

Инструментальная верификация алгоритмов реалистического рендеринга*

Виктор Дебелов

debelov@oapmg.sssc.ru

Новосибирск, Россия, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН;
Новосибирский государственный университет

В работе рассматривается задача верификации алгоритмов реалистического (не фотореалистического) рендеринга. Внимание уделяется алгоритмам, которые позиционируются авторами как физически обоснованные. Во вводной части рассматривается несколько экспериментов. Далее предлагается объективно обоснованный способ верификации и определения степени реалистичности алгоритма, который, к сожалению, часто почти недоступен на практике в связи с его исключительной трудоемкостью. Опираясь на высказывание: «If a scientific basis for the generation of images is to be established, it is necessary to conduct experimental verification on both the component steps and the final simulation.» автор предлагает рассматривать процесс как рендеринга, так и верификации, в виде последовательных шагов или этапов. Этап верификации физической корректности локальной модели взаимодействия света с объектом сцены, например, двунаправленной функции распределения отражения, т.е. материала объекта в смысле фотореалистической графики, здесь не рассматривается. Основной текст посвящен верификации алгоритмов рендеринга в смысле глобальной освещенности. В рамках данного доклада мы остановились только на задаче реалистической верификации алгоритмов, постарались показать ее трудоемкость сравнимую с невозможностью выполнения. Это приводит к повальному предпочтению в пользу фотореалистической верификации, т.е. на основе фотографий, рассчитанных изображений и экспертной оценки. Кажущийся естественным такой подход на самом деле также содержит много подводных камней, но их разбор – это дело другой работы. Основная идея подхода заключается в сравнении характеристик света в выбранных точках реальной сцены с характеристиками, полученными через тестируемый алгоритм в аналогичных точках модельной сцены.

Ключевые слова: реалистический рендеринг, физическая корректность, верификация.

Instrumental verification of algorithms of realistic rendering*

Victor A. Debelov

Novosibirsk, Russia, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS;
Novosibirsk State University

This paper is devoted to a problem of verification of realistic (not photorealistic) rendering algorithms. An attention is paid to algorithms that are determined by their developers as physically-based. In the beginning several experiments are considered. Farther, the paper suggests a method to verify realistic rendering algorithms and to determine its rate of realism. Unfortunately, such a method often is almost unavailable in practice because of its exceptional complexity. This paper suggests to consider processes of rendering itself and its verification as consequent steps or phases. The main idea is to compare light characteristics at selected points of a real scene with ones obtained via tested algorithm in the corresponding points of a model scene.

Keywords: realistic rendering, physically based rendering, verification.

1. Введение

Достаточно часто высказывается мнение, что уровень реализма является в общем-то зависящим от приложения. В некоторых ситуациях высокий уровень реализма не требуется, например, игры, обучающие программы и т.д. С нашей точки зрения наиболее объективным был бы независимый от области применения критерий реализма, основанный на сравнении объективных величин. Cornell Box (КБ), пожалуй, первый и самый известный эксперимент по верификации физической корректности алгоритма рендеринга и

алгоритма фотореалистического рендеринга, эволюционирующий в течение длительного периода, см. (<http://www.graphics.cornell.edu/online/box/>). Цель эксперимента – показать, что алгоритм излучательности физически корректно отражает распространение света в сцене, состоящей из диффузных поверхностей. Суть экспериментов – показать, что фотография реальной сцены и рассчитанное изображение очень визуально близки. На рис. 1 приведены результаты первого эксперимента

При сравнении на основе рис. 1 даже «добрый» эксперт доброго заключения о методе расчета не даст. Исследователи сошлись на мнении, что реальный источник предполагаемого белого цвета имеет довольно большую составляющую красного цвета.

Работа опубликована при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант 16-07-00762

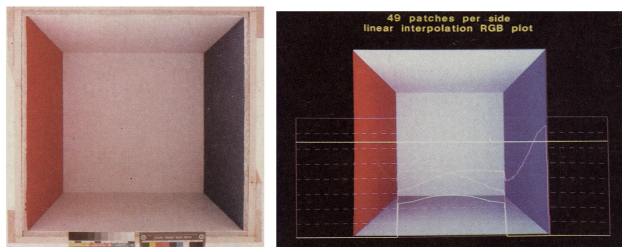


Рис. 1: Фотография реальной сцены (слева) и рассчитанное изображение (справа) первой версии КБ.

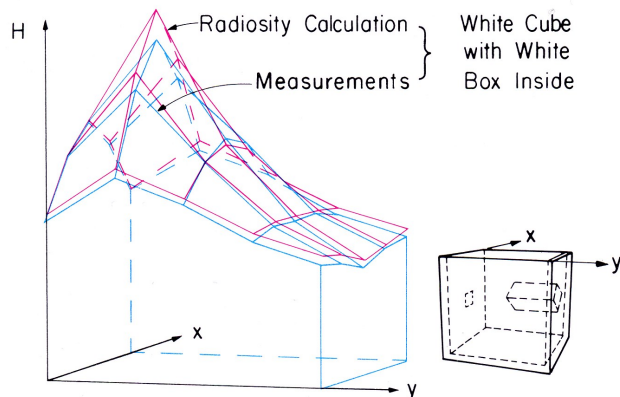


Рис. 2: Сцена (справа) и график сравнения измеренных и рассчитанных величин (слева).

Тем не менее, из данного эксперимента было получено и положительное суждение о том, что метод ухватывает замывание цвета (color bleeding) с одной диффузной поверхности на другую. Данный эксперимент можно квалифицировать как пример фотореализма алгоритма – доказательство через сравнение с фотографией.

В рамках этого многолетнего проекта делались неоднократные модификации как сцены, так методик и инструментария для измерений необходимых величин. Эта эволюция кратко описывается в [1].

На рис. 2 показана сцена и графики измеренных и рассчитанных величин освещенности на плоскости в сцене [4]. Теперь проект уже можно отнести к доказательству реализма алгоритма, т.к. проводится сравнение объективных величин без посредства фотографии и экспертного восприятия.

Еще один внушительный эксперимент, который относится к области верификации алгоритма рендеринга – <http://resources.mpi-inf.mpg.de/atrium/> ("Атриум университета Айзу"), см. рис. 3. А на рис. 4 даются графики освещенности для некоторых точек сцены как для измеренных величин, так и для различных алгоритмов рендеринга.

В приведенных примерах сцены состояли из непрозрачных оптически изотропных объектов. В работе [2] рассматриваются алгоритм рендеринга и его ве-

рификация для прозрачных оптически *анизотропных объектов*, рис. 5.

На сайтах трех упомянутых проектов дается достаточно много детальной информации о сцене, чтобы другие разработчики могли сравнить степень реалистичности своих (возможно новых) алгоритмов. Тем не менее, часто оказывается, что для конкретного алгоритма нужна более детальная информация. Например, в последнем проекте куда полезней была бы спектральная информация об источнике, а не привлечение операций перевода из RGB в спектр, поскольку авторы фактически добавили этап, который необходимо дополнительно верифицировать. Написано, что текстура освещена источником D65 и ее надо перевести в спектр.



Рис. 3: Рассчитанное изображение атриума.

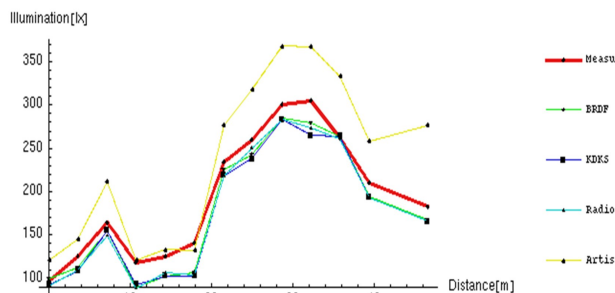


Рис. 4: Illumination data for $z = 6$.

В целом можно охарактеризовать приведенные примеры верификации как смешивание верификаций реалистичности и фотореалистичности.

Наконец, пара заметок об измерительных устройствах:

Люксметр (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Люксметр>) – оптический прибор для измерения освещенности, один из видов фотометров. Кривые относительной спектральной чувствительности селенового фотоэлемента и среднего человеческого глаза неодинаковы, поэтому показания люксметра зависят от спектрального состава излучения. Обыч-

но приборы градуируются с лампой накаливания, и при измерении простыми люксметрами освещённости, создаваемой излучением иного спектрального состава (дневной свет, люминесцентное освещение), применяют полученные расчётом поправочные коэффициенты. *Погрешность измерений такими люксметрами составляет не менее 10% от измеряемой величины.*

Спектрометр (<https://ru.wikipedia.org/wiki/Спектрометр>) – оптический прибор, используемый в спектроскопических исследованиях для накопления спектра, его количественной обработки и последующего анализа с помощью различных аналитических методов. Обычно измеряемыми величинами являются интенсивность и энергия (от длины волны, частоты) излучения, но могут регистрироваться и другие характеристики, например, *поляризационное состояние.*

По этой информации мы отдаем предпочтение в пользу спектрометров.

2. Алгоритмы рендеринга

Все алгоритмы, учитывающие глобальную освещенность в сцене, как правило, являются производными от основных трех: MCRT – трассировка лучей по Монте-Карло, RT – Whitted-like алгоритм [5], radiosity – алгоритм излучательности [7].

Под локальной моделью освещенности понимается модель взаимодействия света ЛМВС, как правило, луча света с поверхностью объекта, применяемая или подразумеваемая в алгоритме рендеринга. Для ЛМВС имеются устоявшиеся термины: BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function – двунаправленная функция распределения отражения ДФО) для непрозрачных поверхностей; BSDF (двунаправленная функция распределения пропускания и отражения) для (полу)прозрачных поверхностей; BSSRDF (Bidirectional Subsurface Scattering Distribution Function – учет подповерхностного рассеивания света); анизотропное отражение и т.п. Разные подходы к заданию ЛМВС рассматривались, например, в работе [3].

Каждый алгоритм рендеринга опирается не только на определенную ЛМВС, но и на свою глобальную модель освещенности (ГМО), которая учитывает весь путь при трассировке при подсчете результирующего значения в пикселе или в точке пространства сцены, см. рис. 6.

У Whitted-like алгоритмов – RT – наиболее бедная ГМО, тем не менее, алгоритмы, в основе которых лежит обратная рекурсивная трассировка лучей, до сих пор являются самыми популярными. Физическую корректность в случае алгоритмов RT в большинстве случаев доказывать не имеет смысла. В этом случае полагаются в основном на экспертную оценку и на сравнении с результатами базового алгоритма.

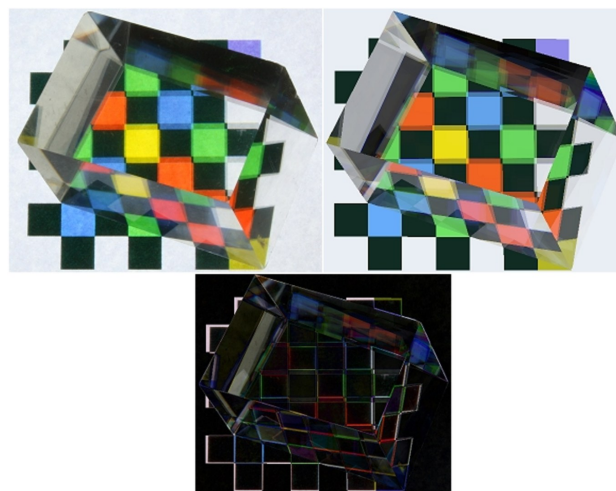


Рис. 5: Пример попиксельного сравнения: из фотографии (верх слева) вычитается рассчитанное изображение кристалла кальцита с учетом анизотропии (верх справа).

Отражение от поверхности



Рис. 6: Типы отражений и классы алгоритмов, учитывающие их.

Алгоритм излучательности применяется только для сцен с диффузными поверхностями. Наконец, MCRT – это самый универсальный класс алгоритмов рендеринга, поскольку учитывает все варианты ЛМВС.

3. Реалистический рендеринг

Рассмотрим реальную сцену RS , включающую реальные объекты, источники освещения и наблюдателя или метод регистрации изображения этой сцены. Пусть сцены включают только непрозрачные объекты.

Реализм можно понимать по-разному. Можно под реалистическим изображением реальной сцены понимать изображение, сформированное в мозгу человека-наблюдателя. Такое определение неодно-

значно, поскольку известно, что разные наблюдатели видят разные картины. Это связано с различием конкретных глаз и, вероятно, мозгов, рассматриваемых в качестве преобразователей поступающего света.

Тем не менее, в этом процессе можно выделить некоторые инварианты, независимые от человека.

С нашей точки зрения уникальным, т.е. однозначным и независимым от наблюдателя, является энергетическое распределение $\Upsilon(x, y, z, \varphi, \theta)$ (в том числе и по углам!) в пространстве перед глазом. Вполне возможно, что достаточно задавать распределение на специально ориентированной плоскости $\Pi(u, v)$, например, расположенной перпендикулярно оси зрения глаза, вид распределения упрощается: $\Upsilon\Pi(u, v, \varphi, \theta)$. Тогда, если распределение ΥA , рассчитанное некоторым алгоритмом A , достаточно близко по некоторому критерию K к точному распределению Υ , можно говорить, что степень реалистичности алгоритма A определяется значением $K(\Upsilon, \Upsilon A)$. В принципе такой подход также, наверное, самый достоверный для сравнения степени реалистичности различных алгоритмов. Более того, поскольку рассматриваются и рассчитываются полноцветные изображения, каждое значение как Υ , так и ΥA , представляет спектр в видимой области от 380 до 780 нм. Более того, каждое значение Υ может содержать данные о поляризации света. Один из частных критериев: можно проводить сравнения не по всему пространству параметров, а только для ряда точек: $(x, y, z, \varphi, \theta)_1, \dots, (x, y, z, \varphi, \theta)_n$, или $(u, v, \varphi, \theta)_1, \dots, (u, v, \varphi, \theta)_n$. Обозначим множество наборов параметров, по которым проводится сравнение, через Σ . Действительно, точнее способа верификации работы алгоритмов рендеринга не может быть. Проблемы в получении: 1) измеренного $\Upsilon(x, y, z, \varphi, \theta)$ в реальной сцене, поскольку это трудоемкая и не всегда реализуемая задача; 2) рассчитанного $\Upsilon A(x, y, z, \varphi, \theta)$, поскольку многие алгоритмы вообще не могут оценивать требуемые спектры в произвольных точках пространства; и др.

Под эгидой комиссии CIE (<http://www.cie.co.at/>) предложен стандартный обозреватель, т.е. специфицировано преобразование спектра в цвет и обратно, которое справедливо для большинства людей. Таким образом, если считать, что в мозгу обозревателя формируется картина, это поможет по известному энергетическому распределению $\Upsilon(x, y, z, \varphi, \theta)$ получить цвета воспринимаемые обозревателем. Понятие и определения нескольких систем представления цвета в цифровом виде также специфицированы данной комиссией.

Считая, что один глаз воспринимает двумерную картину, можно перейти к привычному понятию изображения как двумерного массива пикселей.

В качестве модели глаза обычно берется камера-обскура.



Рис. 7: Попиксельное сравнение в проекте Cornell Box.

В задаче верификации алгоритма *реалистического* рендеринга мы предлагаем выделить следующие этапы.

ЭтапА. Определение класса алгоритма: только неполяризованный свет; учет поляризации света; учет когерентности света. В зависимости от класса здесь же подбираются *регистрирующие устройства* для определения нужных энергетических и спектральных величин.

ЭтапВ. Создание реальной сцены RS . Для верификации достаточно взять простую с геометрической точки зрения сцену, например, несколько кубов или сфер в кубической комнате. Упомянутый эксперимент с атриумом довольно трудно провести оперативно силами небольшого авторского коллектива. Главное, чтобы в сцене свет испытывал необходимое количество отражений и преломлений, исходя из спецификаций и класса проверяемого алгоритма. При изготовлении объектов надо учитывать наличие возможности определить их ЛМВС.

ЭтапМ. Создание виртуальной модели сцены: $VS = GOM(RS)$, где GOM – операция геометрического и оптического моделирования. Этот этап можно разбить на следующие под-этапы:

1. *Аппроксимация геометрии сцены.* Здесь может применяться множество подходов к представлению геометрии реальных объектов: треугольники, NURBS и т.д. Оставляем за рамками данной работы текстуры как средство уменьшить сложность геометрического описания объектов и повысить реализм и производительность рендеринга.

Источники возможных ошибок. Будем считать, что с геометрической точки зрения выбрана “очень

хорошая” аппроксимации поверхности. Тогда в связи с непрерывностью ЛМВС (материала поверхности) предполагается, что расхождения реальной и рассчитанной энергетической характеристик являются допустимыми. Оказывается, что особое внимание необходимо уделять кривым сшивки гладких кусков (например, ребрам треугольников). Рекомендация: точки, входящие в проверочное множество Σ необходимо брать подалеже от этих кривых, поскольку в реальной сцене эти места сшивки отличаются от аналогов виртуальной сцены, а энергетическая характеристика претерпевает сильное изменение. Невозможно выпилить кубик, математически точно совпадающий с виртуальным, см. примеры на рис. 5 (низ) и рис. 7. И, наоборот, описать математически точно реальный кубик.

2. *Задание оптических характеристик или материалов*, определяющих то, как свет взаимодействует с объектом и/или его поверхностью, а также как он ведет себя в точках пространства сцены. Как правило, насколько точно материал аппроксимирует поведение света и реальные оптические характеристики объектов, принято считать степенью физической обоснованности (physically-based) алгоритмов рендеринга, точнее ЛМВС. Простейшие примеры – это представление света и цвета в модели RGB или в более физически корректной спектральной модели.

Источники возможных ошибок. С помощью спектрометра определяется спектр коэффициентов отражения для ряда длин волн света из требуемого диапазона волн. Для остальных длин волн применить интерполяцию. Для прозрачных материалов определить спектры преломления и поглощения. В случае оптически анизотропных материалов определить два спектра преломления. Отметим, что для многих известных прозрачных материалов имеются аналитические формулы для получения спектров преломления. Также для полностью прозрачных объектов не надо определять спектр отражения. Инструментальное определение материала, пожалуй, самое сложное в модели из-за недостатков (неточностей) реальных приборов. Поэтому, если мы хотим, чтобы наша реальная сцена и модель рендеринга были согласованы, надо избегать освещения и наблюдения за пределами точности измерений ЛМВС, используемых в сцене. Задание при помощи модели RGB удобно при использовании алгоритма, но не при верификации, поскольку один и тот же цвет может получаться при различных спектрах – **метамеры**. А за счет оптической дисперсии прозрачных материалов картины могут сильно отличаться.

Когда в спектре отсутствует сампл со значением сильно отличающимся от соседей – это также источник ошибки.

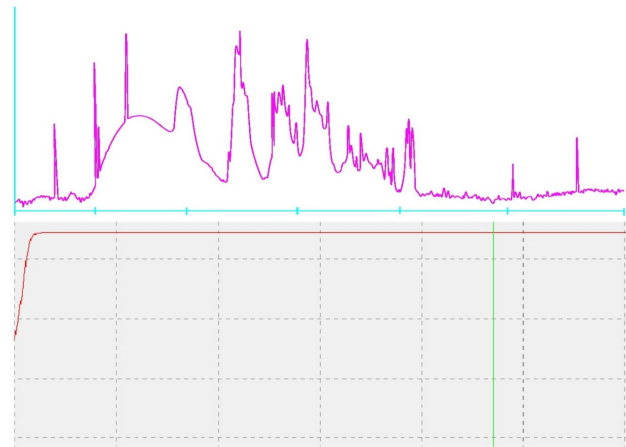


Рис. 8: Спектры: люминесцентной лампы (верх) и лампы поляризационного микроскопа Цейс (низ).

3. *Задание источников.* Хотя источники также объекты сцены, тем не менее их конфигурации, положению, оптическим и энергетическим характеристикам уделяется особое внимание.

Здесь определение параметров света делается аналогично заданию материалов. Но следует учитывать, что современные источники (люминесцентные лампы, светодиоды) дают спектр не такой гладкий как традиционные источники. Например, см. спектры двух источников на рис. 8.

А значит придется все спектры в задаче пересчитывать на более мелкую сетку, что приводит к увеличению времени счета.

4. *Заполнитель пространства сцены.* Во многих случаях заполнитель (например, вода) даже не упоминается, тогда считается что это вакуум. Рекомендуется задание оптических характеристик заполнителя, иначе умолчание может и быть основной ошибкой.

ЭтапГ. Определение реального распределения. Здесь необходимо с помощью регистрирующих приборов определить $\Upsilon(x, y, z, \varphi, \theta)$ в реальной сцене RS для тех наборов параметров Σ , которые необходимы для применения выбранного критерия K : область пространства сцены, выбранная плоскость, конечное число наборов параметров.

ЭтапР. Рендеринг, т.е. при помощи некоторого алгоритма A осуществляется расчет $\Upsilon A(x, y, z, \varphi, \theta)$ или $\Upsilon PA(u, v, \varphi, \theta)$ для выбранных на предыдущем этапе ЭтапГ наборов параметров Σ .

ЭтапВ. Верификация или определение степени реализации алгоритма. Применяем критерий K . По значению $K(\Upsilon, \Upsilon A)$ можно сравнивать алгоритмы рендеринга на реалистичность. А значение $K(\Upsilon A_1, \Upsilon A_2)$ помогло бы сравнивать похожесть результатов работы различных алгоритмов. Реализм может быть понижен на любом из приведенных крупных и мелких этапов, проблемы предыдущих этапов нельзя компенсировать на

следующих этапах. Но в узком смысле по степени реализма и физической корректности мы различаем или сравниваем сами алгоритмы рендеринга, которые явно или неявно определяют и метод геометрического моделирования, и степень физической обоснованности обрабатываемого ими материала (оптические характеристики объектов и источников), т.е. ЛМВС.

4. Аналитический подход

При верификации алгоритмов реалистического рендеринга создается виртуальная сцена, как правило, из объектов с несложной геометрией, которым назначаются оптические характеристики (материал). Сначала производится вычисление функций: Υ – аналитически, ΥA – при помощи проверяемого алгоритма рендеринга; затем проверяется критерий $K(\Upsilon, \Upsilon A)$. Но это уже не инструментальная верификация.

5. Заключение

В докладе рассмотрен подход к объективной верификации алгоритмов реалистического рендеринга, т.е. в отсутствии субъекта – наблюдателя. По сути дела, эти алгоритмы могут с успехом применяться не только в рендеринге, но и в задачах вычислительной оптики. Еще раз отметим, что мы предлагаем *определять не реалистичность изображений*, например, как в [6], а *близость реальных (инструментально измеренных) и рассчитанных величин*.

В связи большими, а чаще непреодолимыми трудностями, выполнить верификацию алгоритма описанным выше методом, наиболее востребованным, да и достижимым практически, оказался способ верификации алгоритмов рендеринга на основе сравнения фотографии реальной сцены и рассчитанного изображения. Который, казалось, достаточно прост в реализации, но эта простота оказалась кажущейся. Просто между глазом и распределением Υ ставится камера. Термин “photorealistic = фотореалистический” по отношению к синтезированным изображениям VI виртуальных пространственных сцен VS подразумевает, что изображение VI является приближением или аппроксимацией фотографии F , полученной для аналогичной реальной сцены RS .

Как оказывается, процесс *фотореалистической верификации*, т.е. на основе сравнения с фотографией содержит свои трудности. При моделировании фотографии необходимо учесть особенности линзовой или зеркально линзовой камеры. Здесь появляется необходимость учитывать (промоделировать) дефокусировку, дифракцию, аберрации (включая аберрации на зрачках, т.е. абберационное виньетирование), рассеянный свет и т.п. Также камера регистрирует экспозицию, поэтому надо учитывать

не только освещенность, но и длительность съемки. Не последнюю роль играет и то, что производитель не открывает внутренние алгоритмы преобразования в камерах CCD или сканерах; сравнение ведется в цветовых пространствах RGB или XYZ, а расчет в спектральном представлении цвета и др., см. также [1]. Но это остается за рамками темы данной работы,

Литература

- [1] Ulbricht C. Usability of Digital Cameras for Verifying Physically Based Rendering Systems // <https://www.cg.tuwien.ac.at/research/publications/2007/Ulbricht-2007-thesis/Ulbricht-2007-thesis-pdf.pdf>.
- [2] Debelov V. A., Kozlov D. S. Rendering of translucent objects, verification and validation of algorithms // Proc. of the WSCG'2012, Plzen, 25–28 June 2012. pp. 189–196.
- [3] Debelov V.A., Kozlov D.S. STAR: Rendering of transparent optically anisotropic objects // Proceed. of Graphicon-2013, Vladivostok, Russia, 16-20 Sept. 2013, pp.50–55.
- [4] Meyer G.W., Rushmeier H.E., Cohen M.F., Greenberg D.P., and Torrance K.E.. An Experimental Evaluation of Computer Graphics Imagery // ACM Trans. Graph., 1986, 5(1):30–50.
- [5] Whitted, T. An Improved Illumination Model for Shaded Display // Commun. ACM, Vol. 23, No. 6, 1980. pp. 343-349.
- [6] Rushmeier, H., Ward, G., a.o. Comparing Real and Synthetic Images: Some Ideas About Metrics // Rendering Techniques '95, pp. 82-91.
- [7] Cohen, M.F., Wallace, J.R. Radiosity and Realistic Image Synthesis. Academic Press, 1993.

Об авторе. Виктор Алексеевич Дебелов - доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории численного анализа и машинной графики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, он также профессор на факультете информационных технологий Новосибирского государственного университета.

About the author. Victor A. Debelov holds a position of leading researcher at Computer Graphics Lab of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. Also, he is a part time professor of Novosibirsk State University, Dept. Information Technologies.