

Научная статья

УДК 520.82, 52-17, 004.9

doi: 10.17223/19988621/99/7

К расчету видимого блеска околоземных космических объектов

Антон Геннадьевич Афонин¹, Владимир Григорьевич Бутов²,
Артем Александрович Кулешов³, Виктор Александрович Солоненко⁴,
Алексей Александрович Ящук⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ aag@niipmm.tsu.ru

² bvg@niipmm.tsu.ru

³ artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

⁴ vik@niipmm.tsu.ru

⁵ rainbow@niipmm.tsu.ru

Аннотация. Приводятся алгоритм и описание программы для моделирования видимого блеска (энергетической освещенности наблюдателя отраженным к нему светом) космических объектов (искусственные спутники, космический мусор и др.), основанные на использовании системы физически корректного рендеринга. Тестовые расчеты видимого блеска объектов простой формы (пластина, цилиндр, сфера), характерной для упрощенной формы космических аппаратов, показали хорошее совпадение с аналитическими результатами. Предполагается использование программы для анализа данных наблюдений изменения во времени видимого блеска космических объектов (кривых блеска).

Ключевые слова: космические объекты, космический мусор, видимый блеск, моделирование, физически корректный рендеринг, программа расчета

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWM-2024-0005).

Для цитирования: Афонин А.Г., Бутов В.Г., Кулешов А.А., Солоненко В.А., Ящук А.А. К расчету видимого блеска околоземных космических объектов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2026. № 99. С. 93–108. doi: 10.17223/19988621/99/7

On the calculation of the apparent brightness of near-Earth space objects

Anton G. Afonin¹, Vladimir G. Butov², Artyom A. Kuleshov³,
Viktor A. Solonenko⁴, Aleksey A. Yashchuk⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ aag@niipmm.tsu.ru

² bvg@niipmm.tsu.ru

³ artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

⁴ vik@niipmm.tsu.ru

⁵ rainbow@niipmm.tsu.ru

Abstract. This study focuses on modeling the apparent brightness of orbital objects using physically-based rendering. The authors developed a Python software that employed the Skyfield library to calculate the positions of the Sun, orbital objects, and observer, as well as the physically-based rendering system Mitsuba3 to calculate the reflected radiance. The software components allow accounting for the realistic geometry of the studied orbital object, optical properties of its surfaces, lighting conditions, and relative positions of the Sun, observer, and target.

The simulation procedure involves the calculation of the required direction vectors, construction of a 3D model containing the object under study, virtual camera, light source, and rendering and integration of the resulting radiance to determine the irradiance at the observer and apparent magnitudes.

A series of test calculations was conducted for simple geometric shapes (sphere, cylinder, and plate) with diffuse and specular surfaces. The results showed good agreement with analytical solutions: the relative error was less than 0.002% for diffuse surfaces and less than 1.2% for specular surfaces.

This paper also presents preliminary simulations of the apparent brightness of the geostationary satellite SIRIO-1, demonstrating that representing the satellite by a simple geometric shape, such as a cylinder, is insufficient to capture all features of its brightness variation. In future work, the developed software will be used to analyze the observed light curves of orbital objects.

Keywords: space objects, space debris, apparent brightness, simulation, physically-based rendering, computational software

Acknowledgments: This study was supported by the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. (project No. FSWM-2024-0005).

For citation: Afonin, A.G., Butov, V.G., Kuleshov, A.A., Solonenko, V.A., Yashchuk, A.A. (2026) On the calculation of the apparent brightness of near-Earth space objects. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 99. pp. 93–108. doi: 10.17223/19988621/99/7

Введение

Моделирование видимого блеска космических объектов на околоземных орбитах (орбитальных объектов) представляет важную научную и практическую задачу, имеющую приложения в современной астрономии, космической инженерии

и системах наблюдения. Изменения видимого блеска объектов во времени (кривые блеска) могут дать ценную информацию для анализа их свойств (форма, ориентация, материалы), поведения и предназначения [1–11]. Актуальность задачи обусловлена рядом объективных ограничений и недостатков наблюдений с Земли: свет от объектов искажается атмосферой, изображения наблюдаемых объектов размываются, изменяется их яркость; наблюдения возможны только в относительно короткие интервалы времени; видимый блеск зависит от фазового угла, удаленности объекта от наблюдателя и других динамически меняющихся факторов, что затрудняет интерпретацию данных наблюдений. Моделирование видимого блеска позволяет преодолеть эти ограничения, предоставляя возможность прогнозировать его изменения с учетом формы, ориентации, материалов, условий освещения объекта и выявить влияние каждого из этих факторов [1–11].

Увеличение плотности объектов на околоземных орбитах, включая действующие спутники, нефункционирующие аппараты и фрагменты космического мусора, повышает вероятность столкновений, представляющих угрозу для космических аппаратов [12]. Моделирование кривых блеска может помочь интерпретировать данные наблюдений, классифицировать объекты, определить ориентацию и форму объектов и лучше прогнозировать их траектории, выявлять необычное поведение [2–8]. Это востребовано для обеспечения космической безопасности, планирования мероприятий по активному удалению мусора, контроля выполнения международных соглашений и предотвращения потенциальных угроз [2, 4].

Один из вызовов современной астрономии – появление и рост крупных спутниковых группировок, таких как Starlink, OneWeb и других проектов глобального Интернета. Они состоят из большого количества спутников, которые могут создавать помехи для наземных астрономических наблюдений. Яркие спутники, пересекающие поле зрения телескопов, оставляют следы на изображениях, что снижает качество данных, увеличивает затраты на их сбор, затрудняет изучение слабых астрономических объектов, негативно сказывается на научной продуктивности аппаратуры и затрудняет открытия [13–17]. Моделирование видимого блеска может помочь спрогнозировать влияние спутников и их группировок на наблюдения [1, 18, 19], оценить масштаб проблемы и разработать меры для ее минимизации (более эффективные алгоритмы планирования наблюдений, программное обеспечение для удаления следов спутников на изображениях и др.) [1]. На основе результатов моделирования можно предложить изменения в конструкции спутников, такие как использование менее отражающих материалов [20, 21] или специальных экранов [22], заранее оценить эффективность таких решений и оптимизировать их применение [1]. Кроме того, предварительная оценка видимого блеска спутников с помощью моделирования может помочь более эффективно спланировать наблюдения их самих [1, 24].

Таким образом, задача моделирования видимого блеска космических объектов является актуальной благодаря своей роли в обеспечении безопасности космической деятельности, развитии методов наблюдения и планировании будущих миссий.

Для моделирования видимого блеска применяются различные подходы [1–8, 10, 23, 24], из которых наиболее мощным представляется использование физически корректного рендеринга [2, 5, 7], позволяющего определить облик объекта произвольной формы при различных условиях освещения и наблюдения с учётом оптических свойств его поверхностей, ориентации, самозатенения, самоподсвечивания (отраженным светом) и других факторов.

Целью работы являются разработка и верификация программы для моделирования видимого блеска орбитальных объектов с использованием физически корректного рендеринга.

Постановка задачи физически корректного рендеринга

Физически корректный рендеринг – это процесс преобразования описания трехмерной сцены (геометрии, текстур, материалов поверхностей, источников освещения и т.д.) в двумерное изображение, основанный на физических законах распространения и взаимодействия света с материей. Свет в физически корректном рендеринге моделируется как совокупность прямолинейных лучей, вдоль которых распространяется световая энергия. Целью при этом является максимальная реалистичность визуализации, учитывающая реальные физические свойства света и поверхностей.

Основными операциями при физически корректном рендеринге являются трассировка пути луча в трехмерной сцене от виртуального наблюдателя к источнику света и интегрирование уравнения, описывающего перенос и распределение энергетической яркости в сцене (интегральное уравнение рендеринга [25. Уравнение (1.1)]):

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_{\Omega} f(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) (\mathbf{n}_p \cdot \omega_i) d\omega_i, \quad (1)$$

где $L_o(p, \omega_o)$ – энергетическая яркость, исходящая из точки p поверхности в направлении ω_o ; $L_e(p, \omega_o)$ – энергетическая яркость, излученная из точки p поверхности в направлении ω_o за счет собственной эмиссии; $L_i(p, \omega_i)$ – энергетическая яркость, пришедшая в точку p с направления ω_i ; \mathbf{n}_p – внешняя нормаль к поверхности в точке p ; Ω – единичная сфера вокруг точки p ; ω_i, ω_o – направления падающего и отходящего света соответственно; $d\omega_i$ – элементарный телесный угол вокруг ω_i . Интегрирование в (1) производится по всем направлениям вокруг точки p , с которых может приходиться свет.

Функция $f(p, \omega_i, \omega_o)$ описывает взаимодействие света с поверхностью. В общем случае она определяет как характеристики отражения, так и пропускания и называется двулучевой функцией рассеяния (Bidirectional Scattering Distribution Function; BSDF). На практике явления отражения и пропускания рассматривают как отдельные составляющие рассеяния и описывают отдельно с помощью соответственно двулучевой функции распределения отражательной способности (Bidirectional Reflectance Distribution Function; BRDF) и двулучевой функции пропускания (Bidirectional Transmittance Distribution Function; BTDF). Таким образом, $BSDF = BRDF + BTDF$. Материалы, типичные для большинства космических объектов (спутники, космический мусор), являются непрозрачными или имеют незначительную прозрачность, поэтому для них $BTDF = 0$. Существуют различные модели BSDF, для физической корректности рендеринга BSDF (и ее составляющие) должна обладать рядом свойств, в частности быть неотрицательной, удовлетворять принципам сохранения энергии и гельмгольцевской взаимности:

$$\int_{\Omega} f(p, \omega_i, \omega_o) (\mathbf{n}_p \cdot \omega_i) d\omega_i \leq 1, \quad (2)$$

$$f(p, \omega_i, \omega_o) = f(p, \omega_o, \omega_i). \quad (3)$$

В соответствии с уравнением (1) энергетическая яркость, исходящая из точки p в направлении ω_0 , складывается из энергетической яркости L_e , излученной из точки p в этом направлении, и отраженной в этом направлении части энергетической яркости, пришедшей в точку p со всех возможных направлений на единичной сфере Ω , окружающей p .

Следует отметить, что уравнение (1) применяется и для вычисления энергетической яркости L_i в интеграле этого уравнения, так как она одновременно является исходящей из некоторой другой точки в направлении $-\omega_i$. Таким образом, имеет место рекурсивное вычисление.

Интегрирование уравнения (1) при физически корректном рендеринге проводится методом Монте-Карло. Подробное описание теории, лежащей в основе физически корректного рендеринга, и одну из возможных его практических реализаций можно найти, например, в [25].

Описание программы и алгоритма моделирования видимого блеска

В рамках данной работы создана программа на языке программирования Python для моделирования видимого блеска орбитальных объектов, наблюдаемых с Земли. Программа использует свободную python-библиотеку Skyfield [26] для расчета положений интересующих тел и объектов: Солнца, наблюдателя на Земле, объекта на орбите (спутник, космический мусор и т.п.), – в заданные моменты времени. Для расчета энергетической яркости, отраженной орбитальным объектом к наблюдателю, используется свободно распространяемая современная система физически корректного рендеринга Mitsuba3 [27] с открытым исходным кодом. Mitsuba3 ориентирована на исследования в области компьютерной графики, научные расчеты и машинное обучение. Она предлагает широкие возможности для моделирования световых эффектов (спектральный рендеринг, поляризация), решения задач оптимизации и обратных задач (восстановление параметров сцены, например геометрии, освещения, материалов, по изображениям). В Mitsuba3 заложены различные физически корректные модели BSDF, описывающие взаимодействие света с поверхностями различных материалов: диэлектриков, проводников, диффузных (ламбертовских) и др. Система активно развивается сообществом разработчиков и достаточно хорошо документирована.

Заметим, что Mitsuba3 является не единственной системой физически корректного рендеринга, которую можно использовать в рассматриваемых в данной работе целях. Мы выбрали Mitsuba3 из-за ее открытости, широких возможностей, гибкости, производительности. Создание собственных программ с использованием существующих открытых библиотек и программных решений имеет очевидные преимущества: они предоставляют протестированный, оптимизированный и поддерживаемый функционал, позволяющий существенно экономить время и силы на решение стоящей задачи.

Моделирование видимого блеска орбитального объекта проводится следующим образом. Задаются момент времени для расчета, набор элементов орбиты моделируемого объекта (TLE), координаты наземного наблюдателя (широта, долгота, высота над уровнем моря) в стандартной «геодезической системе», моделирующей форму Земли, например в WGS84. Для данного момента времени с помощью функционала библиотеки Skyfield определяются положения Солнца, объекта

наблюдения, наземного наблюдателя в единой системе координат и проверяется возможность реального наблюдения: объект освещен Солнцем, объект выше горизонта наблюдателя, наблюдатель в условиях темного времени суток. На основе определенных положений рассчитываются векторы направлений объект–Солнце, объект–наблюдатель, также направления можно задать напрямую. Задается ориентация объекта. Формируется описание трехмерной сцены Mitsuba3, содержащей три элемента: источник света (эмиттер) – имитатор Солнца, виртуальную камеру (сенсор) – имитатор наземного наблюдателя, и 3D-модель объекта наблюдения. Вследствие огромной удаленности Солнца и его малого углового размера у Земли солнечные лучи полагаются параллельными, поэтому для моделирования Солнца используется удаленный направленный источник света, излучающий заданную мощность на единицу площади в заданном направлении Солнце–объект. Аналогично ввиду достаточно большой удаленности орбитальных объектов от наземных наблюдателей и их малых угловых размеров отраженные к наблюдателю солнечные лучи также считаются параллельными. Поэтому для моделирования наблюдателя используется сенсор, основанный на ортографической проекции, измеряющий энергетическую яркость вдоль нормали к своей плоскости. Положение и направление взгляда камеры задаются на основе вектора объект–наблюдатель.

3D-модель наблюдаемого объекта может создаваться из встроенных в Mitsuba3 форм (куб, цилиндр, сфера, диск, B-сплайн и др.), загружаться из внешних OBJ или PLY файлов или с помощью комбинации этих способов и, таким образом, достаточно точно передавать реальную его форму. При этом модель разбивается на детали в зависимости от необходимости назначения им тех или иных моделей BSDF, т.е. оптических свойств. Модель ориентируется в соответствии с заданными векторами ориентации.

Сформированное описание трехмерной сцены передается в функцию рендеринга для осуществления трассировки путей лучей и расчета энергетической яркости. В результате рендеринга для каждого пикселя камеры получается значение отраженной в него из сцены (от 3D-модели объекта наблюдения) энергетической яркости. Совокупность значений пикселей формирует картину распределения (изображение) отраженной энергетической яркости. Никакой постобработки результатов рендеринга, вроде коррекции гаммы, тональной компрессии и т.п., не производится. Рендеринг осуществляется в монохромном режиме и соответствует широкополосным наблюдениям в видимом диапазоне.

Полученное распределение энергетической яркости численно интегрируется для получения значения энергетической освещенности (облученности) E наблюдателя на расстоянии r от наблюдаемого объекта:

$$E = \frac{A_{pix}}{r^2} \sum_{k=1}^N L_k, \quad (4)$$

где A_{pix} – площадь пикселя, N – количество пикселей виртуальной камеры, L_k – энергетическая яркость, ассоциированная с k -м пикселем.

По рассчитанной энергетической освещенности рассчитывается соответствующая видимая звездная величина m :

$$m = m_0 - 2.5 \lg \frac{E}{E_0}, \quad (5)$$

где m_0 – «опорная» звездная величина, E_0 – соответствующая «опорная» энергетическая освещенность.

В расчетах мы пока не учитываем вклад земного сияния (засветку объекта отраженным Землей солнечным светом) и влияние земной атмосферы в моделируемый видимый блеск.

Результаты тестовых расчетов

Для проверки процедуры моделирования были проведены тестовые расчеты для диффузных и зеркальных сферы, пластины, цилиндра. Были получены результаты, хорошо согласующиеся с расчетами по аналитическим формулам, приведенным в [28. Таблица 1].

На рис. 1 представлены результаты расчета на основе физически корректного рендеринга энергетической освещенности (облученности) наблюдателя светом, отраженным от диффузной сферы, боковой поверхности диффузного цилиндра и диффузной плоской пластины в зависимости от фазового угла (угол Солнце–объект–наблюдатель) и их сравнение с расчетами по соответствующим аналитическим формулам. Также приведены значения звездной величины, полученные по формуле (5) на основе расчетной облученности (соответствующая ось – справа). В расчетах приняты: альbedo диффузных поверхностей = 1, расстояние объект–наблюдатель = 37 100 км, плотность мощности светового источника = 1 360 Вт/м², радиус сферы = $\pi^{-0.5}$ м, высота и диаметр цилиндра, стороны пластины = 1 м. Разрешение генерируемых изображений 960 × 960 пикселей. Для цилиндра направления на источник света и наблюдателя симметрично расположены относительно нормали к поверхности и лежат в плоскости оси цилиндра. Для пластины направления на источник света и наблюдателя симметрично расположены относительно нормали к поверхности.

При использованных параметрах рендеринга относительная (нормированная на аналитический максимум) ошибка расчетных значений облученности относительно аналитических < 0.002%.

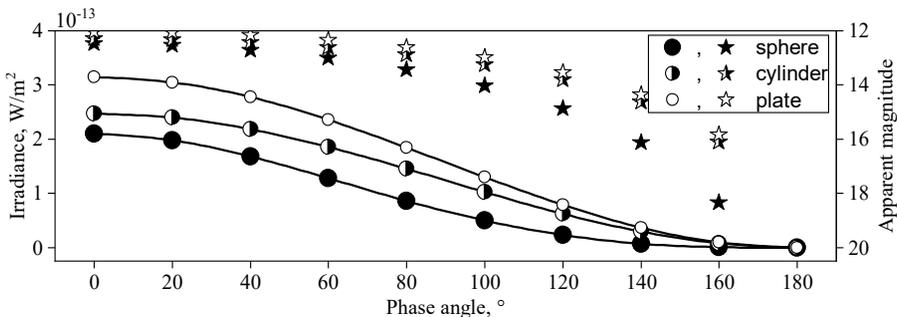


Рис. 1. Облученность (кружки – расчет, линии – аналитические зависимости из [28]) от диффузных сферы, боковой поверхности цилиндра и пластины и соответствующие звездные величины (звездочки) в зависимости от фазового угла

Fig. 1. Irradiance from the diffuse sphere, lateral surface of a cylinder and flat plate with the corresponding apparent magnitudes (stars) as a function of phase angle (circles indicate calculations; lines, analytical dependencies from [28])

На рис. 2–4 показаны соответствующие картины распределения отраженной энергетической яркости, полученные в результате рендеринга, на основе которых рассчитаны значения облученности.

На рис. 5–7 представлены результаты расчета на основе физически корректного рендеринга облученности наблюдателя светом, отраженным от зеркальной сферы, боковой поверхности цилиндра и плоской пластины в зависимости от фазового угла и их сравнение с расчетами по аналитическим формулам.

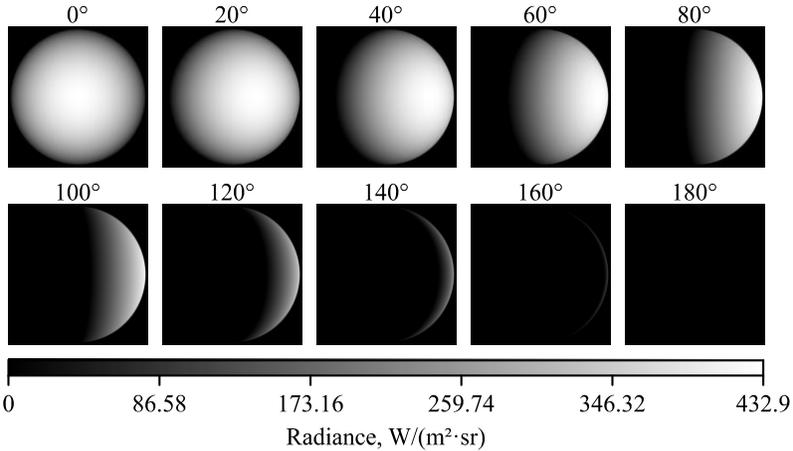


Рис. 2. Визуализированное распределение энергетической яркости, отраженной от диффузной сферы, при разных фазовых углах (фазовые углы приведены числами над соответствующими им изображениями)

Fig. 2. Distribution of the rendered radiance reflected from a diffuse sphere at different phase angles (phase angles in degrees are indicated above the corresponding images)

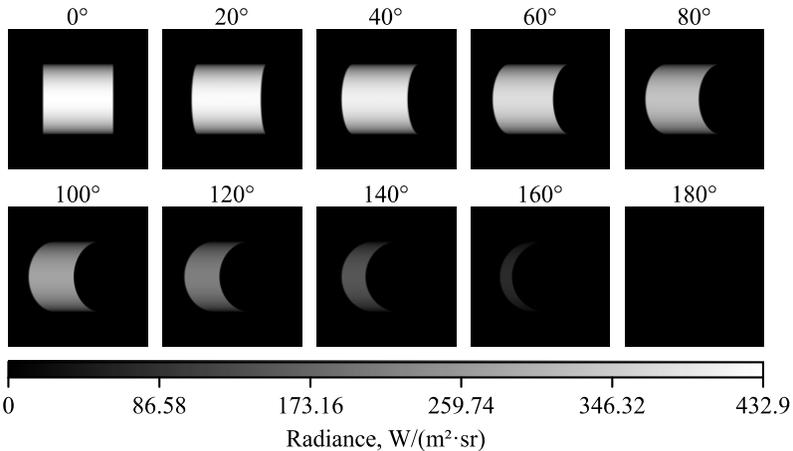


Рис. 3. Визуализированное распределение энергетической яркости, отраженной от диффузного цилиндра, при разных фазовых углах (фазовые углы приведены числами над соответствующими им изображениями)

Fig. 3. Distribution of the rendered radiance reflected from a diffuse cylinder at different phase angles (phase angles in degrees are indicated above the corresponding images)

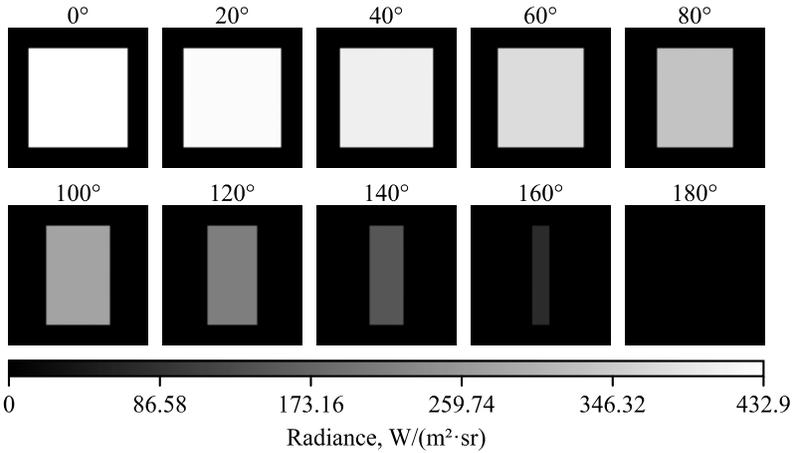


Рис. 4. Визуализированное распределение энергетической яркости, отраженной от диффузной пластины, при разных фазовых углах (фазовые углы приведены числами над соответствующими им изображениями)

Fig. 4. Distribution of the rendered radiance reflected from a diffuse flat plate at different phase angles (phase angles in degrees are indicated above the corresponding images)

В расчетах для цилиндра направления на источник света и наблюдателя лежат в плоскости перпендикулярной оси цилиндра. Все остальное – как в расчетах облученности от диффузных объектов.

При использованных параметрах рендеринга относительная (нормированная на аналитический максимум) ошибка расчетных значений облученности относительно аналитических для зеркальной сферы < 1.2%, для цилиндра < 0.6%, для пластины < 0.003%.

Мы не приводим картины распределения энергетической яркости, поскольку точечные блики от сферы и линейные блики от цилиндра на изображениях не видны без увеличения, а картины распределения для зеркальной пластины визуальнo идентичны картинам для диффузной пластины, хотя отличаются значениями энергетической яркости.

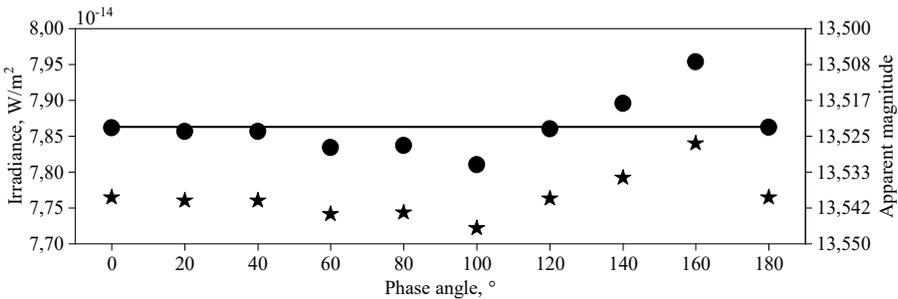


Рис. 5. Облученность (кружки – расчет, линия – аналитическая зависимость из [28]) от зеркальной сферы и соответствующие звездные величины (звездочки) в зависимости от фазового угла

Fig. 5. Irradiance from a specular sphere with the corresponding apparent magnitude (stars) as a function of phase angle (circles indicate calculation; lines, analytical dependency from [28])

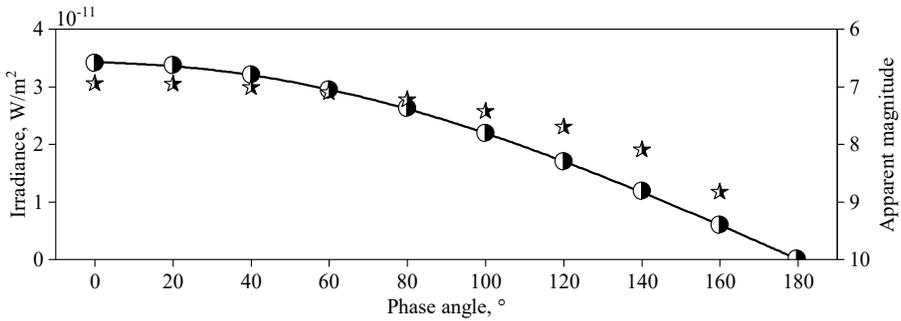


Рис. 6. Облученность (кружки – расчет, линия – аналитическая зависимость из [28]) от зеркального цилиндра и соответствующие звездные величины (звездочки) в зависимости от фазового угла

Fig. 6. Irradiance from a specular cylinder with the corresponding apparent magnitude (stars) as a function of phase angle (circles indicate calculation; lines, analytical dependency from [28])

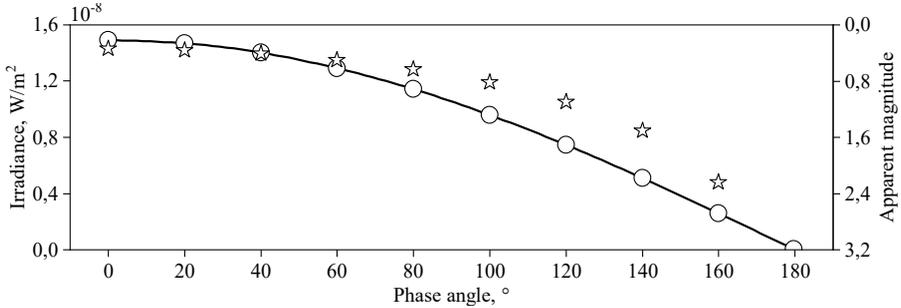


Рис. 7. Облученность (кружки – расчет, линия – аналитическая зависимость из [28]) от зеркальной пластины и соответствующие звездные величины (звездочки) в зависимости от фазового угла

Fig. 7. Irradiance from a specular flat plate with the corresponding apparent magnitude (stars) as a function of phase angle (circles indicate calculation; lines, analytical dependency from [28])

На рис. 8, 9 представлены результаты тестового расчета видимого блеска для упрощенной 3D-модели недействующего итальянского экспериментального коммуникационного геостационарного спутника SIRIO-1 (номер NORAD 10294) [29, 30]. Модель спутника включает три основных элемента: цилиндрическую часть, апогейный двигатель (сопло), параболическую антенну. Диаметр спутника = 1,43 м, общая высота (длина) = 2 м. Поверхность антенны принята идеально диффузной (diffuse BRDF [31]) с альбедо 0.8, остальные поверхности описываются моделью шероховатого проводящего материала (roughconductor BRDF [32]): арсенида галлия для боковой поверхности цилиндра и алюминия для остальных поверхностей. Спутник предполагался ориентированным осью цилиндрической части по орбитальной нормали, антенна аппарата «смотрит» на Землю (рабочая ориентация SIRIO-1). Моделирование проведено для земного наблюдателя с координатами 43,2747° северной широты, 42,5008° восточной долготы, высота над уровнем моря 3 127 м (ЦКП «Терскольская обсерватория» Института астрономии РАН). Расчет проведен для интервала времени с 27.10.2025 20:00:00 по 28.10.2025 2:40:00 UTC.

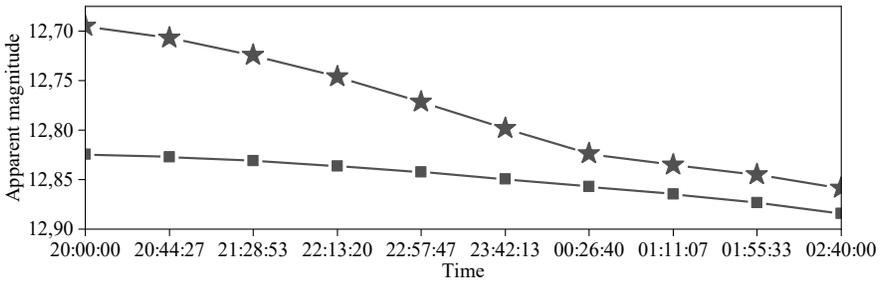


Рис. 8. Расчетная звездная величина (звездочки – полная 3D-модель, квадраты – только цилиндрическая часть) спутника SIRIO-1 в зависимости от времени
Fig. 8. Calculated apparent magnitude of the SIRIO-1 satellite as a function of time (stars indicate the whole 3D model; squares, a cylindrical part only)

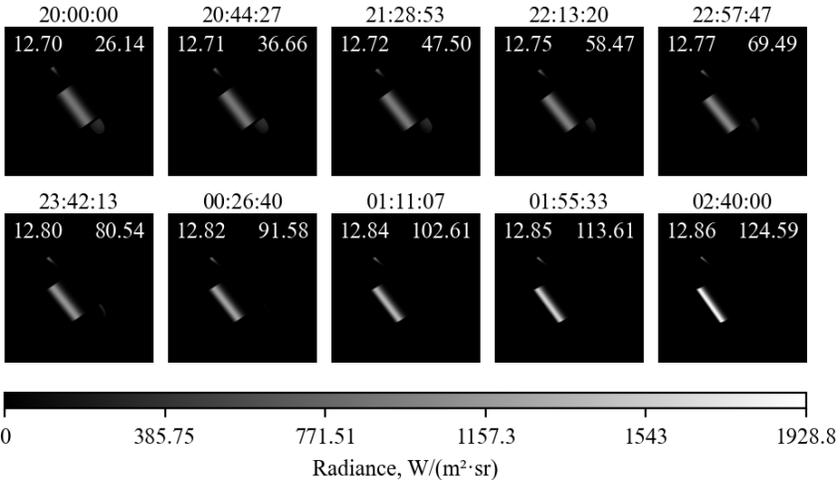


Рис. 9. Визуализированные распределения энергетической яркости, отраженной от спутника SIRIO-1, для разных моментов времени (соответствующие моменты времени указаны над каждым изображением, число в левом верхнем углу каждого изображения – звездная величина, в правом верхнем углу – фазовый угол)

Fig. 9. Distributions of the rendered radiance reflected from the SIRIO-1 satellite at different time instants (the corresponding times are shown above images; apparent magnitude and phase angle are indicated in the upper left and upper right corners, respectively)

На рис. 8 показаны расчетные кривые блеска для полной 3D-модели спутника и его цилиндрической части. Сравнение расчетных кривых показывает, что представление спутника объектом простой геометрической формы (цилиндром) не позволяет учесть все особенности изменения блеска.

На рис. 9 показаны соответствующие картины распределения отраженной энергетической яркости для полной 3D-модели SIRIO-1.

Заключение

Разработана программа для моделирования видимого блеска орбитальных объектов с использованием физически корректного рендеринга. Для расчета положений

небесных тел была применена библиотека Skyfield, а для рендеринга – система Mitsuba3. Проведена серия тестовых расчетов для диффузных и зеркальных объектов простой формы (сфера, цилиндр, пластина), показавшая высокую точность совпадения результатов с аналитическими формулами: относительная ошибка менее 0.002% для диффузных поверхностей и менее 1.2% для зеркальных.

Приведены предварительные результаты моделирования видимого блеска геостационарного спутника SIRIO-1, которые показали, что представление его объектом простой геометрической формы (цилиндром) не позволяет учесть все особенности изменения блеска, т.е. требуется использование полной 3D-модели SIRIO-1.

В следующих исследованиях в данном направлении разработанная программа будет использована для анализа данных наблюдений кривых блеска космических объектов.

Список источников

1. *Fankhauser F., Tyson J.A., Askari J.* Satellite Optical Brightness // The Astronomical Journal. 2023. V. 166 (2). Art. 59 (12 p). doi: 10.3847/1538-3881/ace047
2. *Nussbaum M., Schafer E., Yoon Z., Keil D., Stoll E.* Spectral Light Curve Simulation for Parameter Estimation from Space Debris // Aerospace. 2022. V. 9 (8). Art. 403. doi: 10.3390/aerospace9080403
3. *Burandt D., Hampf D., Rodmann J., Riede W.* Interpretation of light curves based on simulation software // Proc. 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25–29 September 2017. Paper IAC-17-A6.IP.7.x38789. Paris: International Astronautical Federation (IAF).
4. *Kerr E., Hall D., Kueppers M.* Light curves for geo object characterization // Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021. V. 8, is. 1 / ESA Space Debris Office. URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/66/SDC8-paper66.pdf>
5. *Allworth J., Windrim L., Bennet J., Bryson M.* A transfer learning approach to space debris classification using observational light curve data // Acta Astronautica. 2021. V. 181. P. 301–315. doi: 10.1016/j.actaastro.2021.01.048
6. *Cabrera D.V., Utzmann J., Forstner R.* Integration of attitude characterization in a space debris catalogue using light curves // Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021 / ESA Space Debris Office. URL: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/75/SDC8-paper75.pdf>
7. *Meyer T., Keil D., Traub D., Scharring S., Riede W., Dekorsy T., Nussbaum M., Lengowski M., Schweigert R., Klinkner S.* High-fidelity light curve simulation and validation using empirical data // 25th AMOS Conference Technical Paper, 2024. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2024/Poster/Meyer.pdf>
8. *Wang Y., Du X., Zhao J., Yin Z., Song Y.* What causes the abrupt changes in the light curve of a GEO satellite? // Acta Astronautica. 2018. V. 153. P. 130–137. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.10.035
9. *Caddy S.E., Spitler L.R.* A Surprising Boost in Starlink Satellite Brightness at Optical Wavelengths During the Day // 25th AMOS Conference Technical Paper, 2024. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2024/SDA-Systems-and-Instrumentation/Caddy.pdf>
10. *Endo T., Tsuchikawa T., Anada T., Ono H., Tsuji H.* Simulating the Photometric Light Curve of Artificial Satellites in GEO used with a Ray-Tracing // 24th AMOS Conference Technical Paper, 2023. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/Poster/Endo.pdf>
11. *Skuljan J.* A three-dimensional photometric model of a satellite in geostationary orbit // 22nd AMOS Conference Technical Paper, 2021. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/Poster/Skuljan.pdf>

12. ESA Space Environment Report 2025 / The European Space Agency. 2025. URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2025
13. Falchi F., Bara S., Cinzano P., Lima R.C., Pawley M. A call for scientists to halt the spoiling of the night sky with artificial light and satellites // *Nature Astronomy*. 2023. V. 7. P. 237–239. doi: 10.1038/s41550-022-01864-z
14. Barentine J.C., Venkatesan A., Heim J., Lowenthal J., Kocifaj M., Bará S. Aggregate effects of proliferating low-Earth-orbit objects and implications for astronomical data lost in the noise // *Nature Astronomy*. 2023. V. 7. P. 252–258. doi: 10.1038/s41550-023-01904-2
15. Gallozzi S., Scardia M., Maris M. Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites' constellations damages // arXiv:2003.05472v3 [astro-ph.IM], 2020. doi: 10.48550/arXiv.2003.05472
16. McDowell J.C. The Low Earth Orbit Satellite Population and Impacts of the SpaceX Starlink Constellation // *The Astrophysical Journal Letters*. 2020. V. 892 (2). Art. L36 (10 p.). doi: 10.3847/2041-8213/ab8016
17. Lawrence A., Rawls M.L., Jah M., Boley A., Di Vruno F., Garrington S., Kramer M., Lawler S., Lowenthal J., McDowell J., McCaughrean M. The case for space environmentalism // *Nature Astronomy*. 2022. V. 6. P. 428–435. doi: 10.1038/s41550-022-01655-6
18. Hainaut O.R., Williams A.P. Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains // *Astronomy & Astrophysics*. 2020. V. 636. Art. 121. doi: 10.1051/0004-6361/202037501
19. Lawler S.M., Boley A.C., Rein H. Visibility Predictions for Near-Future Satellite Megaconstellations: Latitudes near 50° will Experience the Worst Light Pollution // *The Astronomical Journal*. 2022. V. 163 (1). Art. 21 (14 p.). doi: 10.3847/1538-3881/ac341b
20. Mallama A. A Flat-Panel Brightness Model for the Starlink Satellites and Measurement of their Absolute Visual Magnitude // arXiv:2003.07805v1 [astro-ph.IM], 2020. doi: 10.48550/arXiv.2003.07805
21. Mallama A. Starlink Satellite Brightness Before VisorSat // arXiv:2006.08422v1 [astro-ph.EP], 2020. doi: 10.48550/arXiv.2006.08422
22. Cole R.E. A Sky Brightness Model for the Starlink 'Visorsat' Spacecraft – II // arXiv:2107.06026v1 [astro-ph.IM], 2021. doi: 10.48550/arXiv.2107.06026
23. Cognion R.L. Observations and Modeling of GEO Satellites at Large Phase Angles // 14th AMOS Conference Technical Paper, 2013. URL: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/COGNION.pdf>
24. Захваткин М.В. Моделирование видимого блеска космического аппарата «Спектр-Р» для планирования астрометрических наблюдений // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2013. № 5. С. 303–311.
25. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. Physically based rendering: from theory to implementation. 4th ed. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2023. 1266 p.
26. Rhodes B. Skyfield: High precision research-grade positions for planets and Earth satellites generator // *Astrophysics Source Code Library*. Record ascl:1907.024. July 2019.
27. Jakob W., Speierer S., Roussel N., Nimier-David M., Vicini D., Zeltner T., Nicolet B., Crespo M., Leroy V., Zhang Z. Mitsuba 3 renderer: компьютерная программа. Версия 3.0.1. 2022. URL: <https://mitsuba-renderer.org> (дата обращения: 20.10.2025).
28. McCue G.A., Williams J.G., Morford J.M. Optical characteristics of artificial satellites // *Planet. Space Sci.* 1971. V. 19 (8). P. 851–868.
29. Carassa F., Ciavoli Cortelli L.A., Macchia M., Tirro S. The SIRIO programme // *Acta Astronautica*. 1978. V. 5. P. 385–413.
30. Burden S., Sjoedin P. Sirio in HBF 3 chamber in building 24 at ESTEC // *ESA Space Heritage Image Project*. 2023. URL: <https://ship.esa.int/ISS/view.jsp?cid=ESTEC-PHOTO-1977.03.893>
31. Mitsuba 3 Documentation. Smooth diffuse material (diffuse) // *Mitsuba Renderer Project*. URL: https://mitsuba.readthedocs.io/en/latest/src/generated/plugins_bsdfs.html#smooth-diffuse-material-diffuse

32. Mitsuba 3 Documentation. Rough conductor material (roughconductor) // Mitsuba Renderer Project. URL: https://mitsuba.readthedocs.io/en/latest/src/generated/plugins_bsdfs.html#rough-conductor-material-roughconductor

References

1. Fankhauser F., Tyson J.A., Askari J. (2023) Satellite optical brightness. *The Astronomical Journal*. 166(2). Article 59. pp. 1–12. doi: 10.3847/1538-3881/ace047
2. Nussbaum M., Schafer E., Yoon Z., Keil D., Stoll E. (2022) Spectral light curve simulation for parameter estimation from space debris. *Aerospace*. 9(403). doi: 10.3390/aerospace9080403
3. Burandt D., Hampf D., Rodmann J., Riede W. (2017) Interpretation of light curves based on simulation software. *Proceedings of the 68th International Astronautical Congress, Adelaide, Australia*. Article IAC-17-A6.IP.7.x38789. Paris: International Astronautical Federation (IAF).
4. Kerr E., Hall D., Kueppers M. (2021) Light curves for geo object characterization. *Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany*. 8(1). ESA Space Debris Office. Access mode: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/66/SDC8-paper66.pdf>
5. Allworth J., Windrim L., Bennet J., Bryson M. (2021) A transfer learning approach to space debris classification using observational light curve data. *Acta Astronautica*. 181. pp. 301–315. doi: 10.1016/j.actaastro.2021.01.048
6. Cabrera D.V., Utzmann J., Forstner R. (2021) Integration of attitude characterization in a space debris catalogue using light curves. *Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany*. ESA Space Debris Office. Access mode: <https://conference.sdo.esoc.esa.int/proceedings/sdc8/paper/75/SDC8-paper75.pdf>
7. Meyer T., Keil D., Traub D., Scharring S., Riede W., Dekorsy T., Nussbaum M., Lengowski M., Schweigert R., Klinkner S. (2024) High-fidelity light curve simulation and validation using empirical data. *The 25th AMOS Conference Technical Paper*. Access mode: <https://amos-tech.com/TechnicalPapers/2024/Poster/Meyer.pdf>
8. Wang Y., Du X., Zhao J., Yin Z., Song Y. (2018) What causes the abrupt changes in the light curve of a GEO satellite? *Acta Astronautica*. 153. pp. 130–137. doi: 10.1016/j.actaastro.2018.10.035
9. Caddy S.E., Spittler L.R. (2024) A surprising boost in Starlink satellite brightness at optical wavelengths during the day. *The 25th AMOS Conference Technical Paper*. Access mode: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2024/SDA-Systems-and-Instrumentation/Caddy.pdf>
10. Endo T., Tsuchikawa T., Anada T., Ono H., Tsuji H. (2023) Simulating the photometric light curve of artificial satellites in GEO used with a ray-tracing. *The 24th AMOS Conference Technical Paper*. Access mode: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2023/Poster/Endo.pdf>
11. Skuljan J. (2021) A three-dimensional photometric model of a satellite in geostationary orbit. *The 22nd AMOS Conference Technical Paper*. Access mode: <https://amostech.com/TechnicalPapers/2021/Poster/Skuljan.pdf>
12. ESA Space Environment Report (2025) URL: https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2025
13. Falchi F., Bara S., Cinzano P., Lima R.C., Pawley M. (2023) A call for scientists to halt the spoiling of the night sky with artificial light and satellites. *Nature Astronomy*. 7. pp. 237–239. doi: 10.1038/s41550-022-01864-z
14. Barentine J.C., Venkatesan A., Heim J., Lowenthal J., Kocifaj M., Bará S. (2023) Aggregate effects of proliferating low-Earth-orbit objects and implications for astronomical data lost in the noise. *Nature Astronomy*. 7. pp. 252–258. doi: 10.1038/s41550-023-01904-2
15. Gallozzi S., Scardia M., Maris M. (2020) Concerns about ground-based astronomical observations: quantifying satellites' constellations damages. *ArXiv*. 2003.05472v3 [astro-ph.IM]. doi: 10.48550/arXiv.2003.05472

16. McDowell J.C. (2020) The low Earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation. *The Astrophysical Journal Letters*. 892(2). L36. pp. 1–10. doi: 10.3847/2041-8213/ab8016
17. Lawrence A., Rawls M.L., Jah M., Boley A., Di Vruono F., Garrington S., Kramer M., Lawler S., Lowenthal J., McDowell J., McCaughrean M. (2022) The case for space environmentalism. *Nature Astronomy*. 6. pp. 428–435. doi: 10.1038/s41550-022-01655-6
18. Hainaut O.R., Williams A.P. (2020) Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains. *Astronomy & Astrophysics*. 636. Article 121. doi: 10.1051/0004-6361/202037501
19. Lawler S.M., Boley A.C., Rein H. (2022) Visibility predictions for near-future satellite mega-constellations: latitudes near 50° will experience the worst light pollution. *The Astronomical Journal*. 163(1). Article 21. pp. 1–14. doi: 10.3847/1538-3881/ac341b
20. Mallama A. (2020) A flat-panel brightness model for the Starlink satellites and measurement of their absolute visual magnitude. *ArXiv*. 2003.07805v1 [astro-ph.IM]. doi: 10.48550/arXiv.2003.07805
21. Mallama A. (2020) Starlink satellite brightness before Visorsat. *ArXiv*. 2006.08422v1 [astro-ph.EP]. doi: 10.48550/arXiv.2006.08422
22. Cole R.E. (2021) A sky brightness model for the Starlink ‘Visorsat’ spacecraft – II. *ArXiv*. 2107.06026v1 [astro-ph.IM]. doi: 10.48550/arXiv.2107.06026
23. Cognion R.L. (2013) Observations and modeling of GEO satellites at large phase angles. *The 14th AMOS Conference Technical Paper*. Access mode: <https://amotech.com/TechnicalPapers/2013/POSTER/COGNION.pdf>
24. Zakhvatkin M.V. (2013) Modelirovanie vidimogo bleska kosmicheskogo apparata «Spektr-R» dlya planirovaniya astrometricheskikh nablyudeniy [Simulation of apparent brightness of the “Spectr-R” spacecraft for planning astrometric observations]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii*. 5. pp. 303–311.
25. Pharr M., Jakob W., Humphreys G. (2023) *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. 4th edition. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
26. Rhodes B. (2019) Skyfield: High precision research-grade positions for planets and Earth satellites generator. *Astrophysics Source Code Library*. Record ascl:1907.024
27. Jakob W., Speierer S., Roussel N., Nimier-David M., Vicini D., Zeltner T., Nicolet B., Crespo M., Leroy V., Zhang Z. (2022) *Mitsuba 3 renderer* [Computer software]. Version 3.0.1. URL: <https://mitsuba-renderer.org>
28. McCue G.A., Williams J.G., Morford J.M. (1971) Optical characteristics of artificial satellites. *Planetary and Space Science*. 19(8). pp. 851–868. doi: 10.1016/0032-0633(71)90137-1
29. Carassa F., Ciavoli Cortelli L.A., Macchia M., Tirro S. (1978) The SIRIO programme. *Acta Astronautica*. 5. pp. 385–413. doi: 10.1016/0094-5765(78)90097-8
30. Burden S., Sjoedin P. (2023) Sirio in HBF 3 chamber in building 24 at ESTEC. *ESA Space Heritage Image Project*. URL: <https://ship.esa.int/ISS/view.jsp?cid=ESTEC-PHOTO-1977.03.893>
31. Mitsuba3 Documentation. Smooth Diffuse Material (Diffuse). *Mitsuba Renderer Project*. URL: https://mitsuba.readthedocs.io/en/latest/src/generated/plugins_bsdfs.html#smooth-diffuse-material-diffuse
32. Mitsuba3 Documentation. Rough Conductor Material (Roughconductor). *Mitsuba Renderer Project*. URL: https://mitsuba.readthedocs.io/en/latest/src/generated/plugins_bsdfs.html#rough-conductor-material-roughconductor

Сведения об авторах:

Афонин Антон Геннадьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: aag@niipmm.tsu.ru

Бутов Владимир Григорьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математической физики Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Кулешов Артем Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

Солоненко Виктор Александрович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

Ящук Алексей Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

Information about the authors:

Afonin Anton G. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: aag@niipmm.tsu.ru

Butov Vladimir G. (Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: bvg@niipmm.tsu.ru

Solonenko Viktor A. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vik@niipmm.tsu.ru

Kuleshov Artyom A. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: artem.kuleshov@niipmm.tsu.ru

Yashchuk Aleksey A. (Candidate of Physics and Mathematics, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: rainbow@niipmm.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2025; принята к публикации 05.02.2026

The article was submitted 26.09.2025; accepted for publication 05.02.2026