

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 524.3

В. М. ТЫМКУЛ, Л. В. ТЫМКУЛ, Ю. А. ФЕСЬКО,  
К. В. КУДРЯШОВ, С. В. ЛУГОВСКИХ

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Рассматривается методика расчета звездной величины Международной космической станции по отраженному солнечному излучению. Методика основана на использовании коэффициента габаритной яркости как оптической характеристики отраженного излучения станции и представлении ее поверхности в виде суперпозиции цилиндрических, конических, сферических и плоских поверхностей. Составлены алгоритм и программа расчета звездной величины станции в зависимости от углов ее ориентации на Солнце и наблюдателя. Приведены результаты расчета и их сравнительный анализ с данными из сети Интернет и результатами эксперимента.

*Ключевые слова:* звездная величина, Международная космическая станция, отражение, коэффициент габаритной яркости.

В Международном космическом эксперименте уже несколько лет принимает участие Международная космическая станция (МКС) — самый крупный из имеющихся искусственных спутников Земли (ИСЗ), звездная величина  $m$  которого достигает значений, сравнимых с звездной величиной, например, Сириуса ( $m = -1,47$ ) и Канопуса ( $m = -0,72$ ). Однако звездная величина МКС не является постоянной за счет изменения ориентации станции относительно точки наблюдения и Солнца.

Знание звездной величины как МКС, так и других крупногабаритных ИСЗ необходимо, в первую очередь, при расчетах и проектировании оптико-электронных систем ориентации и навигации [1, 2]. Кроме того, звездная величина искусственных космических объектов представляет интерес для исследований в астрономии и астрофизике, а также ряде разделов прикладной физики и оптики. Так, например, в работе [3] рассматривается проблема использования в космической геодезии свойств отражения солнечного света поверхностями крупногабаритных космических аппаратов и ИСЗ, в том числе спутников системы ГЛОНАСС, для анализа влияния светового давления на их орбиты.

Настоящая статья посвящена разработке методики определения звездной величины МКС в зависимости от ее ориентации в пространстве. Для решения поставленной задачи геометрическая модель поверхности МКС представляется как суперпозиция локальных элементов цилиндрической, конической, сферической и плоской поверхностей. При этом отражение солнечного излучения элементами корпуса станции носит диффузный или направленно-рассеивающий характер, а отражение от элементов солнечных батарей является зеркальным.

Поток солнечных лучей отражается от освещенных элементов поверхности МКС и достигает наблюдателя, находящегося на поверхности Земли. Благодаря этому наблюдатель может видеть солнечный свет, отраженный станцией. Используя такую оптическую характеристику отражения от объемных тел, как коэффициент габаритной яркости (КГЯ) [4], можно определить силу отраженного станцией света через освещенность Солнца вне атмосферы ( $E_C$ ) по формуле

$$I_{\Sigma}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = \frac{E_C}{\pi} \sum_{i=1}^k \rho_i \bar{\beta}_i(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) A_i(\Theta_H, \varphi_H), \quad (1)$$

где  $\rho_i$  — коэффициент отражения  $i$ -го элемента МКС;  $A_i$  — площадь проекции  $i$ -го элемента МКС в направлении наблюдателя;  $\bar{\beta}_i$  — нормированный КГЯ  $i$ -го элемента МКС;  $\Theta_H, \Theta_C, \varphi_H, \varphi_C$  — сферические координаты направлений на Солнце ( $\Theta_C, \varphi_C$ ) и на наблюдателя ( $\Theta_H, \varphi_H$ ).

Зная расстояние  $l$  от МКС до поверхности Земли, можно перейти от силы света к освещенности  $E_a$ , формируемой станцией в точке наблюдения и определяемой по формуле

$$E_a = I_{\Sigma} \tau_a / l^2, \quad (2)$$

где  $\tau_a$  — коэффициент пропускания атмосферы Земли.

На основании закона Погсона [5], который устанавливает логарифмическую зависимость ощущения глаза от раздражения его светом, звездная величина МКС, регистрируемая на уровне моря, выражается через освещенность  $E_a$ :

$$m = -14,01 - 2,51 \cdot \lg E_a. \quad (3)$$

В формуле (1) присутствуют нормированные значения коэффициента  $\bar{\beta}$  локальных поверхностей, определяемые для элементов корпуса с диффузным покрытием следующим образом. Так, индикатриса нормированного КГЯ для цилиндра с коэффициентом сжатия  $t_{\text{ц}} = r_{\text{ц}}/h_{\text{ц}}$ , где  $r_{\text{ц}}$  и  $h_{\text{ц}}$  — радиус основания и высота цилиндра, определяется как [6]

$$\begin{aligned} \bar{\beta}_{\text{ц}}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = & \frac{1}{2(2 \sin \varphi_H + \pi t_{\text{ц}} |\cos \varphi_H|)} \{ \sin \varphi_H \sin \varphi_C \cos \Theta_C \cos \Theta_H \times \\ & \times [\pi - (\Theta_C + \Theta_H) + (\sin \Theta_C \cos \Theta_C) + \sin \Theta_H \cos \Theta_H] + \sin \varphi_C \sin \varphi_H \sin(\Theta_C + \Theta_H) \times \\ & \times (-\cos^2 \Theta_H + \cos^2 \Theta_C) + \sin \varphi_H \sin \varphi_C \sin \Theta_C \sin \Theta_H \times \\ & \times [\pi - (\Theta_C - \Theta_H) - (\sin \Theta_C \cos \Theta_C - \sin \Theta_H \cos \Theta_H)] + 2\pi t_{\text{ц}} \chi(\varphi_H, \varphi_C) \cos \varphi_H \cos \varphi_C \}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\chi(\varphi_H, \varphi_C) = 1$ , когда  $\varphi_C$  и  $\varphi_H$  одновременно заданы в области  $[\pi/2, \pi]$ ; в противном случае  $\chi(\varphi_H, \varphi_C) = 0$ ;  $\varphi_C, \varphi_H$  — угол между осью цилиндра, совпадающей с осью  $OZ$  декартовой системы координат станции и направлениями соответственно на источник света и на наблюдателя;  $\Theta_C, \Theta_H$  — угол между осью  $OX$  декартовой системы координат и проекцией данных направлений на координатную плоскость  $XOY$ .

Индикатриса нормированного КГЯ для усеченного конуса с коэффициентом сжатия  $t_k = (r_2 - r_1)/h_k$  ( $r_2 > r_1$ ), где  $r_1, r_2$  — радиусы большого и малого оснований конуса, определяется выражением [6]

$$\bar{\beta}_k(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = \frac{t_k}{\sqrt{t_k^2 + 1} |\cos \varphi_H|} \left[ \frac{t_k^2}{2} \sin \varphi_H \sin \varphi_C \cos(\Theta_C - \Theta_H) + \cos \varphi_H \cos \varphi_C \right]. \quad (5)$$

При этом выполняются условия  $\pi - \arctg t < \varphi_C$  и  $\varphi_H \leq \pi$ , т.е. освещается и визируется только боковая поверхность усеченного конуса.

Индикатриса нормированного КГЯ для сферы имеет вид [7]

$$\bar{\beta}_{\text{сф}}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = (2/3\pi)((\pi - \delta) \cos \delta + \sin \delta), \quad (6)$$

где

$$\cos \delta = \sin \varphi_{\text{H}} \sin \varphi_{\text{C}} \cos(\Theta_{\text{H}} - \Theta_{\text{C}}) + \cos \varphi_{\text{H}} \cos \varphi_{\text{C}}. \quad (7)$$

Индикатрисы нормированного КГЯ солнечных батарей определяются по формуле

$$\bar{\beta}_{\delta}(\Theta_{\text{C}}, \varphi_{\text{C}}, \Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = \beta(\alpha_0, \alpha_{\text{H}}) \delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}}), \quad (8)$$

где  $\beta(\alpha_0, \alpha_{\text{H}})$  — индикатриса коэффициента яркости материала поверхности солнечных батарей;  $\delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}})$  — дельта-функция Дирака, численно равная

$$\delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}}) = \begin{cases} 1, & \alpha_0 = \alpha_{\text{H}}; \\ 0, & \alpha_0 \neq \alpha_{\text{H}}, \end{cases} \quad (9)$$

причем  $\alpha_0, \alpha_{\text{H}}$  — это углы между нормалью к поверхности батареи и направлением соответственно на Солнце и наблюдателя.

Следует отметить, что зеркальный блик от поверхности солнечной батареи имеет место при условии  $\alpha_0 = \alpha_{\text{H}}$  и нахождении этих углов в одной плоскости.

Методика расчета КГЯ сложных поверхностей с направленно-рассеивающим покрытием и, в частности, цилиндрических, сферических и конических поверхностей подробно рассмотрена в работе [8].

Зная геометрические размеры всех элементов МКС [9], площади их проекций в зависимости от углов  $\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}$  можно определить следующим образом:

— площадь проекции цилиндра — по формуле:

$$A_{\text{ц}}(\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = 2r_{\text{ц}}h_{\text{ц}} \sin \varphi_{\text{H}} + \pi r_{\text{ц}}^2 |\cos \varphi_{\text{H}}|; \quad (10)$$

— площадь проекции усеченного конуса — по формуле

$$A_{\text{к}}(\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = \left[ a^2 \left( \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{a}{h_{\text{к}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}}} \right) \cdot |\cos \varphi_{\text{H}}| + ah_{\text{к}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{h_{\text{к}}^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}}}} \sin \varphi_{\text{H}} \right] + \delta(\varphi_{\text{H}}) \pi a^2 |\cos \varphi_{\text{H}}|, \quad (11)$$

где

$$\delta(\varphi_{\text{H}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi_{\text{H}} > \pi/2, \\ 0 & \text{при } \varphi_{\text{H}} \leq \pi/2; \end{cases} \quad a = r_2 + r_1; \quad (12)$$

— площадь проекции сферы

$$A_{\text{сф}} = \pi r_{\text{сф}}^2, \quad (13)$$

где  $r_{\text{сф}}$  — радиус сферы.

Таким образом, методика расчета звездной величины МКС при различных углах ориентации станции на Солнце и наблюдателя основывается на соотношениях (3)—(13).

Рассмотрим алгоритм расчета звездной величины  $m$ .

1. Выбираются значения углов  $\Theta_{\text{C}}, \varphi_{\text{C}}$  и  $\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}$ .
2. Задаются значения коэффициентов отражения  $r_i$  локальных элементов МКС.
3. На основе формул (4)—(6), (8) и (10), (11), (13) применительно к геометрической модели станции рассчитывается значение суммы в соотношении (1).
4. Вычисляется солнечная постоянная  $E_{\text{C}}$  вне атмосферы:

$$E_{\text{C}} = \frac{W(T_{\text{C}})}{\pi} 2\pi(1 - \cos \alpha),$$

где  $W(T_{\text{C}})$  — светимость Солнца при абсолютной температуре  $T_{\text{C}}$ , вычисляемая по формуле Стефана — Больцмана:  $W(T_{\text{C}}) = \sigma T_{\text{C}}^4$  ( $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана);  $2\alpha = 32'$  — угловой размер солнечного диска.

5. На основе формул (2) и (3) вычисляются соответственно величина  $E_a$  и искомая звездная величина  $m$ .

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты компьютерного расчета распределения значений звездной величины МКС по предлагаемой методике при случайных значениях углов  $\Theta_C, \Theta_H, \varphi_C, \varphi_H$  (по оси абсцисс показан номер  $N_k$  компьютерного эксперимента). При этом значения  $\rho_i$  для всех элементов корпуса станции принимались одинаковыми, а функция распределения случайных значений углов  $\Theta_C, \Theta_H, \varphi_C, \varphi_H$  соответствовала равномерному закону.

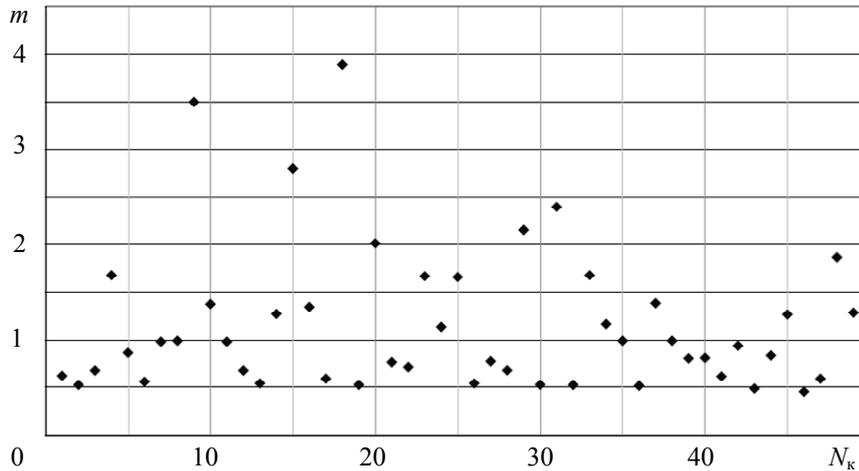


Рис. 1

Согласно расчетам значения звездной величины МКС в данном случае сосредоточены в интервале от +3 до +0,5.

При обработке запроса значений звездной величины МКС с сайта [10] (для наблюдений из Новосибирска в период с 30 апреля по 25 мая 2004 г.) были получены результаты распределения значений  $m$ , показанные на рис. 2 (здесь  $N_H$  — номер практических наблюдений).

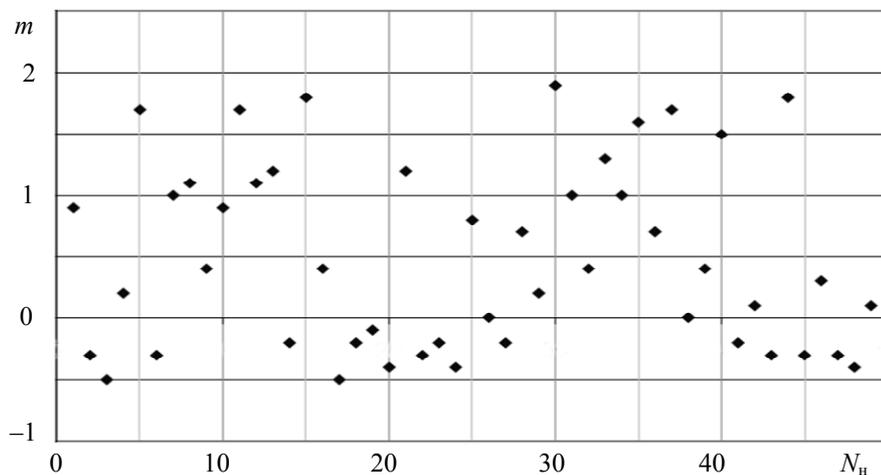


Рис. 2

Согласно этому распределению значения звездной величины МКС сосредоточены в интервале от +1,8 до -0,5.

Для оценки корректности предлагаемой модели расчета звездной величины МКС в этот же период были проведены визуальные наблюдения пролета станции над Новосибирском с помощью телескопа с измерением звездной величины методом Аргеландера [11]. По результатам этих наблюдений значения  $m$  находились в интервале от +1 до 0. Имеющиеся различия результатов расчета с данными из сети Интернет и данными экспериментов можно объяснить, по-видимому, выбором случайных значений углов ориентации станции на Солнце

и в направлении наблюдателя, а также использованием одинаковых значений коэффициентов отражения  $\rho_i$  для всех элементов корпуса станции.

В заключение следует отметить, что по предлагаемой методике можно проводить не только оценочные расчеты звездной величины МКС при случайном выборе углов ориентации станции, но и определять точные значения величины  $m$ , если будут заданы действительные значения коэффициентов  $\rho_i$  и конкретные значения углов  $\Theta_C$ ,  $\varphi_C$  и  $\Theta_n$ ,  $\varphi_n$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф. Опτικο-электронные приборы космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
2. Ивандиков Я. М. Опτικο-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
3. Сурнин Ю. В. История создания и развития межкафедральной научно-исследовательской лаборатории космической геодезии // Вестн. СГГА: науч.-техн. журн. Новосибирск: СГГА, 2010. Вып. 2(13). С. 128—145.
4. Холопов Г. К., Шуба Ю. А. Коэффициент габаритной яркости как количественный параметр для оценки отражательных свойств объемных тел // ОМП. 1974. № 1. С. 8—10.
5. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет опτικο-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
6. Тевяшов В. И., Тымкул В. М., Шуба Ю. А. Оптические характеристики отражения объемных тел в поляризованном свете // ОМП. 1979. № 10. С. 8—11.
7. Тымкул В. М., Шуба Ю. А. Рассеяние света диффузными квадратичными поверхностями в фотометрическом представлении // Там же. 1978. № 11. С. 11—13.
8. Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Кудряшов К. В. Отражение оптического излучения телами с направленно-рассеивающим покрытием // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 58—63.
9. Схема МКС [Электронный ресурс]: <[www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)>.
10. [Электронный ресурс]: <[www.heavens-above.com](http://www.heavens-above.com)>.
11. Методика наблюдений переменных звезд [Электронный ресурс]: <[www.nevskibelastro.net/method](http://www.nevskibelastro.net/method)>.

#### Сведения об авторах

- Василий Михайлович Тымкул** — канд. техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;  
E-mail: [kaf.oep@ssga.ru](mailto:kaf.oep@ssga.ru)
- Любовь Васильевна Тымкул** — канд. техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;  
E-mail: [kaf.oep@ssga.ru](mailto:kaf.oep@ssga.ru)
- Юрий Александрович Фесько** — аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;  
E-mail: [y.a.fesko@gmail.com](mailto:y.a.fesko@gmail.com)
- Кирилл Васильевич Кудряшов** — магистр; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;  
E-mail: [kir-kudryashov@yandex.ru](mailto:kir-kudryashov@yandex.ru)
- Светлана Валерьевна Луговских** — бакалавр; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;  
E-mail: [mumak2004@yandex.ru](mailto:mumak2004@yandex.ru)

Рекомендована кафедрой  
наносистем и оптотехники

Поступила в редакцию  
08.02.13 г.