помощью были сгенерированы последовательности кадров в анимационных фильмах студии Pixar.

RISC процессоры по мере удешевления памяти не пропали. Подобно рабочим станциям, их архитектурные решения совершенствовались. Одним из путей (а их множество) стали ускорители трехмерной графики. Тут такие процессоры реализовывали так называемую машину состояний. Машина состояний – это подход к реализации высокопроизводительных вычислений, при котором можно выделить host – центральный процессор и ускоритель, они взаимодействуют через интерфейс. Программа, исполняемая на ЦП, формирует данные в памяти (на материнской плате) и передает их ускорителю. В случае графики это вершины полигонов, матрицы преобразований T&L (transformation and lighting), текстуры, режимы смешивания. Когда заданы состояния для разнообразных стадий конвейера, ускоритель выполняет вычисления с недостижимой для центрального процессора скоростью над тысячами или десятками тысяч однородных данных. Вся информация о том, как именно обрабатывать эти данные, уже размещена в нужных регистрах: переносить ее из кэша в регистры, как это происходит при последовательном исполнении программного кода на ЦП, не нужно. А если некие вычисления, например, над атрибутами цвета или несколькими соседними пикселями (или группами из четырех пикселей) можно выполнить одновременно, то ускоритель так и поступит.

До 2000 года такой подход к визуализации не позволял использовать расчеты по аккуратным аналитическим формулам: такие расчеты изображений выполнялись лишь на CISC или RISC процессорах, с использованием чисел, представленных в формате FP32. Но постепенно, по мере развития ускорителей, стали использоваться карты нормалей и расчеты освещения для нескольких источников света в пространстве. Для этого применялась все более развитая и сложная машина состояний.

Но ведь «изнутри» эта машина состояний, так или иначе, была реализована с помощью программируемых RISC процессоров, как исполнение микрокода. Например, добавление смешивания результатов вычислений с помощью канала прозрачности alpha, возникающее редко, требовало добавить векторную инструкцию: скорее всего, она не меняла скорость работы ускорителя. А использование нескольких источников света, влияние которых учитывалось последовательно, приводило к добавлению последовательности инструкций микрокода. «Снаружи» это выглядело как требование учесть свет от большего числа источников света, и, теоретически, на очень производительных рабочих станциях на скорость

работы не повлияло бы, но мы рассматриваем доступные потребителям решения.

По мере совершенствования технологий производства микросхем стала возможной реализация произвольных микропрограмм, обрабатывающих атрибуты вершин или значения текстур для получения цветовых атрибутов пикселей. Такие программы стали называться вершинными и пиксельными шейдерами, а языки Cg, GLSL или HLSL, использовавшиеся для их описания, позволили писать программы, которые компилируются в объектный код (если в них нет ошибок) и далее в код, специфический для каждого поколения микроархитектуры конкретного производителя аппаратного обеспечения.

Работа с шейдерами может быть поддержана игровыми движками, причем исходный код шейдеров, написанный на HLSL, может быть запущен и на таких платформах, где не используется OS Windows. С момента появления программируемых шейдеров в 2002 году (шейдеры второго поколения, первое поколение было крайне ограниченным в плане функционала, и индустрия его пропустила) развитие технологий достигло уже шейдеров шестого поколения, и далее следует, не имеющее кросс-платформенной поддержки, поколение шейдеров (task shaders, mesh shaders от Nvidia и Primitive Shaders от AMD).

#### 4.2 Как задаются углы, применяемые при задании шейдера?

Большинство материалов, с которыми обычно приходится иметь дело, изотропные, т.е. яркость диффузной и зеркальной составляющей не зависит от положения источника света или наблюдателя от некоторого направления  $T$ , касательного к поверхности (Рис. 52).

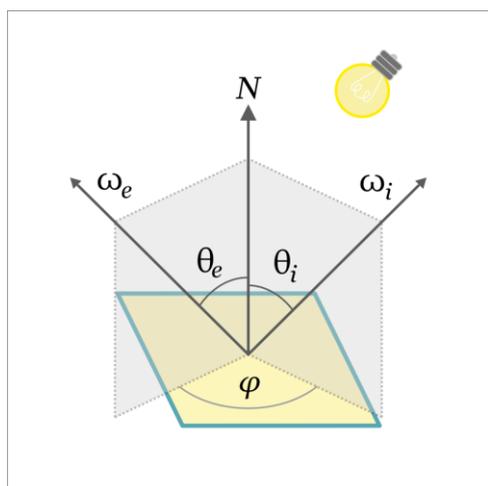


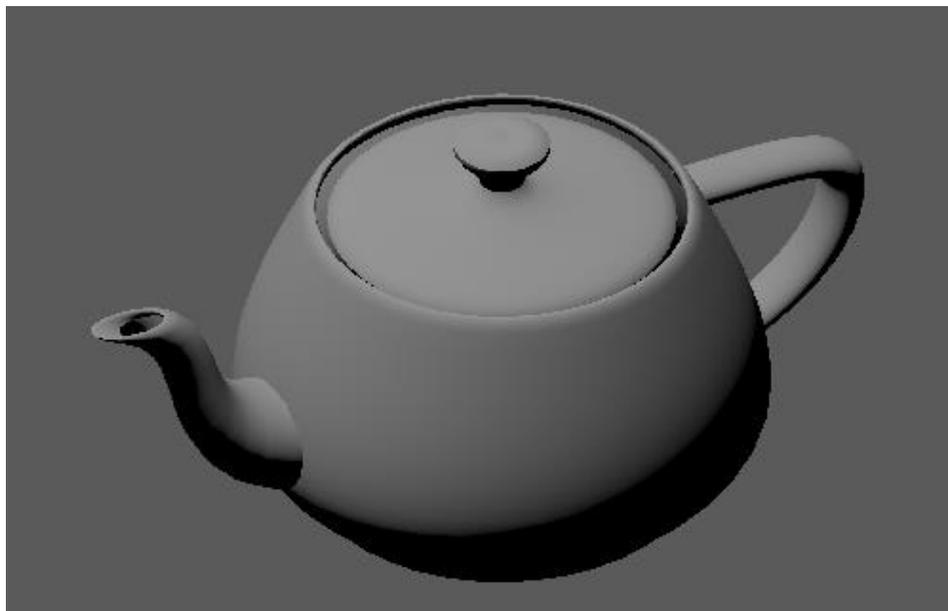
Рис. 52 Схема BRDF

Поясним схему на Рис. 52: вектор  $N$  – это направление нормали к поверхности; вектор  $\omega_i$ , “incident” – это направление на источник света; вектор  $\omega_e$  “exitant”, задает направление к наблюдателю; угол  $\theta_i$  между нормалью и направлением на источник света; угол  $\theta_e$  между нормалью и направлением к наблюдателю (зенитные углы); угол  $\varphi$  между двумя плоскостями, содержащими нормаль  $N$  и вектора на наблюдателя  $\omega_i$  и на источник света  $\omega_e$  (азимутальный угол).

При написании программных шейдеров используется вполне строгая научная база, использующая радиометрию и учитывающая законы

сохранения энергии. Двухнаправленная функция отражательной способности (BRDF – англ.) является основным инструментом при моделировании шероховатых поверхностей с заданными свойствами. Основываясь на гипотезе о геометрии микрограней, отбрасывающих тень или заслоняющих часть поверхности от наблюдателя, выводится аналитическое выражение, аппроксимирующее BRDF. Такие, физически обоснованные выражения оказываются сложными и вычислительно затратными. На практике часто обходятся упрощенными BRDF, но в последние годы наметилась тенденция применять сложные.

Самый популярный шейдер формирует диффузное освещение, также известное как «Ламбертова составляющая» (Рис. 53).



*Рис. 53 Демонстрация Ламбертова освещения на примере 3D-модели чайника*

BRDF для Ламбертова освещения рассчитывается так:

```
return vec3(reflectance / 3.14159265);
```

Как видим, BRDF будет константой, зависящей от некой величины *reflectance* – альбедо поверхности. Значение текстуры поверхности используется в качестве альбедо при расчете изображений.

А сам шейдер, рассчитывающий Ламбертову составляющую, будет записан так:

```
float val = max(0, dot(N,L));  
return vec3(val);
```

То есть шейдер, вычисляющий значения пикселя, получается как перемножение некой константы ( $\text{reflectance} / 3.14159265$ ) и скалярного произведения вектора нормали и вектора в направлении источника света, а так как отрицательный результат не имеет смысла, то ищется максимум:  $\max(0, \text{dot}(N,L))$ .

Для визуализации бликов используется вот такой код шейдера на GLSL:

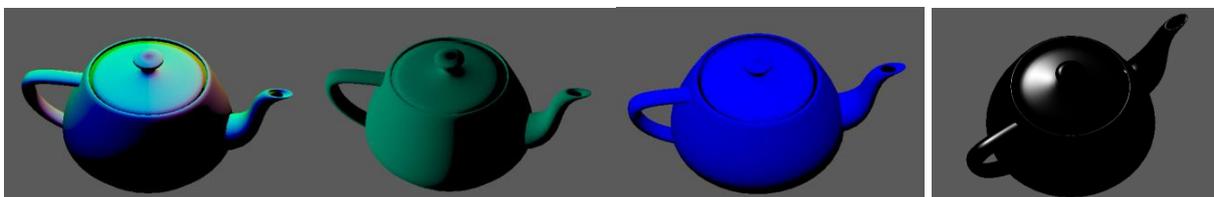
```
vec3 reflect(vec3 I, vec3 N)
{
    return 2*dot(I,N)*N - I;
}

// Phong BRDF

vec3 BRDF( vec3 L, vec3 V, vec3 N)
{
    vec3 R = reflect(L,N);
    float val = pow(max(0, dot(R,V)),n);
    return vec3(val);
}
```

Для реализации шейдера Фонга (Рис. 54) нужно домножать найденное с помощью BRDF Фонга величину на значение  $\max(0, \text{dot}(N,L))$ .

Для определения значений, возвращаемых функциями, и переменных используется `vec3`, что соответствует вектору из трех переменных типа `float`. Процедура `reflect()` для вектора `I` (incident) и вектора нормали `N`, вычисляет вектор отражения `R`, и далее, определяется скалярное значение `val`. Функция `pow(max(0,dot(R,V)),n)` сперва находит скалярное произведение найденного вектора отражения `R` и вектора `V` – направление к наблюдателю, а затем для положительных значений возводит его в степень `n`.



*Рис. 54 Демонстрация работы шейдера Фонга*

При написании шейдера имеется возможность просматривать аргументы, непосредственно выводя на экран в каналы RGB значение нормали `N` или вектор `L` и `V`, как на первых трех рисунках. Используя такие аргументы, передаваемые на вход пиксельного шейдера, и было вычислено значение блика на последнем рисунке.

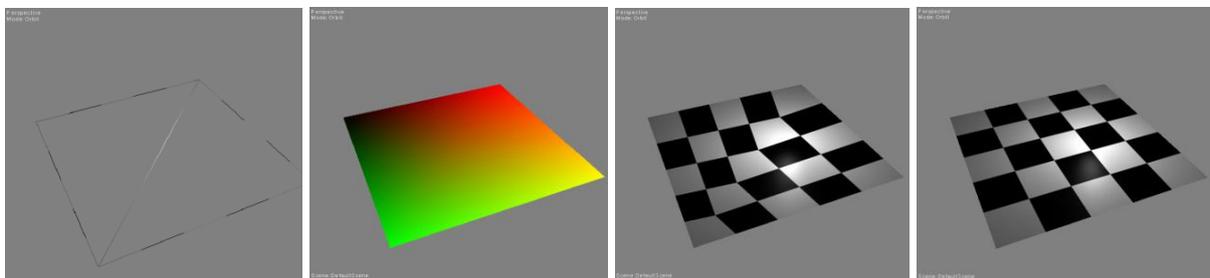
Для реализации шейдеров, использующих карту нормалей, на вход шейдера подается еще два вектора – T и B, то есть тангент (от tangent – касательная) и бинормаль (вектор, ортогональный N и T).

Эти три вектора – N, T и B – определяются в режиме “offline” для каждой вершины, используемой в трехмерной модели. Эти векторы в вершинном шейдере претерпевают вот такое преобразование:

```
OUT.WorldNormal = mul(IN.Normal,WorldITXf).xyz;  
OUT.WorldTangent = mul(IN.Tangent,WorldITXf).xyz;  
OUT.WorldBinormal = mul(IN.Binormal,WorldITXf).xyz;
```

Это три матричных умножения векторов нормалей, тангента и бинормали на матрицы 3x3 WorldITXf, всего 27 операций умножения, необходимых для учета влияния одного источника света. Логично выполнить эти умножения три раза для каждой вершины треугольника и выполнить assembly stage – зная 9 чисел, подготовить некий набор данных, который используется для интерполяции значений.

Так что же такое интерполяция в контексте взаимодействия вершинного шейдера и фрагментного? Зная значение одного числа (всего их девять в данном примере, на практике – гораздо больше) для трех вершин треугольника на экране, можно вычислить значение для каждого пикселя, попавшего в треугольник.



*Рис. 55 Демонстрация работы шейдеров, использующих карту нормалей*

Так, мы можем представить квадрат с помощью двух треугольников. В вершинном шейдере атрибуты вычисляются для четырех вершин, и, если выбран режим fillmode = wireframe, будут показаны эти треугольники, это «каркасный» режим работы шейдера.

Результат интерполяции (Рис. 55) координат UV непосредственно передается на выход шейдера и заносится в кадровый буфер (показанный на втором рисунке). Вычисленное значение координат UV визуализируется с помощью красного и зеленого каналов соответственно. Если эта интерполяция линейная, то результат чтения текстуры из текстурного буфера аналогичен тому, что представлен на рисунке 3, когда наблюдается неровность. И, наконец, если используется интерполяция координат UV,

учитывающая перспективу, то результат чтения текстур будет аналогичным представленному на Рис. 4.

В игровых приложениях применяются шейдеры, учитывающие диффузную, рассеянную и зеркальную составляющие, а также значение текстуры. В современных проектах они могут содержать тысячу строк исходного кода и компилироваться в несколько тысяч строк ассемблерного кода для каждой специфической микроархитектуры разных вендоров, поэтому изложенный материал может служить лишь для начального ознакомления с предметом.

### 4.3 Трассировка лучей и технология Nvidia RTX

Трассировка лучей востребована там, где материалы обладают заметной зеркальной составляющей, или это прозрачные материалы, для которых важен эффект преломления. Если вы занимаетесь трехмерным моделированием и запускаете визуализацию, использующую эту технику, то редко задумываетесь о настройках, полагаясь на то, что заданные по дефолту параметры обеспечат хороший результат.

Но если речь идет о достижении интерактивного темпа работы или столь ценного реального времени, важно ограничить число отражений света, вычисляемого для каждого пикселя. Например, если в сцене встречаются несколько блестящих криволинейных поверхностей, свет может претерпевать несколько отражений.

Когда вычисления кадра выполняются на ЦП, а скорость не является существенной, эти многократные отражения так или иначе будут найдены. Но, добиваясь скорости, приходится жертвовать корректностью.

Вычисление отражений, используя технологию RTX, предполагает, что все объекты сцены, а не только те, что попали в пирамиду видимости, должны быть обработаны на стороне ЦП и представлены в BVH структуре (Bounding Volume Hierarchy, иерархия ограничивающих объемов), передаваемой GPU. Если предметы движутся, то часть этой структуры приходится пересчитывать и передавать для каждого кадра, и это узкое место заметно влияет на скорость.

Использование RTX основывается на расчетах сцены, построенной с помощью уже знакомой нам растеризации: координату точки не составит труда восстановить, зная направление луча, проходящего через нулевую точку камеры и глубину в направлении на объект. Обратная трассировка лучей начинается в точках сцены, соответствующих каждому пикселю (дающему отражение или преломление), и требует расчета отраженного луча, подобно уже изученной функции  $\text{reflect}(\text{vec3 } I, \text{vec3 } N)$ . Здесь  $I$  – первичный луч, а вычисленное с ее помощью значение – это направление вторичного (отраженного) луча. Вот почему для объяснения нами был

выбран классический шейдер Фонга, использующий эту функцию, а не модель Блинна – Фонга. В этой, более распространенной модели, вычисления оптимизированы таким образом, что отраженный от поверхности луч не вычисляется. Отраженный луч, найденный в шейдере, применяется для нахождения индекса треугольника и барицентрической координаты внутри этого треугольника. Эту задачу выполняют специализированные устройства, входящие в состав GPU архитектуры Turing и получившие название RT Cores. Ядра трассировки лучей (RT Cores) содержат два специализированных устройства: первое, проверяющее пересечение луча с ограничивающими объемами (параллелепипедами), второе, находящее пересечение луча с отдельными треугольниками, связанными с нижним уровнем такой иерархии.

Зная барицентрическую координату и три набора атрибутов вершин треугольника, вычисляются конкретные значения, нужные для визуализации отражений в текущем пикселе. Вместо перспективной интерполяции применяется взвешенное суммирование с помощью барицентрических координат. Вот так мы можем найти для конкретного пикселя, что же именно он отражает. Разумеется, в случае преломления вместо отраженного луча потребуется преломленный луч. Эта технология сама по себе не может дать аккуратного изображения, ожидаемого от реализаций трассировки лучей на ЦП, так как без пост-обработки изображение получается очень шумным. А с использованием такой пост-обработки отражения получаются нерезкими, однако этот недостаток на изображениях с высоким разрешением, в случае игровых приложений, вполне терпим. Полностью избавляться от шумов в приложениях RTX пока не удастся, более того, многие пользователи предпочитают не использовать данную технологию, выбирая высокую скорость смены кадров и разрешение, которые обеспечиваются ускорителями с архитектурой Тьюринг.

Технология RTX, тем не менее, находит все больше применений для построения аккуратных теней, расчетов глобального освещения, ambient occlusion и так далее.

## Задания для самопроверки

Проанализировать и воссоздать световую композицию известного произведения искусства средствами фотографии или 3D-графики:

1. Джотто «Утверждение устава францисканского ордена», 1297-1299 гг.
2. Ян Ван Эйк «Мадонна с младенцем за чтением», 1433 г.
3. Мантенья «Святой Иероним», 1450 г.
4. Леонардо да Винчи «Дама с горностаем», 1489-1490 гг.
5. Босх «Сад земных наслаждений», 1500-1510 гг. (левая створка).
6. Дюрер «Портрет Иакова Фуггера», 1519 г.
7. Тициан «Портрет венецианского вельможи», 1510-1515 гг.
8. Пармиджанино «Портрет графа Джан Галеаццо Сан-Витале», 1524 г.
9. Бронзино «Девушка с книгой», 1545 г.
10. Эль Греко «Вид Толедо», 1599 г.
11. Караваджо «Иоанн Креститель», 1610 г.
12. Рембрандт «Философ в раздумье», 1632 г.
13. Веласкес «Менины», 1656 г.
14. Вермеер «Женщина, держащая весы», 1663 г.
15. Питер де Хох «Приятная компания», 1663 г.
16. Клод Лоррен «Морской порт на рассвете», 1637 г.
17. Клод Лоррен «Аполлон, пасущий стада Адмета», 1654 г.

## Вопросы для самопроверки

1. Как трансформировались схемы освещения в произведениях эпохи Возрождения?
2. Как изменилось изображение глубины пространства в произведениях эпохи Возрождения?
3. Как изменилась работа с цветом в произведениях XIII–XVII вв.?
4. Можно ли выделить общие подходы в работе с цветом и светом у художников одного региона?
5. Насколько актуальны схемы освещения в картинах XIII–XVII вв. для реализации графических работ в XXI в.?

### Методические указания по выполнению заданий

Главной целью заданий для самопроверки является развитие умения «читать» и «воссоздавать» световые схемы по референсам. Для выполнения задания можно использовать фотографические технологии или 3D-редакторы. Сложные объекты можно заменить на простые геометрические формы с сохранением композиции и светового рисунка.

Во время анализа схемы света в произведении искусства студенту рекомендуется ответить на вопросы:

1. Сколько источников света формирует световую композицию картины?
  - 1.1. Сколько «явных» источников света можно увидеть в произведении?
  - 1.2. Достаточно ли «явных» источников света для создания светового рисунка на объектах картины?
  - 1.3. Сколько «неявных» источников света формируют объем?
  - 1.4. Какие световые области картины можно отнести к «отраженному» свету?
2. Как источники света влияют на восприятие живописной сцены?
  - 2.1. Какая область картины освещена больше всего?
  - 2.2. Насколько самая освещенная область контрастирует с остальным пространством полотна?
  - 2.3. Насколько интенсивны источники света в периферической зоне картины и почему?
3. Как источники света влияют на настроение произведения?
  - 3.1. Почему художник решил осветить объекты картины именно таким образом?
  - 3.2. Какое настроение формируется у зрителя в процессе восприятия произведения и почему?

В заданиях для самопроверки представлены лишь некоторые картины, попробуйте самостоятельно проанализировать и воссоздать картины XVIII–XIX веков. Кроме того, рекомендуем сравнить, как наследуются схемы освещения, что нового изобретают художники и фотографы XX–XXI веков.

## Список использованной литературы

1. Базен Ж. Барокко и рококо. – М.: СЛОВО/SLOVO, 2001. – 288 с.
2. Леонардо Да Винчи. О зрении, свете, тепле и Солнце. Электронный ресурс <http://www.vinci.ru/doc13.html>. Дата обращения: 15.03.2019
3. Даниэль С. Искусство видеть: О творческих способностях восприятия, о языке линий и красок и о воспитании зрителя / Сергей Даниэль – СПб.: Амфора. ТИД Амфора, 2006. – 206 с.
4. Дмитриева Н. А. Краткая история искусств. – М.: АСТ-ПРЕСС; Галарт. – 624 с.
5. История искусств стран западной Европы от возрождения до начала XX в. Искусство XVII в. Голландия, Франция, Англия, Германия. Под ред. И. А. Шкирич – М.: Изд-во «Искусство», 1992. – 548 с.
6. Свет и цвет в живописи. Особенности изображения.– М.: Мир книги, 2010.С. 14.
7. Martin Scorsese interview 2005. Электронный ресурс. [https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=54&v=VziogMxnq1A](https://www.youtube.com/watch?time_continue=54&v=VziogMxnq1A) Дата обращения: 13.01.2019
8. Цойгнер Г. Учение о цвете / Зеликина Э.Н. – М : Издательство литературы по строительству, 1971. – 160 с: ил.
9. Кодряну К. Электрическое освещение - Chisinau: Tehnica-Info. - 2013. — 400 с. — ISBN 978-9975-63-345-1.
10. Бутырская И.Г., Орлова Л.Н. Эволюция развития искусственного освещения архитектурных пространств // Приволжский научный журнал. – 2016. - №1(37) - С. 155-157 [Сборник статей]. – Режим доступа: <http://pnj.nngasu.ru/about/vacancies.php>
11. Приходько А.Г. Цветной свет на цветной поверхности. Эксперимент: глаз человека VS объектив фотоаппарата // Architecture and Modern Information Technologies. – 2018. – №3(44). – С. 308-322 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://marhi.ru/AMIT/2018/3kvart18/18\\_prihodko/index.php](http://marhi.ru/AMIT/2018/3kvart18/18_prihodko/index.php)
12. Цвет и свет [Текст]: пособие по рисованию / Джеймс Гарни – М: Эксмо, 2013. – 224 с.: ил. - 978-5-699-64270-0
13. Визер В.В. - Система цвета в живописи: учеб. пособие - СПб.: Питер, 2003. - 190 с.: ил. - ISBN 5-94723-814-4
14. Фриман М. – Дао цифровой фотографии; пер. с англ – М.: Издательство «Добрая книга», 2008 – 192 с. – ISBN 978-5-98124-351-6
15. Владимир Анцев. Зонная система при экспонировании // «Советское фото» : журнал. — 1980. — № 1. — С. 39,40. — ISSN 0371-4284.
16. Иллюстрации под номерами: 3, 7, 8(а,б), 9(а,б), 16, 19(а,б), 22(а,б), 27, 31, 32, 33, 34, 35(а,б), 36, 37, 38, 39, 40, 41(а,б), 42 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://commons.wikimedia.org/wiki/Main\\_Page](https://commons.wikimedia.org/wiki/Main_Page). Дата обращения: 15.03.2019

Андреев Артем Станиславович  
Васильев Анатолий Николаевич  
Балканский Андрей Александрович  
Безбах Юлия Игоревна  
Махлай Дмитрий Олегович  
Спиридонова Анна Михайловна  
Чернева Вероника Ивановна

## **Освещение в искусстве, фотографии и 3D-графике**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж экз.

Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49