
УДК 629.786.2.001.891.55

УЧЕТ УХОДЯЩЕГО ОТ ЗЕМЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ В МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2021 г. Д. Н. Рулев*

*Ракетно-космическая корпорация “Энергия” им. С.П. Королёва (РКК “Энергия”), Москва, Россия
e-mail: dmitry.rulev@rsce.ru

Поступила в редакцию 19.04.2021 г.

После доработки 02.08.2021 г.

Принята к публикации 06.08.2021 г.

Описывается методика использования характеристик уходящего от Земли излучения в модели системы электропитания Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), разработанная в рамках реализации на РС МКС космического эксперимента “Исследование характеристик излучения Земли и отработка использования их в модели системы электропитания РС МКС” – шифр “Альbedo”. Представлены расчетные схемы определения характеристик эффективности солнечных батарей и моделирования прихода электроэнергии от солнечных батарей с учетом альbedo Земли и соответствующие рекомендации по использованию предложенных моделей. По результатам выполненной апробации получены обоснованные значения сформулированного контрольного параметра оценки эффективности солнечных батарей, использование которого позволяет осуществлять максимально точный контроль эффективности солнечных батарей модулей РС МКС. Расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии позволяют выполнять как высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения, так и прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета РС МКС.

Ключевые слова: российский сегмент Международной космической станции, солнечные батареи, приход электроэнергии, оценка эффективности солнечных батарей, уходящее от Земли излучение, альbedo

DOI: 10.31857/S0002331021040117

ВВЕДЕНИЕ

В ходе реализации на Российском сегменте Международной космической станции (РС МКС) космического эксперимента “Исследование характеристик излучения Земли и отработка использования их в модели системы электропитания РС МКС” (шифр “Альbedo”) [1] выполнена отработка методов учета излучения системы “атмосфера – земная поверхность” при моделировании работы системы электропитания (СЭП) служебного модуля (СМ) РС МКС. Объектами исследования в эксперименте являлись методы и алгоритмы целевой обработки измерений спектрометрической аппаратуры и данных телеметрической информации (ТМИ) тока солнечных батарей (СБ) РС МКС для учета уходящего от Земли излучения при анализе результатов сеансов оценки эффективности СБ и при прогнозировании прихода электроэнергии от СБ РС МКС.

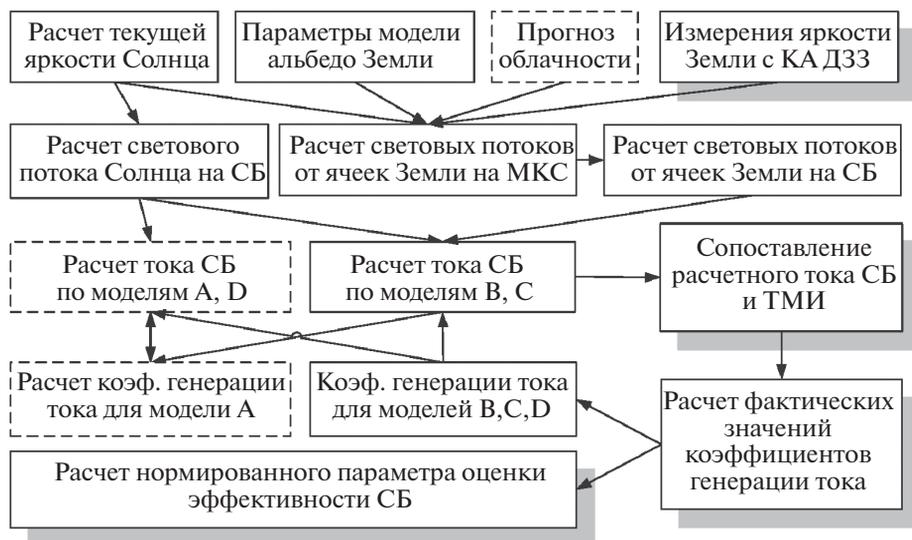


Рис. 1. Расчетные схемы оценки эффективности СБ (блоки, обозначенные сплошной линией) и прогнозирования прихода электроэнергии (блоки без тени).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С учетом основных факторов, обуславливающих переменность измеряемого тока солнечных батарей (СБ) [2–4] (уменьшение генерации тока за счет повреждения и деградации СБ, увеличение генерации тока за счет освещения СБ уходящим от Земли излучением, уменьшение/увеличение генерации тока в зависимости от текущей интенсивности поступающего на МКС солнечного излучения), для оценки эффективности СБ СМ РС МКС используем параметр $EF(V_const)$, определяемый как ток, который генерируют СБ за счет освещения лицевой поверхности СБ солнечным излучением эталонной яркости V_const под прямым углом к плоскости поверхности СБ. В качестве величины эталонной яркости солнечного излучения используем значение $V_const = 1360.8 \text{ Вт/м}^2$, соответствующее опубликованному в 2008 году значению солнечной постоянной $1360.8 \pm 0.5 \text{ Вт/м}^2$ (данное значение ниже полученного в 1990-х годах значения $1365.4 \pm 1.3 \text{ Вт/м}^2$) [5]. Расчетная схема оценки эффективности СБ с учетом альbedo Земли представлена на рис. 1.

Ток СБ рассчитываем как сумму составляющих, генерируемых за счет освещения лицевой и тыльной сторон СБ излучением Солнца и излучением, уходящим от Земли:

$$\frac{V_тек}{V_const} \sum_j K_j \left\{ P_j^S \cos \alpha_j^S + K_{ТЛ} P_j^{S*} \cos(\pi - \alpha_j^S) + \sum_k \frac{\theta_k r_k \sin h_k}{\pi} \left[P_j^k \cos \alpha_j^k + K_{ТЛ} P_j^{k*} \cos(\pi - \alpha_j^k) \right] \right\}, \quad (1)$$

где $V_тек$, V_const – текущее и эталонное значения интенсивности солнечного излучения на орбите МКС; K_j – коэффициент генерации тока от освещения лицевой поверхности j -го элемента фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) СБ; $K_{ТЛ}$ – коэффициент эффективности тыльной поверхности СБ относительно лицевой; P_j^S , P_j^{S*} –

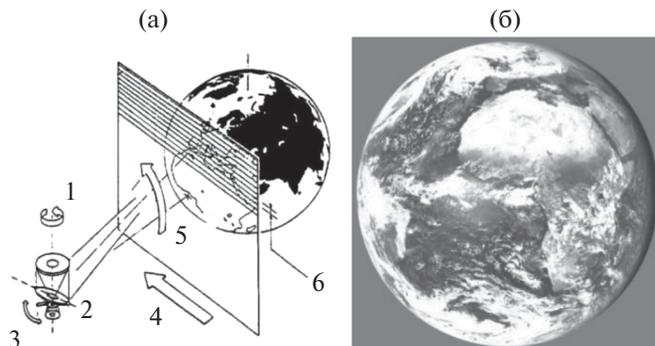


Рис. 2. Аппаратура *SEVIRI* спутников *Meteosat*: (а) принцип съемки Земли (1 – вращение 100 об./мин; 2 – ось поворота зеркала, диапазон сканирования $\pm 5.5^\circ$; 3 – калибровка и возврат 3 мин; 4 – сканирование “Восток-Запад” 30 мсек; 5 – сканирование “Юг–Север” 12 мин; 6 – шаг между трассами 0.6 с); (б) изображение канала *vis0.6*.

освещенная Солнцем площадь лицевой и тыльной поверхностей j -го элемента ФЭП СБ; α_j^S – угол между направлением на Солнце и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ; θ_k – телесный угол, под которым k -ая ячейка Земли видна с МКС; r_k – коэффициент диффузного отражения k -ой ячейки Земли (значение двулучевой функции отражения BRF); h_k – угол высоты Солнца в k -ой ячейке Земли; P_j^k , P_j^{k*} – освещенная излучением от k -ой ячейки Земли площадь лицевой и тыльной поверхностей j -го элемента ФЭП СБ; α_j^k – угол между направлением от МКС на k -ую ячейку Земли и нормалью к лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ.

Контроль точности расчетной интенсивности солнечного излучения [6] осуществляем по данным прибора *Total Irradiance Monitor (TIM)* [7], измеряющего полный поток излучения от Солнца, публикуемым на сайте https://lasp.colorado.edu/lisird/data/sofse_tsi_6hr_13/). Расчетные значения интенсивности солнечного излучения корректируем в соответствии с данными измерений, при этом расхождение расчетных значений от данных измерений на 10-летнем интервале не превышает 0.14% при среднеквадратичном отклонении 0.048%. Интенсивность уходящего от Земли излучения рассчитываем с учетом характеристик альbedo ячеек Земли, полученных по данным видимых каналов спектра *vis0.6* (560–710 нм), *vis0.8* (740–880 нм) аппаратуры *Spinning Enhanced Visible and IR Imager (SEVIRI)* геостационарных метеорологических спутников *Meteosat* в точках стояния 0 и 41.5° в.д. [8], [9], а при их отсутствии альbedo ячеек Земли принимается равным среднему альbedo Земли 0.29 [10]. На рис. 2 представлен принцип съемки Земли аппаратурой *SEVIRI* и пример получаемого изображения.

Коэффициенты генерации тока находятся из условия минимизации отличия расчетных данных тока СБ от данных ТМИ

$$\|\bar{F}(\bar{x})\|^2 = \sum_{i=1}^n (I_i^{\text{ТМИ}} - I_i(\bar{x}))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $I_i^{\text{ТМИ}}$ – измеренное значение тока СБ на момент t_i ; $I_i(\bar{x})$ – модельное значение тока СБ под воздействием прямого солнечного и уходящего от Земли излучений на момент t_i , \bar{x} – вектор определяемых параметров. Задачу решаем с использованием итера-

ционного метода Ньютона–Гаусса [11]: начиная с начального значения \bar{x}_0 последовательные приближения \bar{x}_{l+1} , $l = 0, 1, 2, \dots$ рассчитываются по соотношению

$$\bar{x}_{l+1} = \bar{x}_l - \left(J^T(\bar{x}_l) J(\bar{x}_l) \right)^{-1} J^T(\bar{x}_l) \bar{F}(\bar{x}_l), \text{ где } J(\bar{x}) = \left[\frac{\partial I_i(\bar{x})}{\partial x_j} \right]_{i=1, j=1}^{n, m} - \text{матрица Якоби для}$$

функции $\bar{F}(\bar{x})$.

ТМИ тока СБ СМ содержит данные тока по 12 генераторам СБ (ТМ параметры 1÷12СБ1,2) и данные суммарного тока (ТМ параметры ТСА, ТСБ: ТС – ток суммарный; А, Б – датчики А, Б). Оценка эффективности СБ осуществляется по данным суммарного тока, поскольку СЭП СМ имеет некоторое собственное в общем случае не всегда неизменное потребление и сумма токов от генераторов всегда меньше суммарного тока [4].

Отметим, что коэффициенты генерации тока K_j могут быть представлены в виде $K_j = K_{ГТ} K_{Орj}$, где $K_{Орj}$ – относительный коэффициент работоспособности j -го элемента ФЭП, принимающий значения в диапазоне $[0, 1]$ и характеризующий относительную работоспособность элемента ФЭП (относительно других элементов ФЭП СБ); $K_{ГТ}$ – коэффициент генерации тока СБ.

Параметр $EF(V_const)$ характеризует суммарную эффективность лицевой поверхности двух СБ СМ (СБ2, СБ4) и связан с коэффициентами генерации тока соотношением $EF(V_const) = \sum K_j P_j$, где P_j – площадь лицевой поверхности j -го элемента ФЭП СБ.

Определение параметра эффективности СБ осуществляем по ТМИ, полученной на интервале, когда составляющая тока СБ, генерируемая от освещения СБ уходящим от Земли излучением, минимальна, а именно – на интервале от прохождения вечернего терминатора до входа МКС в тень Земли при величине указанной расчетной составляющей тока не более 0.5% от тока СБ (1.1 А) [12].

Для определения эффективности тыльной поверхности СБ дополнительно выполняем режим ориентации СБ, при котором Солнце освещает тыльную поверхность СБ, при этом для определения эффективности отдельных СБ режимы ориентации лицевой и тыльной поверхностей СБ на Солнце выполняем отдельно для каждой СБ.

Сеансы оценки эффективности СБ рекомендуется выполнять над районами земной поверхности, находящимися в зоне охвата КА *Meteosat*, временные интервалы наличия измерений яркости подстилающей поверхности с КА *Meteosat* используются для контроля точности получаемых решений [13].

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Используем следующие модели прогнозирования прихода электроэнергии, отличающиеся особенностями учета альbedo Земли: А – учет альbedo Земли путем завышения коэффициентов генерации тока; В – учет среднего альbedo Земли; С – учет альbedo ячеек Земли; D – без учета альbedo Земли (альbedo Земли = 0).

Модель А – расчет тока СБ только с учетом освещения СБ прямым излучением Солнца, при этом применяются значения коэффициентов генерации тока, завышенные относительно точных фактических значений коэффициентов генерации тока и определяемые из условия получения расчетных значений тока СБ по модели А, максимально близких к расчетным значениям тока СБ по модели В.

Модель В – применяются характеристики среднего альbedo Земли ко всем ячейкам поверхности Земли.

Модель С – к ячейкам поверхности Земли применяются индивидуальные характеристики альbedo. В общем случае применяются: нулевая облачность – для расчета ми-

нимально-возможного прихода электроэнергии; прогнозируемый процент облачности — для расчета наиболее вероятного значения прихода электроэнергии; 100% облачность — для расчета максимально-возможного прихода электроэнергии.

Модель D — расчет тока СБ только от излучения Солнца с применением фактических значений коэффициентов генерации тока, определенных для моделей В и С.

Модели В и С обеспечивают высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения. Модели А и D обеспечивают прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета МКС, при этом модель А дает ожидаемый приход электроэнергии, а модель D дает гарантированный приход электроэнергии, заведомо меньше фактического прихода и меньше оценки гарантированного прихода, получаемой по модели С с использованием нулевой облачности.

Коэффициенты генерации тока для модели А определяются из условия минимизации отличия расчетных токов СБ, полученных по моделям А и В

$$\|\bar{F}(\bar{x}^A)\|^2 = \sum_{i=1}^n (I_i^A(\bar{x}^A) - I_i^B(\bar{x}^B))^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $I_i^A(\bar{x}^A)$, $I_i^B(\bar{x}^B)$ — значения тока СБ на момент t_i по моделям А и В; \bar{x}^B — используемые в модели В фактические значения коэффициентов генерации тока от освещения лицевой и тыльной поверхностей СБ; \bar{x}^A — вектор определяемых параметров (коэффициенты генерации тока для модели А). Задача решается с использованием метода Ньютона-Гаусса.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ

На рис. 3 представлены результаты анализа данных замеров тока СБ, выполненных в сеансах оценки эффективности СБ СМ РС МКС [14] и полученные на интервале реализации эксперимента значения параметра $EF(B_const)$ (модели С, В).

Выполненный анализ включал пересчет измеренных значений тока СБ, величина которых соответствует текущей на момент выполнения замеров яркости Солнца $V_тек$, к условию освещения СБ солнечным излучением эталонной яркости V_const . На рис. 3 показаны верхняя и нижняя границы значений параметра $EF(B_const)$, соответственно, кривая EF_max — кривая минимальных значений замеров тока СБ, полученных от начала полета до текущего момента; кривая EF_min — кривая максимальных значений замеров тока СБ, полученных от текущего момента до момента времени последнего замера тока СБ, уменьшенных на максимальное значение составляющей тока СБ, которая может быть сгенерирована за счет освещения тыльной поверхности СБ уходящим от Земли излучением и величина которой составляет 11% суммарного тока СБ ($11\% \approx 0.38 \times 0.29 \times 100\%$, где 0.38 — номинальное (паспортное) значение относительной эффективности тыльной поверхности СБ СМ [4], 0.29 — среднее альbedo Земли).

В табл. 1 представлены значения параметров эффективности СБ СМ для рассмотренных моделей на интервале 03.04.2019–30.09.2020 г.

На рис. 4 представлены графики расчетного тока СБ и данные ТМИ в сеансе измерений 30.04.2020 г., в котором на интервале 54000–57000 с СБ СМ наведены на Землю.

Точная модель — Модель С — реализуется на интервале наличия измерений с КА *Meteosat* яркости всей видимой с МКС подстилающей поверхности (dt2 на рис. 4). В табл. 2 представлены значения коэффициента $K_{ТЛ}$ и коэффициента эффективности СБ4 относительно СБ2 $K_{эф.СБ4/СБ2}$, полученные по результатам совместной обработки сеансов измерений 04.06.2020 г. и 01.08.2020 г. с раздельным наведением на Солнце

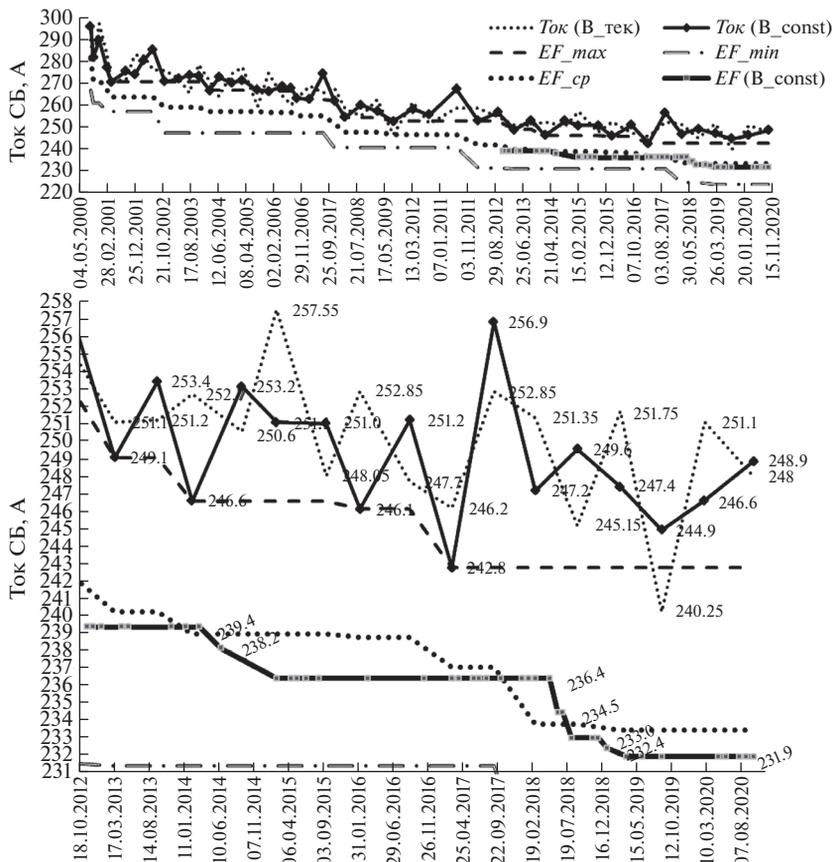


Рис. 3. Анализ данных замера тока СБ в сеансах оценки эффективности СБ СМ (сверху – весь период эксплуатации МКС; снизу – интервал реализации КЭ): *Tок(B_тек)* – данные замера тока СБ (соответствуют текущей яркости Солнца *B_тек*); *Tок(B_const)* – ток СБ, пересчитанный к эталонной яркости Солнца *B_const*; *EF_max/min/cp* – верхняя и нижняя границы *EF(B_const)* и их среднее значение.

лицевой и тыльной поверхностей СБ2,4 СМ ($K_{ТЛ}$ находится на верхней границе паспортного диапазона 0.38 ± 0.02). В табл. 2 и далее: N – количество точек измерений (точка объединяет 5 с), СКО и СИО – среднеквадратичное и среднее интегральное отклонения $Tок2$

$$\text{от } Tок1 \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Tок2 - Tок1)^2} \text{ A и } 100 \times \frac{\sum (Tок2 - Tок1)}{\sum Tок1} \%.$$

В табл. 3 приведены результаты сравнения расчетного тока СБ между моделями и с данными ТМИ: данные модели С получены на интервале наличия измерений с КА *Meteosat* всей видимой с МКС освещенной поверхности Земли в сеансе измерений

Таблица 1. Параметры моделей расчета тока СБ на интервале 03.04.2019–30.09.2020 г.

| Параметры | Модель | | Модель А/Модель С, В, D |
|----------------|----------|----------|-------------------------|
| | С, В, D | А | |
| $EF(B_const)$ | 231.94 А | 244.83 А | 1.0554 |
| $K_{ТЛ}$ | 0.4015 | 0.5643 | 1.4057 |

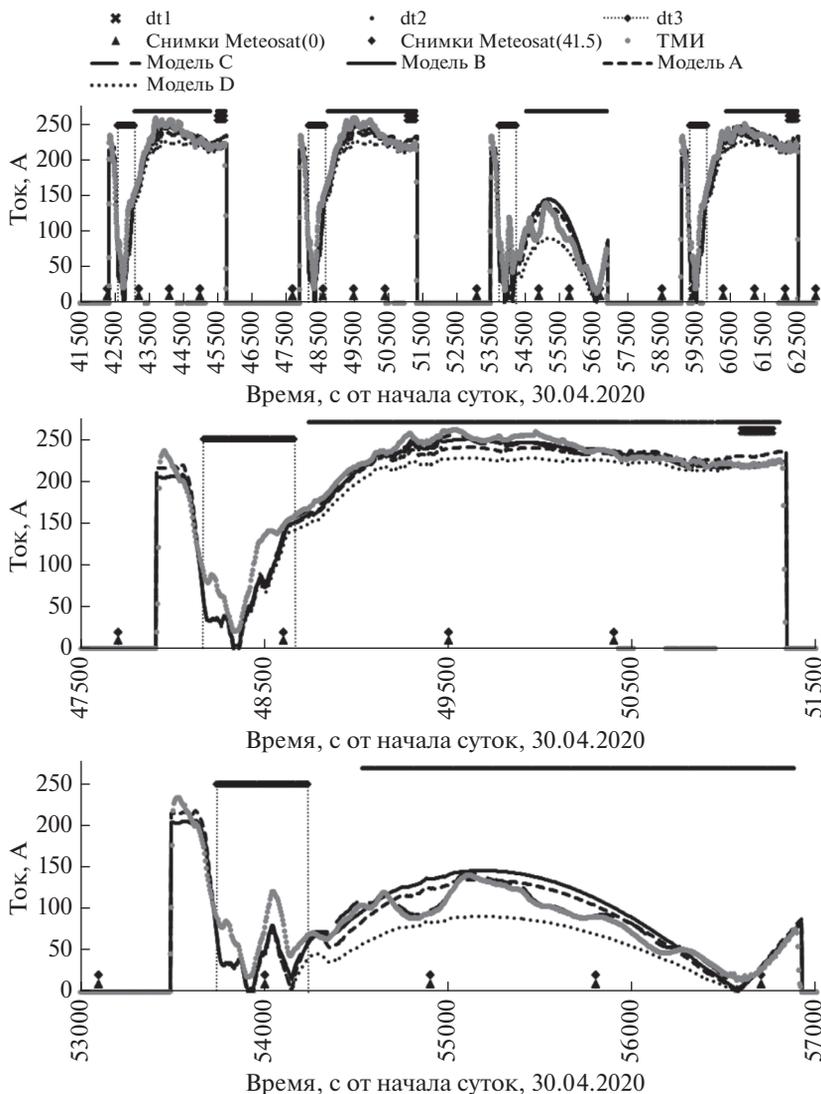


Рис. 4. Графики расчетного тока СБ и данные ТМИ в сеансе 30.04.2020 г.: Модель А, В, С, D и ТМИ – ток СБ по моделям А, В, С, D и данные ТМИ; Снимки Meteosat – моменты снимков с КА Meteosat (точки стояния 0° и 41.5° в.д.); dt1 – интервал определения параметра $EF(V_{const})$; dt2 – интервал наличия измерений с КА Meteosat всей видимой с МКС освещенной поверхности Земли; dt3 – интервалы существенного затенения СБ СМ элементами конструкции АС МКС.

30.04.2020 г. (dt2 на рис. 4); для моделей В, А, D приведен диапазон min/max значений СКО, СИО и среднего тока СБ по сеансам измерений 03.04/07.06/31.08.2019 г., 30.04/04.06/01.08/29.08/30.09.2020 г.

Сравнение выполняется отдельно на временных интервалах:

- 1 – интервалы определения параметра $EF(V_{const})$ (dt1 на рис. 4);
- 2 – штатный полет (СБ ориентированы на Солнце);
- 3 – интервалы ориентации тыльной поверхности СБ на Солнце.

Таблица 2. Определение параметров $K_{ТД}$ и $K_{эф.СБ4/СБ2}$

| Параметры | Сеансы данных | | |
|--------------------------------------|---------------|------------|--------------------|
| | 04.06.2020 | 01.08.2020 | 04.06 и 01.08.2020 |
| $K_{ТД}$ | 0.4050 | 0.3973 | 0.4015 |
| $K_{эф.СБ4/СБ2}$ | 0.9694 | 1.0103 | 0.9956 |
| N | 286 | 324 | 610 |
| СКО расчетного тока СБ от данных ТМИ | 2.4069 А | 1.2721 А | 1.9659 А |

Таблица 3. Сравнение расчетного тока СБ между моделями и с ТМИ

| Интервал | Оценка | Модель | | | | Модель сравнения | | |
|----------|--------|--------|-------------|--------------|-------------|------------------|--------|------------|
| | | С | В | А | Д | название | n | Ср. ток, А |
| 1 | СКО | 2.4 А | 2.1/5.6 А | 8.9 / 14.1 А | 2.1 / 5.6 А | ТМИ | 81 | 219 |
| | СИО, % | -1.0 | -1.3/+0.7 | +4.0/+6.1 | -1.4/+0.6 | | 1936 | 218/227 |
| | | - | -0.1 | +5.4 | -0.1 | С | 81 | 219 |
| | | +0.1 | - | +5.4/+5.4 | -0.1/-0.1 | В | 1936 | 215/226 |
| | | -5.1 | -5.2/-5.1 | - | -5.2/-5.2 | А | | 227/238 |
| | | +0.1 | +0.1/+0.1 | +5.5/+5.5 | - | Д | | 215/226 |
| 2 | СКО | 5.5 А | 7.4/12.1 А | 10.5/15.1 А | 15.7/21.0 А | ТМИ | 1304 | 223 |
| | СИО, % | -1.5 | -1.9/+0.7 | -2.0/+0.6 | -7.1/-4.7 | | 21199 | 215/231 |
| | | - | +0.9 | +0.3 | -5.0 | С | 1304 | 220 |
| | | -0.9 | - | -0.8/0.0 | -6.0/-5.3 | В | 25 500 | 216/227 |
| | | -0.3 | 0.0/+0.8 | - | -5.2/-5.2 | А | | 215/227 |
| | | +5.2 | +5.5/+6.4 | +5.5/+5.5 | - | Д | | 204/215 |
| 3 | СКО | 5.6 А | 8.9/21.7 А | 11.4/20.7 А | 22.8/43.4 А | ТМИ | 408 | 89 |
| | СИО, % | +4.5 | -1.6/+19.9 | -3.0/+9.2 | -34.6/-12.9 | | 3255 | 88/130 |
| | | - | +13.8 | +4.8 | -29.4 | С | 408 | 93 |
| | | -12.1 | - | -12.2/+10.8 | -40.8/-11.6 | В | 3263 | 101/130 |
| | | -4.6 | -9.8/+13.9 | - | -32.6/-20.3 | А | | 92/141 |
| | | +41.6 | +13.1/+68.8 | +25.4/+48.4 | - | Д | | 62/113 |

Из сравнения исключены интервалы времени, на которых СБ СМ существенно затенены американским сегментом (АС) МКС и ошибки расчета тока СБ определяются существенными ошибками расчета сложно-моделируемого затенения СБ СМ элементами конструкции АС МКС (dt3 на рис. 4), вклад данных интервалов в генерацию тока СБ на витке не превышает 6%, а включение их в рассмотрение приведет к неверным оценкам точности получаемых решений.

Представленные в табл. 3 данные подтверждают теоретические положения о взаимосвязи моделей расчета тока СБ.

На интервале определения контрольного параметра оценки эффективности СБ: СИО между моделями С, В, Д $\sim 0.1\%$; СИО модели А от моделей С, В, Д $\sim 5.5\%$; СИО от ТМИ модели С $\sim \pm 1\%$ (СКО ~ 2.5 А), моделей В, Д $\sim \pm 1.5\%$ (СКО $\sim 2-6$ А), модели А $\sim 4-6\%$ (СКО $\sim 9-14$ А).

В штатном полете: СИО между моделями С, В, А $\sim 1\%$; СИО модели Д от моделей С, В, А $\sim -5-6\%$; СИО от ТМИ модели С $\sim \pm 1.5\%$ (СКО ~ 6 А), моделей В, А $\sim \pm 2\%$ (СКО $\sim 7-15$ А), модели Д $\sim -5-7\%$ (СКО $\sim 15-21$ А).

При режимах ориентации СБ, когда Солнце под разными углами освещает тыльную поверхность СБ: СИО между моделями С, В, А до 15% ; СИО модели Д от моделей С, В, А $\sim -10-40\%$; СИО от ТМИ модели С $\sim \pm 5\%$ (СКО ~ 6 А), моделей В, А $\sim \pm 20\%$

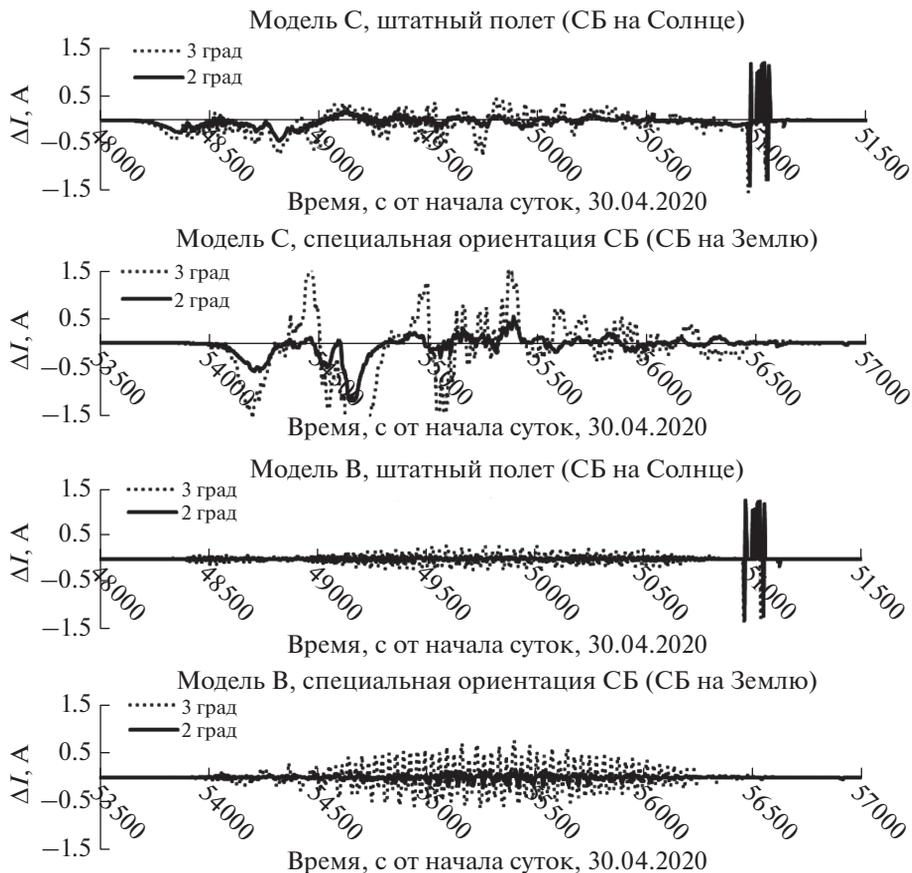


Рис. 5. Зависимость точности расчета тока СБ от шага разбиения поверхности Земли.

(СКО ~ 9–22 А), модели D ~ –12–35% (СКО ~ 22–44 А) (высокий процент СЮ объясняется в т.ч. пониженными значениями тока СБ).

Анализ точности моделей С, В в зависимости от шага разбиения поверхности Земли на ячейки показал, что в штатном полете достаточная точность (СКО ≤ 0.1 А, Max |ΔI| ≤ 0.5 А) достигается при шаге ≤ 3° для модели В и ≤ 2° для модели С. При отворотах СБ от Солнца указанная точность достигается с шагом ≤ 2° для модели В, для модели С необходимо использовать шаг 1°. В табл. 4 и на рис. 5 представлены данные

Таблица 4. Зависимость точности моделей С, В от шага разбиения поверхности Земли

| Шаг, град | Штатный полет | | | | Специальная ориентация СБ | | | |
|-----------|---------------|---------|----------|---------|---------------------------|---------|----------|---------|
| | Модель В | | Модель С | | Модель В | | Модель С | |
| | СКО | Max ΔI | СКО | Max ΔI | СКО | Max ΔI | СКО | Max ΔI |
| 2 | 0.03 А | 0.09 А | 0.09 А | 0.43 А | 0.04 А | 0.21 А | 0.22 А | 1.20 А |
| 3 | 0.10 А | 0.31 А | 0.22 А | 1.46 А | 0.22 А | 0.74 А | 0.72 А | 3.80 А |
| 4 | 0.30 А | 1.38 А | 0.50 А | 3.01 А | 0.69 А | 3.00 А | 1.23 А | 5.55 А |
| 5 | 0.77 А | 3.27 А | 0.94 А | 4.63 А | 2.04 А | 8.19 А | 2.08 А | 7.94 А |

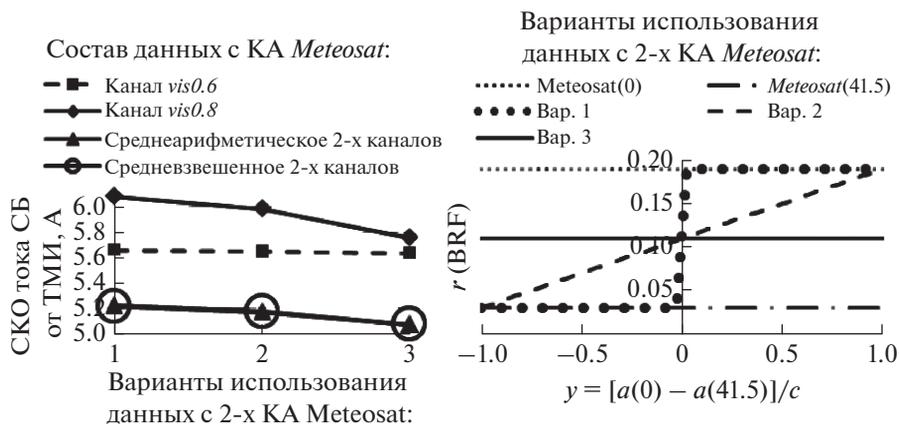


Рис. 6. Зависимость точности модели С от состава данных и вариантов совместного использования данных с 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.): $a(0/41.5)$ – углы между радиус-векторами МКС и КА *Meteosat*; c – угол между радиус-векторами КА *Meteosat*.

точности моделей С, В в зависимости от шага разбиения поверхности Земли на ячейки (в сравнении с использованием шага 1°).

Отметим, что максимумы $|\Delta I|$ получены без учета всплесков $|\Delta I|$ до 1 А, наблюдаемых при штатной ориентации СБ в конце светового участка (время ≈ 51000 сек на рис. 5), когда нормаль к рабочей поверхности СБ направлена на узкую освещенную Солнцем полосу видимого с МКС горизонта Земли (яркость данной полосы существенно изменяется при изменении размера ячеек).

Анализ точности модели С в зависимости от состава данных с КА *Meteosat* (канал *vis0.6*, канал *vis0.8*, среднеарифметическое двух каналов, средневзвешенное двух каналов) и варианта совместного использования данных с 2-х КА *Meteosat* в точках стояния 0° и 41.5° в.д. (рассмотрены варианты совместного использования данных, в которых вклад каждого КА *Meteosat* в результат определяется соотношением углов между радиус-векторами МКС и КА *Meteosat*, на рис. 6 дана графическая иллюстрация вариантов: вар. 1 – близнее значение, вар. 2 – пропорциональное изменение, вар. 3 – среднеарифметическое значение) показал, что наименьшее СКО расчетного тока СБ от данных ТМИ дает использование средних данных каналов *vis0.6* и *vis0.8* и средних данных с 2-х КА *Meteosat*.

Анализ точности модели С в зависимости от количества используемых снимков с КА *Meteosat* показал, что достаточная точность (СКО ≈ 0.1 А, $\max|\Delta I| \approx 0.5$ А) достигается при использовании 3 снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* на световой части витка с интервалом между крайними снимками 45 мин.

В табл. 5 показана зависимость точности модели С от количества используемых снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* в сравнении с максимальным количеством снимков, формируемых каждые 15 мин (приведены СКО и максимальная разность $\max|\Delta I|$ сравниваемых токов).

На рис. 7а представлены графики разности ΔI сравниваемых токов для двух вариантов выборок по 1, 2 и 3 снимкам с каждого КА *Meteosat* на световой части витка. На рис. 7б приведены графики получаемых текущих максимумов модулей разности токов $|\Delta I|$ для 1, 2, 3 снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* на световой части витка.

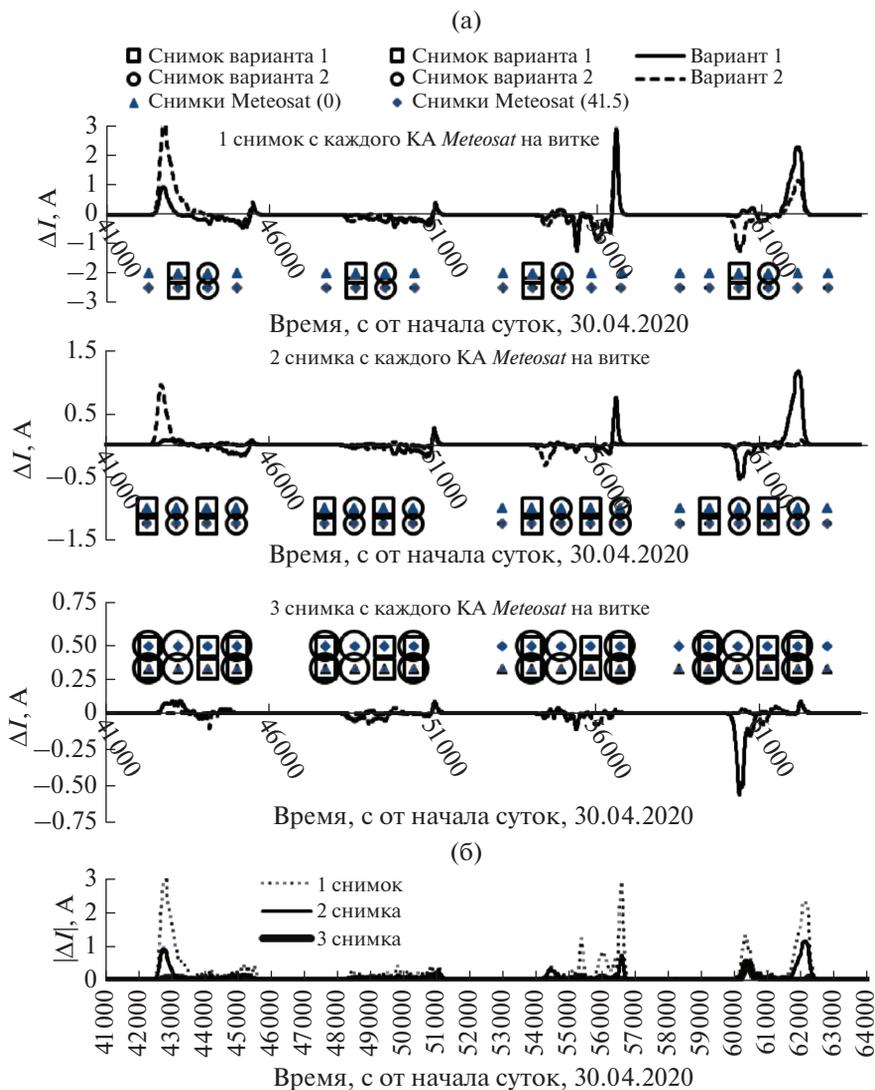


Рис. 7. Зависимость точности расчета тока СБ по модели С от количества используемых снимков на световой части витка с каждого из 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.): (а) графики разности ΔI сравниваемых токов для двух вариантов выборок по 1, 2 и 3 снимкам с каждого КА *Meteosat* (снимки 1-го и 2-го вариантов выборок обозначены соответственно квадратами и кругами); (б) графики текущих максимумов модулей разности токов $|\Delta I|$ для 1, 2, 3 снимков с каждого КА *Meteosat*.

Таблица 5. Зависимость точности расчета тока СБ по модели С от количества используемых снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.)

| Кол-во снимков | СКО, А | $\max \Delta I $, А |
|---------------------------------------|-----------|----------------------|
| 1 снимок в середине светового участка | 0.13–0.87 | 0.42–3.03 |
| 2 снимка с интервалом 30–45 мин | 0.03–0.35 | 0.08–1.17 |
| 3 снимка на интервале 45 мин | 0.02–0.13 | 0.08–0.55 |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в результате реализации эксперимента разработана методология учета альbedo Земли при анализе результатов проведения сеансов оценки эффективности СБ модулей РС МКС и при прогнозировании прихода электроэнергии от СБ РС МКС, разработаны рекомендации по режимам управления СЭП РС МКС с учетом возможностей генерации электроэнергии под воздействием уходящего от Земли излучения. По результатам анализа полученных данных и выполненной апробации предложенных расчетных схем получены обоснованные значения сформулированного параметра оценки эффективности СБ, при этом наряду с получением оценки суммарной эффективности СБ СМ представленная методика обеспечивает получение оценок эффективности отдельно для каждой СБ. Использование сформулированного параметра оценки эффективности СБ позволит в дальнейшем осуществлять максимально точный контроль эффективности СБ модулей РС МКС.

Предложенные расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии позволяют выполнять как высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения (такой прогноз востребован, когда необходимо точно понимать, на какую дополнительную генерацию тока СБ можно рассчитывать при выполнении критических по энергопотреблению полетных операций), так и прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета РС МКС. Описанная методология применима для СБ КА на околоземной или окололунной орбите. Отметим, что при решении задач управления энергобалансом АС МКС альbedo Земли не учитывается, что обосновывается, по-видимому, наличием конструктивного запаса суммарной производительности СБ АС МКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рулев Д.Н., Черемисин М.В., Новиченков К.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Учет уходящего от Земли излучения при моделировании энергобаланса РС МКС в КЭ "Альbedo" // Международная научно-практическая конференция "Научные исследования и эксперименты на МКС", 9–11 апреля 2015, Москва, ИКИ РАН, с. 218–219.
2. Рулев Д.Н., Стажков В.М., Корнеев А.П., Пантелеймонов В.Н. Программный комплекс моделирования электроприхода российского сегмента Международной космической станции // Труды XXXVII Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (Калуга, 17–19 сентября 2002 г.). Секция "Проблемы ракетной и космической техники". – Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина. 2003. с. 71–75.
3. Стажков В.М., Брюханов Н.А., Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Мельник И.В. Использование математического моделирования при оценке энергобаланса на российском сегменте МКС. Сборник статей под редакцией Н.А. Брюханова, М.Ю. Беляева. Ракетно-космическая техника. Сер. XII. Вып. 1, РКК "Энергия" им. С.П. Королева, Королев, 2008, с. 65–74.
4. Зернов А.С., Николаев В.Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2016. № 1(12). С. 29–38.
5. Kopp G., Lean J.L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L01706. 2011. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>
6. Поток энергии Солнца и его изменения, под ред. О. Уайта, пер. с англ. М.: Мир, 1980. 559 с.
7. Kopp G., Lawrence G., Rottman G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Science results, *Sol. Phys.* 2005. V. 230. P. 129–139. <https://doi.org/10.1007/s11207-005-7433-9>
8. EUMETSAT. MSG Level 1.5 Image Data Format Description. EUM/MSG/ICD/105 v7, 4 December 2013. 129 p.
9. EUMETSAT. Conversion from radiances to reflectances for SEVIRI warm channels. EUM/MET/TEN/12/0332 v4, 25 October 2012. 8 p.
10. Stephens G.L., O'Brien D., Webster P.J. et al. The albedo of Earth // *Reviews of Geophysics*. 2015. V. 53. № 1. P. 141–163. <https://doi.org/10.1002/2014RG000449>
11. Гилл Ф., Мюррей У., Райм М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.

12. Патент 2706643 РФ, МПК В64G 1/44 (2006.01). Способ контроля производительности солнечной батареи космического аппарата с инерционными исполнительными органами / *Д.Н. Рулев, А.И. Спириин*; заявитель и патентообладатель ПАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва” № 2016134118; заявл. 19.08.2016; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32. 16 с.
13. Патент 2662372 РФ, МПК В64G 1/44. Способ контроля системы энергоснабжения солнечными батареями космического аппарата / *А.И. Спириин, Д.Н. Рулев, Н.Д. Рулев*; заявитель и патентообладатель ПАО “РКК “Энергия” им. С.П. Королёва” № 2017119306; заявл. 01.06.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 21. 11 с.
14. *Спириин А.И.* Анализ полетных данных как основа для принятия операционных решений по эксплуатации долговременных орбитальных станций // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 139–151.

Accounting Coming from the Earth Radiation in the Model of Power Supply System of the Russian Segment of the International Space Station

D. N. Rulev*

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia), Moscow, Russia

**e-mail: dmitry.rulev@rsce.ru*

The paper describes a method of using characteristics of radiation coming from the Earth in the model of the power supply system of the Russian Segment of the International Space Station (ISS RS) developed as part space experiment “Study of the Earth radiation characteristics and validation of using the ISS RS power supply system model” – code “Albedo” implemented on the ISS RS. Computational patterns for determining the solar array performance characteristics and modeling the electric power input from the solar arrays taking into account the albedo of the Earth, and appropriate guidelines for using the proposed models are provided. On completion of validation obtained are valid values of the formulated control parameter for the solar array performance estimate, which use allows for the utmost accurate performance control for the solar arrays of the ISS RS modules. The computational patterns predicting the electric power input enable to perform both a highly-accurate forecast of the electric power input with accurate modeling of radiation fluxes coming from the Earth, and a forecast of the electric power input without modeling of radiation fluxes coming from the Earth with obtained integral values of electric power input per orbit, which accuracy is sufficient for nominal support of the ISS RS flight.

Keywords: Russian Segment of the International Space Station, solar arrays, electric power input, solar array performance estimate, radiation coming from the Earth, albedo