

DOI: 10.17586/1023-5086-2024-91-09-18-28

УДК 681.78

Модель и алгоритм расчета облученности космического объекта излучением Земли

Павел Александрович Меденников^{1✉}, Николай Ильич Павлов²*Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Сосновый Бор
Ленинградской обл., Россия*¹medennik@rambler.ru <https://orcid.org/0009-0002-3463-2113>²pavlovNI@niiop.ru <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>

Аннотация

Предмет исследования. Модель излучения Земли для расчета спектральной плотности облученности космического объекта, представляемого полигональной моделью, при его траекторном движении над различными участками земной поверхности с учетом влияния солнечной облученности, климатической зоны, сезонного фактора, облачности, высоты орбиты. **Цель работы.** Разработка алгоритма расчета спектральной плотности облученности космических объектов, близкого по своим возможностям к MODTRAN и автоматически подстраивающегося под изменяющиеся условия освещения при их движении в околоземном пространстве. **Метод.** Математическое моделирование излучения Земли, представленной в виде совокупности (суперпозиции) точечных источников – элементарных, послойно расположенных объемных фрагментов атмосферы, опирающихся на фрагмент земной поверхности, с применением инженерных расчетных методик и численных оценок оптических характеристик атмосферы. **Основные результаты.** Итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности элементарной площадки (фасета) космического объекта излучением Земли с программным заданием в базе данных параметров, необходимых для вычислений. Работа итерационного алгоритма проиллюстрирована примером расчета интегральной по спектру энергетической облученности находящегося на высоте 300 км космического объекта (фасета), обусловленной исходящим от Земли излучением. **Практическая значимость.** Представленный итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности космического объекта с базой данных о параметрах земной поверхности, атмосфере, облачном покрове и др. является важным инструментом для моделирования энергетических отражательно-излучательных характеристик космических объектов в околоземном пространстве.

Ключевые слова: моделирование, околоземное пространство, космический объект, фасет, спектральная плотность энергетической облученности, земная поверхность, атмосфера, климатические зоны, база данных

Ссылка для цитирования: Меденников П.А., Павлов Н.И. Модель и алгоритм расчета облученности космического объекта излучением Земли // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 9. С. 18–28. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-18-28>

Код OCIS: 000.3860

A model and algorithm for calculating the irradiation of a space object by Earth radiation

PAVEL A. MEDENNIKOV¹✉, NIKOLAI I. PAVLOV²

Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

¹medennik@rambler.ru <https://orcid.org/0009-0002-3463-2113>

²pavlovNI@nioep.ru <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>

Abstract

Subject of study. A model of the Earth radiation for calculating the spectral irradiation density of a space object presented by a polygonal model as it moves along the trajectory over various parts of the Earth's surface with due regard for the influence of solar illumination, climatic zone, seasonal factor, cloudiness, and orbital altitude. **Aim of study.** Development of an algorithm for calculating the spectral density of irradiation of space objects, close in its capabilities to MODTRAN and automatically adjusts to changing illumination conditions in their movement in near-Earth space. **Method.** Mathematical simulation of the Earth's radiation as a set (superposition) of point sources — elementary, layered volumetric fragments of the atmosphere supported by a fragment of the Earth's surface, using engineering calculation techniques and numerical estimates of optical characteristics of the atmosphere. The contributions of scattered (re-reflected) solar and intrinsic thermal radiation are allowed for in the simulation. **Main results.** An iterative algorithm for calculating the spectral density of irradiation of a surface element (facet) of a space object by the Earth radiation with a programmable retrieval from a database of parameters required for the calculations. The operation of the iterative algorithm is illustrated by an example of calculating the energy irradiance integral over spectrum of a space object (facet) located at an altitude of 300 km, due to radiation from the Earth. **Practical significance.** The presented iterative algorithm for calculating the spectral irradiation density of a space object with a database of parameters of the Earth's surface, atmosphere, cloud cover, etc. presents an important tool for simulating the energy reflective and radiative characteristics of space objects in the near-Earth space.

Keywords: simulation, near-Earth space, space object, facet, spectral density of energy irradiation, Earth's surface, atmosphere, climatic zones, database

For citation: Medennikov P.A., Pavlov N.I. A model and algorithm for calculating the irradiation of a space object by Earth radiation [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2024. V. 91. № 9. P. 18–28. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-09-18-28>

OCIS code: 000.3860

ВВЕДЕНИЕ

Для мониторинга космической обстановки в околоземном пространстве широко используются оптико-электронные системы различного назначения и исполнения. Успешное их применение невозможно без привлечения методов математического моделирования энергетических отражательно-излучательных характеристик объектов наблюдения, включающих орбитальные станции и космические аппараты, в том числе выведенные из эксплуатации, космические телескопы, многочисленный техногенный мусор и др. (см., например [1–6]). Моделирование Солнца как источника подсветки космического объекта (КО) не представляет сложностей, поскольку

его можно рассматривать как бесконечно удаленный точечный источник излучения, по которому имеются точные табличные данные спектральной плотности излучения [7]. К тому же Солнце можно достаточно точно представлять моделью абсолютно черного тела (АЧТ). В работе [4] в интересах разработки и проектирования оптико-электронных приборов и комплексов контроля космического пространства, работающих в видимом диапазоне спектра, выполнено моделирование энергетических отражательных характеристик КО на геостационарной орбите с учетом переотраженного Землей излучения Солнца в условиях чистой (безоблачной) атмосферы. Нахождение КО на низкой орбите

и контроль за ним с применением оптико-электронной аппаратуры, включающей инфракрасные каналы наблюдения, требуют решения более трудной задачи, связанной с моделированием излучения Земли как естественного источника подсветки. В этом случае необходимость моделирования как переотраженного солнечного, так и собственного теплового излучения Земли предполагает применение более сложных алгоритмов и на порядок возросший объем вычислений с использованием моделей типа MODTRAN [8]. В связи с этим разработка физически адекватной модели облученности (подсветки) КО излучением Земли, реализуемой с помощью алгоритмов, которые адаптивно подстраиваются к изменяющимся внешним условиям освещения при движении целевых объектов и не требуют огромного объема вычислений, актуальна при проектировании оптико-электронных приборов и комплексов контроля околоземного пространства, включающих как видимые, так и инфракрасные каналы.

Целью работы является разработка алгоритма расчета спектральной плотности облученности КО, близкого по своим возможностям к MODTRAN и автоматически подстраивающегося под изменяющиеся условия освещения при их движении в околоземном пространстве.

Модель излучения Земли в статье представлена совокупностью (суперпозицией) точечных источников — элементарных фрагментов подстилающей (далее земной) поверхности и послойно расположенных выше в пределах определенного телесного угла объемных фрагментов атмосферы. Параметры указанных фрагментов берутся из базы данных в соответствии с той или иной климатической зоной, количество которых по сравнению с MODTRAN расширено до одиннадцати.

На основе предложенной модели излучения Земли реализован итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности КО. При этом предполагается, что КО представлен полигональной моделью.

Приведен пример расчета энергетической облученности КО (фасета) с высотой орбиты 300 км в зависимости от климатической зоны расположения «подспутниковой» точки и сезона, для светлого и темного времени суток в условиях чистой (безоблачной) атмосферы.

Представленные в настоящей статье модель излучения Земли и итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности являются естественным развитием программно-алгоритмического комплекса имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем различного назначения и исполнения [9].

СПОСОБ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО РАЗБИЕНИЯ УЧАСТКА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, УЧАСТВУЮЩЕГО В ПОДСВЕТКЕ ОБЪЕКТА, НА ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ФРАГМЕНТЫ

Будем рассматривать Землю как протяженный источник рассеянного солнечного и собственного теплового излучения, являющийся совокупностью (суперпозицией) точечных источников — элементарных, послойно расположенных фрагментов атмосферы и фрагментов подстилающей поверхности с постоянными характеристиками. Область земной поверхности, которая участвует в подсветке объекта, находящегося на высоте h , определяется плоским углом β_z (см. рис. 1).

Выражение для угла β_z имеет следующий вид:

$$\beta_z = \arccos\left(\frac{r_E}{h + r_E}\right), \quad (1)$$

где r_E — радиус Земли. Можно увидеть, что угол β_z уменьшается с уменьшением высоты объекта h , соответственно уменьшается участок земной поверхности, участвующий в подсветке объекта.

Элементарный телесный угол Ω_i , опирающийся на элементарный фрагмент земной

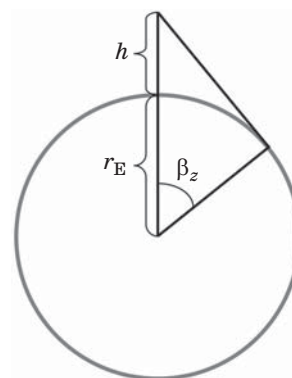


Рис. 1. Геометрия подсветки объекта Землей
Fig. 1. Geometry of an object illumination by Earth

поверхности площадью A_i , участвующий в подсветке объекта, определяется выражением

$$\Omega_i = \frac{A_i \cos(\gamma_i)}{R_i^2}. \quad (2)$$

где γ_i — угол между нормалью к поверхности Земли в центре элементарного фрагмента и направлением на подсвечиваемый объект, R_i — расстояние от центра элементарного фрагмента до подсвечиваемого объекта.

Из выражения (2) видно, что при постоянной площади элементарного фрагмента соответствующий ему телесный угол будет стремительно уменьшаться при возрастании угла γ_i и расстояния R_i в ходе смещения элементарного фрагмента от центра области, участвующей в подсветке, к периферии, которая ограничена углом β_z . Чтобы избежать этого, предлагается следующий способ геометрического разбиения области земной поверхности, создающей подсветку, на элементарные фрагменты. Выделяется центральный фрагмент радиусом r_0 , вокруг которого выделяют кольцевые области с внешней границей, задаваемой радиусом r_i . Каждую из кольцевых областей разбивают на n_{az} одинаковых частей, равных количеству разбиений по азимуту.

Радиус центральной области r_0 и радиус внешней границы i -го кольца r_i определяются формулой

$$r_i = r_E \sin(\beta_i), \quad (3)$$

где $i = 0, 1, 2, \dots, n_z - 1$, n_z — количество разбиений по углу β_z , а для угла β_i , определяющего границы центральной области r_0 и внешней границы i -го кольца, справедливо выражение

$$\beta_i = \beta_z \left(1 - \sqrt{\cos\left(\frac{\pi(i+1)}{2n_z}\right)} \right). \quad (4)$$

Центральная область аппроксимируется кругом площадью A_0 , кольцевые сегменты аппроксимируются боковой поверхностью усеченного конуса с площадью A_i

$$A_0 = \pi r_0^2, \quad A_i = \frac{\pi(r_i + r_{i-1})\sqrt{(r_i - r_{i-1})^2 + (h_i - h_{i-1})^2}}{n_{az}}, \quad (5)$$

где h_i — высота i -го кольцевого сегмента, задаваемая формулой

$$h_i = r_E \cos(\beta_i). \quad (6)$$

Если можно пренебречь сферичностью Земли, то выражение (5) упрощается, принимая вид

$$A_i = \frac{\pi(r_i + r_{i-1})(r_i - r_{i-1})}{n_{az}}. \quad (7)$$

РАЗБИЕНИЕ НА КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЗОНЫ. ОПТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АТМОСФЕРЫ

Модель излучения Земли включает подстилающую (земную) поверхность и атмосферу. При рассмотрении отражательно-излучательных характеристик земной поверхности в силу их зависимости от географических координат необходимо учитывать климатические особенности, связанные с широтными и сезонными изменениями. Расчет оптических характеристик атмосферы требует корректных значений высотных профилей давления, температуры, содержания газовых компонент и аэрозоля. В целом, атмосфера является средой, ослабляющей проходящее сквозь нее излучение, и в то же время источником собственного теплового излучения и рассеянного солнечного излучения, уходящих в околоземное космическое пространство и участвующих в подсветке объекта при его траекторном движении. Ввиду наличия сильной зависимости отражательно-излучательных характеристик от географических координат земной поверхности и высотного профиля атмосферы в предлагаемой модели используются деление земной поверхности на климатические зоны и деление атмосферы на высотные слои, внутри которых она может считаться однородной.

Предлагаемое ниже разбиение на климатические зоны основано на моделях Мак-Клатчи [10] и ГИПО [11] и содержит следующие 11 климатических моделей (зон): морская умеренная, морская тропическая, арктическая (антарктическая в южном полушарии), субарктическая, умеренная, умеренно теплая, субтропическая сухая, субтропическая влажная, тропическая сухая, тропическая влажная, горная. Заложена в базу данных карта климатических зон, построенная на основании статистической обработки карт

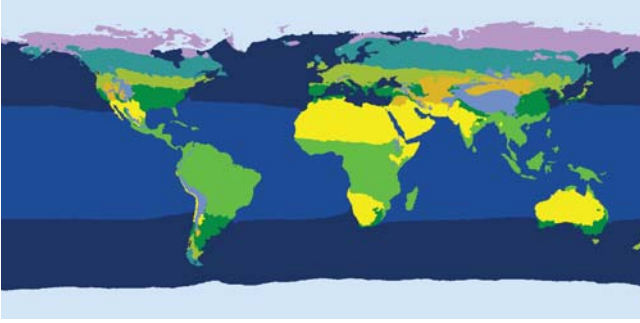


Рис. 2. Карта климатических зон

Fig. 2. Climatic zones map

температур, снежного покрова и вегетационных индексов, представлена на рис. 2. Для каждой климатической модели определен высотный профиль давления, температуры, высотный профиль содержания газов H_2O , O_3 и молекулярного континуума паров воды. Кроме того, указываются параметры соответствующего аэрозоля.

Общими для всех моделей являются высотные профили молекулярного рассеяния, высотный профиль следующих газовых компонент, содержание которых близко к постоянному: CO_2 , CO , CH_4 , N_2O , N_2 .

Суммарное пропускание атмосферы τ на длине волны λ на трассе в n -ом слое атмосферы определяется суммой различных компонент

$$\begin{aligned} \tau_n(\lambda) &= \exp(-\mu(\lambda, n)), \\ \mu(\lambda, n) &= \mu_{mA}(\lambda, n) + \mu_{mS}(\lambda, n) + \\ &+ \mu_{aA}(\lambda, n) + \mu_{aS}(\lambda, n) = \\ &= \sum_i \mu_i(\lambda, n) + \mu_{mS}(\lambda, n) + \\ &+ \mu_{aA}(\lambda, n) + \mu_{aS}(\lambda, n), \end{aligned} \quad (8)$$

где μ_{mA} — показатель (оптическая толщина) молекулярного поглощения, который складывается из показателей поглощения μ_i газовых составляющих атмосферы, включая показатель поглощения молекулярного континуума, μ_{mS} — показатель молекулярного рассеяния, μ_{aS} — показатель аэрозольного рассеяния, μ_{aA} — показатель аэрозольного поглощения.

Показатель молекулярного рассеяния μ_{mS} (оптическая толщина, обусловленная рассеяни-

ем на молекулах атмосферных газов) рассчитывается с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} \mu_{mS}(\lambda, n) &= \mu_{mol}(\lambda) \mu_{0,55}(n) l_n = \\ &= \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^4 \mu_{m0,55}(n) l_n, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\mu_{m0,55}$ — высотный профиль объемного коэффициента молекулярного рассеяния на $\lambda = 0,55$ мкм (хранится в файле базы данных), l_n — длина трассы, проходящей сквозь n -й слой.

Расчет показателя молекулярного поглощения μ_{mA} выполняется по методике, разработанной специалистами ГОИ им. С.И. Вавилова [12], и усовершенствованной специалистами ГИПО [11]. Показатели поглощения основных газовых компонент в данной методике рассчитываются по следующей эмпирической формуле:

$$\mu_i(\lambda, n) = (W_i(n))^{m_i(\lambda)} l_n B_i(\lambda) P^{n_i(\lambda)}, \quad (10)$$

где W_i — эффективное количество i -го газа на единицу пути в n -ом атмосферном слое, которое определяется высотным профилем концентраций поглощающих газов, представленных в файлах базы данных в размерности $PPMV^1$, B_i , m_i , n_i — обобщенные эмпирические спектральные параметры, хранящиеся в файлах базы данных, P — эффективное давление, в качестве которого на практике можно принять атмосферное давление n -го высотного слоя [11].

Отметим, что используемые в выражении (10) показатели (эффективное количество поглощающих атмосферных газов H_2O и O_3 , а также давление и температура) являются параметрами климатической зоны, в которую проецируется текущая точка траектории движения объекта.

Для расчета ослабления, обусловленного поглощением и рассеянием на аэрозольных частицах, чаще всего применяют теорию Ми [13]. В большинстве приложений точность таких расчетов намного превышает достоверность сведений о состоянии аэрозоля применительно к месту и к моменту расчетов. Учитывая сказанное выше, а также трудоемкость оценок показателя ослабления по теории Ми, в разработанном нами алгорит-

¹Parts per million by volume.

ме используется более простая инженерная методика [14, 15]. Как и в случае молекулярного рассеяния используется разделение показателя аэрозольного ослабления в n -м высотном слое атмосферы на длине волны λ на две независимые друг от друга составляющие, одна из которых определяется длиной волны излучения (спектральная зависимость показателя аэрозольного ослабления), а другая — высотой (высотный профиль показателя аэрозольного ослабления на базовой длине волны). Показатель аэрозольного ослабления (оптическая толща, обусловленная рассеянием и поглощением на частицах аэрозоля) рассчитывается по следующей формуле:

$$\mu_{ae}(\lambda, n) = (\mu_{aS}(\lambda) + \mu_{aA}(\lambda)) \mu_{a0,55}(n) l_n, \quad (11)$$

где μ_{aS} — спектральная зависимость показателя аэрозольного рассеяния, μ_{aA} — спектральная зависимость показателя аэрозольного поглощения, $\mu_{a0,55}$ — высотный профиль показателя аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм, l_n — длина трассы, проходящей сквозь n -й слой атмосферы.

Спектральные зависимости показателя аэрозольного рассеяния и поглощения различных типов аэрозоля взяты из работы [16] и заложены в файлы базы данных.

Для задания высотного профиля находится высота пограничного слоя h_b , которая зависит от приземной температуры T_0 . Для сути значение h_b рассчитывается по формуле (12) [14], а для водных поверхностей — по формуле (13) [11].

$$h_b = \begin{cases} 1, & \text{если } T_0 \leq 278 \\ 0,1(T_0 - 273) + 0,5, & \text{если } 278 < T_0 < 303; \\ 3,5, & \text{если } T_0 \geq 303 \end{cases} \quad (12)$$

$$h_b = 0,000335 \exp(0,0285 T_0). \quad (13)$$

Для задания высотного профиля показателя аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм используется следующее выражение [14]:

$$\mu_{a0,55}(n) = \begin{cases} \mu_{a0} \exp\left(-\frac{h_n}{7,5}\right), & \text{если } h_n \leq h_b \\ 0,0326 \exp\left(-\frac{h_n}{5}\right), & \text{если } h_b < h_n < h_t \end{cases}, \quad (14)$$

где n , h_n — индекс и высота атмосферного слоя соответственно, h_t — высота тропопаузы.

Значение показателя ослабления μ_{a0} для длины волны 0,55 мкм на уровне моря определяется моделью аэрозоля и рассчитывается по формуле [11]

$$\mu_{a0} = a + \frac{b}{c - f^s}, \quad (15)$$

где f — относительная влажность (параметр климатической зоны), a , b , c , s — эмпирические параметры аэрозоля.

Для стратосферы и верхней атмосферы высотный профиль $\mu_{a0,55}(n)$ взят из работы [16] и включен в файл базы данных.

Выражения (8)–(15) позволяют рассчитать пропускание заданной атмосферной трассы. Помимо влияния на пропускание атмосфера является источником собственного теплового излучения и рассеянного солнечного излучения.

Для расчета индикатрисы молекулярного рассеяния используется формула

$$g_{mol}(\gamma) = \frac{3(1 + \cos^2 \gamma)}{4}, \quad (16)$$

где γ — угол между вектором трассы и направлением распространения излучения.

Для аппроксимации индикатрисы аэрозольного рассеяния используется вариант взвешенной комбинации функции Хеньи–Гринштейна HG [17–18] и функции Рэлея (см. выражение (16))

$$g_{ae}(\gamma) = \alpha HG(\gamma, p) + (1 - \alpha) \frac{3(1 + \cos^2 \gamma)}{4}, \quad (17)$$

$$HG(\gamma, p) = \frac{1 - p^2}{(1 - 2p \cos \gamma + p^2)^{1,5}}. \quad (18)$$

Параметр p в формуле Хеньи–Гринштейна определяет степень вытянутости индикатрисы. Параметр α определяет вес каждого из слагаемых комбинации.

ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ ОБЛУЧЕННОСТИ ОБЪЕКТА ИЗЛУЧЕНИЕМ ЗЕМЛИ

Спектральная плотность энергетической яркости в текущей точке траектории полета, формируемая солнечным излучением, рассеянным i -м объемным фрагментом земной

атмосферы, L_{AS}^i , определяется следующим итерационным выражением, рассчитываемым для каждого очередного атмосферного слоя от начала до конца трассы:

$$\begin{aligned} L_{ASn}^i(\lambda) = \\ = L_{ASn-1}^i(\lambda)\tau_n(\lambda) + \frac{E_{0S}(\lambda)}{\Omega_i}\tau_{nS}(\lambda)\cos(\gamma) \times \\ \times (g_{\text{mol}}(\gamma)\mu_{\text{mS}}(\lambda, n) + g_{\text{ae}}(\gamma)\mu_{\text{aS}}(\lambda, n)), \end{aligned} \quad (19)$$

где n — номер слоя атмосферной трассы, τ_n — коэффициент пропускания n -го слоя, E_{0S} — спектральная плотность облученности на верхней границе атмосферы Земли, Ω_i — телесный угол, в котором послойно рассчитывается рассеянное излучение Солнца, исходящее от i -го объемного фрагмента земной атмосферы в текущую точку траектории полета объекта, τ_{nS} — коэффициент пропускания на трассе от центра n -го слоя до верхней границы атмосферы, g_{mol} — индикатриса молекулярного рассеяния, рассчитываемая по формуле (16), g_{ae} — индикатриса аэрозольного рассеяния, μ_{mS} — спектральный коэффициент молекулярного рассеяния, μ_{aS} — спектральный коэффициент аэрозольного рассеяния, γ — угол между вектором трассы и направлением распространения излучения.

В формуле (19) «нулевому» слою соответствует спектральная плотность энергетической яркости i -ой элементарной площадки (фрагмента) земной поверхности, на которую опирается телесный угол Ω_i , обусловленная отраженным солнечным излучением и рассчитываемая в приближении диффузной модели отражения согласно формуле

$$L_{AS0}^i(\lambda) = \frac{E_{0S}(\lambda)\tau_{0S}(\lambda)\cos(\theta) + E_{AS\text{ad}}(\lambda)}{\pi}\beta_i(\lambda), \quad (20)$$

где τ_{0S} — коэффициент пропускания на трассе от центра площадки к Солнцу до верхней границы атмосферы, θ — угол между нормалью к площадке и направлением на Солнце, $E_{AS\text{ad}}$ — спектральная плотность энергетической освещенности земной поверхности многократно рассеянным в атмосфере солнечным излучением.

Присутствующий в формуле (20) спектральный коэффициент яркости β_i i -го фрагмента земной поверхности складывается из

трех составляющих, зависящих от снежного покрова, уровня вегетации и типа поверхности (ландшафта)

$$\begin{aligned} \beta_i(\lambda) = k_{\text{SB}i}\beta_{\text{SB}}(\lambda) + k_{\text{V}i}\beta_{\text{V}}(\lambda) + \\ + (1 - k_{\text{SB}i} - k_{\text{V}i})\beta_{\text{LC}}(\lambda). \end{aligned} \quad (21)$$

В формуле (21) использованы следующие обозначения: β_{SB} — спектральный коэффициент яркости снежного покрова, β_{V} — спектральный коэффициент яркости растительности, β_{LC} — спектральный коэффициент яркости, который соответствует типу поверхности (ландшафта) в отсутствии растительности и снега, $k_{\text{SB}i}$ — коэффициент снежного покрова, определяющий долю заполнения i -го фрагмента снегом, $k_{\text{V}i}$ — коэффициент вегетации, определяющий долю заполнения i -го фрагмента растительностью.

Расчет спектральной плотности энергетической освещенности земной поверхности многократно рассеянным в атмосфере солнечным излучением $E_{AS\text{ad}}$ выполняется согласно аналогичной выражению (19) итерационной процедуре, но сверху вниз, с заменой Ω_i на π , индикатрис g_{mol} и g_{ae} на соответствующие коэффициенты молекулярного k_{mol} и аэрозольного k_{ae} рассеяния. Коэффициенты k_{mol} и k_{ae} подбираются эмпирически путем соответствия предложенной итерационной процедуры модели, заложенной в MODTRAN [8]

$$\begin{aligned} k_{\text{m ad}}(\gamma) = 0,5(3 + |\cos(\gamma)|), \\ k_{\text{a ad}}(\gamma) = \sqrt{1 - \cos(\gamma)}. \end{aligned} \quad (22)$$

Спектральная плотность энергетической яркости в текущей точке траектории, формируемой собственным тепловым излучением, исходящим от i -го фрагмента земной атмосферы с телесным углом Ω_i , будет определяться следующим итерационным выражением, рассчитываемым для каждого атмосферного слоя от начала до конца трассы:

$$L_{ATn}^i(\lambda) = L_{AT(n-1)}^i(\lambda)\tau_n(\lambda) + \varepsilon_n(\lambda)\frac{M(\lambda, T_n)}{\Omega_i}, \quad (23)$$

где использованы следующие обозначения: ε_n — спектральный коэффициент излучения n -го высотного слоя атмосферы, рассчитываемый по формуле (23), T_n — температура, определяемая номером высотного слоя атмосферы n и климатической моделью (зоной),

M — спектральная плотность энергетической светимости АЧТ, определяемая формулой Планка.

Коэффициент излучения ε_n n -го высотного слоя атмосферы рассчитывается исходя из соответствующих показателей поглощения

$$\varepsilon_n(\lambda) = 1 - \exp(-\mu_{\text{мА}}(\lambda, n) - \mu_{\text{аА}}(\lambda, n)), \quad (24)$$

В формуле (24) «нулевому» слою соответствует спектральная плотность энергетической яркости i -го фрагмента земной поверхности, обусловленная тепловым излучением

$$L_{AT0}^i(\lambda) = \varepsilon_i(\lambda) \frac{M(\lambda, T_{0i})}{\Omega_i}, \quad (25)$$

где ε_i — спектральный коэффициент излучения i -го фрагмента земной поверхности, который складывается из трех составляющих аналогично коэффициенту яркости (см. формулу (21)), T_{0i} — температура i -го фрагмента ландшафта, задаваемая картой температур.

Для учета вклада облачности в излучение Земли предлагается следующий эмпирический подход. В программе MODTRAN для вертикальной трассы от земной поверхности и до верхней границы атмосферы (принята высота 120 км) выполняется расчет энергетической яркости от сплошной облачности различного типа и от некоторой стандартной поверхности (за которую принят снежный покров в связи с близким спектральным ходом альбедо) в отсутствии облачности. При расчете энергетической яркости излучения стандартной поверхности коэффициенты пересчета собственного $k_{T_{\text{снв}}}$ и рассеянного солнечного $k_{S_{\text{снв}}}$ излучений задаются такими, чтобы рассчитанные значения ее энергетической яркости совпадали с аналогичными значениями, рассчитанными по модели MODTRAN для сплошной облачности конкретного типа.

Таким образом, спектральная плотность энергетической яркости атмосферы в околоземном пространстве, обусловленная рассеянным солнечным излучением при условии наличия облачности L_{AS}^i , Вт м⁻² мкм⁻¹ ср⁻¹, для конечного слоя атмосферной трассы будет определяться выражением

$$L_{AS}^i(\lambda) = (1 - k_{\text{cl}})L_{ASn}^i(\lambda) + k_{\text{cl}}k_{S_{\text{снв}}}L_{ASn}^{i, \text{std}}(\lambda), \quad (26)$$

где n — номер конечного слоя атмосферной трассы, L_{ASn}^i — рассчитанная по формуле (19) спектральная плотность энергетической яр-

кости атмосферы последнего слоя атмосферы с характеристиками подспутникового фрагмента земной поверхности в соответствии с климатической моделью, $L_{ASn}^{i, \text{std}}$ — рассчитанная по формуле (19) спектральная плотность энергетической яркости атмосферы с «нулевым» слоем, энергетические характеристики которого соответствуют стандартной поверхности (снег), k_{cl} — коэффициент облачности, который определяет долю заполнения облаками фрагмента земной поверхности, задающего подсветку объекта в околоземном пространстве.

Аналогичным путем учитывается вклад облаков в тепловое излучение Земли

$$L_{AT}^i(\lambda) = (1 - k_{\text{cl}})L_{ATn}^i(\lambda) + k_{\text{cl}}k_{T_{\text{снв}}}L_{ATn}^{i, \text{std}}(\lambda). \quad (27)$$

При этом в качестве температуры стандартной поверхности берется температура верхней границы облачности для заданной климатической модели.

В таблице приведены коэффициенты пересчета и верхняя граница для типов облачности, используемых в модели MODTRAN.

Облученность j -ой элементарной площадки объекта $E_{jA}(\lambda)$, обусловленная подсветкой от Земли, определяется суммой облученностей, создаваемых рассеянным солнечным $E_{jAS}(\lambda)$ и собственным тепловым $E_{jAT}(\lambda)$ излучениями

$$E_{jA}(\lambda) = E_{jAS}(\lambda) + E_{jAT}(\lambda),$$

$$E_{jAS}(\lambda) = \sum_i L_{AS}^i(\lambda) \Omega_i \cos(\theta_{ij}),$$

Коэффициенты пересчета и верхняя граница облаков для различных типов облачности

Recalculation coefficients and upper cloud boundary for various cloudiness types

Тип облачности	$k_{T_{\text{снв}}}$	$k_{S_{\text{снв}}}$	h , км
Кучевые (<i>Cumulus</i> , Cu)	1,10	1,73	3,00
Высоко-слоистые (<i>Alto stratus</i> , As)	1,08	1,52	3,00
Слоистые (<i>Stratus</i> , St)	1,15	1,43	1,00
Слоисто-кучевые (<i>Stratus/cumulus</i> , Ssc)	1,14	1,60	2,00
Слоисто-дождевые (<i>Nimbo stratus</i> , Ns)	1,16	1,39	0,66
Перистые (<i>Cirrus</i> , Ci)	1,20	1,03	3,50

$$E_{jAT}(\lambda) = \sum_i L_{AT}^i(\lambda) \Omega_i \cos(\theta_{ij}). \quad (28)$$

Здесь Ω_i — телесный угол, в котором заключен i -ый элементарный объемный фрагмент атмосферы с основанием в виде кольцевого сегмента земной поверхности площадью A_i , рассеивающий солнечное и излучающий тепловое излучение в направлении элементарной площадки, θ_{ij} — угол между нормалью к j -ой элементарной площадке объекта и осью телесного угла, в котором заключен i -ый рассеивающий (излучающий) объемный фрагмент атмосферы, $L_{AS}^i(\lambda)$ и $L_{AT}^i(\lambda)$ — спектральные плотности энергетической яркости.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБЛУЧЕННОСТИ ФАСЕТА

Для иллюстрации предложенной модели и итерационного алгоритма рассчитана интегральная по спектру облученность фасета КО с высотой орбиты 300 км исходящим от Земли излучением в зависимости от климатической зоны расположения «подспутниковой» точки, сезона и времени суток в условиях чистой (безоблачной) атмосферы. Площадка фасета

предполагалась ориентированной перпендикулярно направлению в «подспутниковую» точку. Вклад в суммарную облученность фасета излучения всех объемных фрагментов Земли, расположенных в телесном угле 4,77 ср (плоский угол при вершине соответствующего конуса на высоте орбиты 300 км составляет 169°), учитывался согласно карте климатических зон (рис. 2). На рис. 3 представлены рассчитанные зависимости интегральной облученности фасета КО с высотой орбиты 300 км от времени года для светлого (рис. 3а) и темного времени суток (рис. 3б) в «подспутниковой» точке, относящейся к определенной климатической зоне. Рассчитанные зависимости приведены для 11 вариантов расположения «подспутниковой» точки, отвечающих 11 климатическим зонам, представленным на рис. 2: морской (30° в.д., 50° с.ш.), морской тропической (60° з.д., 0° с.ш.), арктической (60° з.д., 80° с.ш.), субарктической (60° з.д., 65° с.ш.), умеренной (30° з.д., 55° с.ш.), умеренной теплой (5° з.д., 47° с.ш.), субтропической сухой (60° в.д., 50° с.ш.), субтропической влажной (110° з.д., 25° с.ш.), тропической сухой (15° з.д., 25° с.ш.), тропической влажной (60° в.д., 10° ю.ш.), горной (90° з.д., 33° с.ш.).

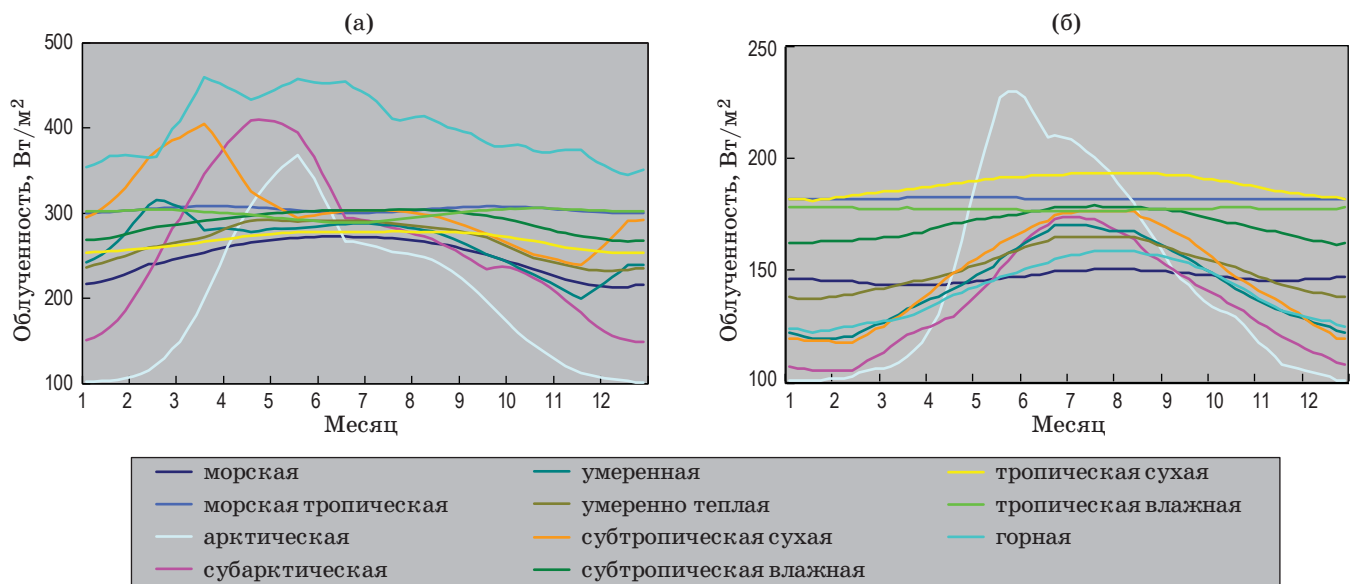


Рис. 3. Изменения интегральной облученности фасета КО с высотой орбиты 300 км в течение года для светлого (а) и темного (б) времени суток в «подспутниковой» точке, относящейся к определенной климатической зоне

Fig. 3. Change in the integral irradiation of the facet of a space object with an orbit altitude of 300 km during a year for (a) light and (b) dark time of day at a «subsattelite» point related to a certain climatic zone

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности Землей модельного КО, представленного отдельным полигоном (фасетом). Алгоритм использует программное задание параметров, требуемых для расчета и извлекаемых из базы данных. Алгоритм учитывает вклад в облученность рассеянного (переотраженного) солнечного и собственного теплового излучения Земли и адаптивно подстраивается к изменениям в условиях освещения, сопоставим по получаемым результатам с алгоритмами типа MODTRAN и при этом не требует огромного объема вычислений.

Новизна алгоритма состоит в способе геометрического разбиения области земной поверхности, создающей подсветку космического объекта, на элементарные фрагменты, в использовании программного задания параметров, требуемых для расчета спектральной плотности энергетической облученности и

извлекаемых из базы данных, а также в сочетании итерационной процедуры расчета облученности с инженерными методиками расчета оптических характеристик атмосферы.

Работа итерационного алгоритма проиллюстрирована примером расчета энергетической облученности фасета КО, находящегося на высоте 300 км, обусловленной исходящим от Земли излучением. Проведенные расчеты показывают: уровень интегральной по спектру энергетической облученности меняется в зависимости от климатической зоны расположения «подспутниковой» точки и сезона в диапазоне от 100 до 430 Вт/м² для светлого времени суток и от 100 до 230 Вт/м² для темного времени суток.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработанный итерационный алгоритм расчета спектральной плотности облученности КО может служить полезным инструментом при моделировании энергетических отражательно-излучательных характеристик КО в околоземном пространстве.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Молотов И.Е., Агапов В.М., Стрельцов А.И. и др. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 7. 17 с. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-7>
2. Богоявленский А.И., Каменев А.А., Полуян М.М. и др. Моделирование спектроэнергетических характеристик космических объектов в оптическом диапазоне // Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 2. С. 200–211.
3. Лемешевский С.В., Чуйко М.М., Шмун А.И. и др. Математическое моделирование тепловых режимов космических аппаратов негерметичного исполнения // Информатика. 2019. Т. 16. № 4. С. 25–39.
4. Олейников М.И., Осипова В.И., Хатанзейская М.А. Моделирование отражательных характеристик космических объектов с учетом переотраженного Землей излучения Солнца // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 3. С. 313–320. <http://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-313-320>
5. Знаменский И.В., Тунгущпаев А.Т. О возможности обнаружения космических объектов в спектральном диапазоне 8–12 мкм // Фотоника. 2022. Т. 16. № 1. С. 44–58. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.1.44.58>
6. Дзитолев А.М., Лаповок Е.В., Пенсков М.М. и др. Расчет влияния излучения Земли и Солнца на работу радиационных панелей космического телескопа // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 10. С. 48–55.
7. Standard: Solar constant and zero air mass Solar spectral irradiance tables ASTM E490-00a. 2019. 16 p.
8. Berk A., Conforti P., Kennett R., et al. MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code // Proc. SPIE 9088. Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H (June 13, 2014). <https://doi.org/10.1117/12.2050433>

REFERENCES

1. Molotov I.E., Agapov V.M., Streltsov A.I., et al. Problems of optical monitoring of space debris [in Russian] // Preprints of Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS. 2020. № 7. 17 p. <http://doi.org/10.20948/prepr-2020-7>
2. Bogoyavlenskiy A.I., Kamenev A.A., Poluyan M.M., et al. Modeling of spectroenergetic characteristics of space objects in the optical range // Siberian J. Sci. and Technol. 2018. V. 19. № 2. P. 200–211. <http://doi.org/10.31772/2587-6066-2018-19-2-200-211>
3. Lemeshevsky S.V., Chuiko M.M., Shnip A.I., et al. Mathematical modeling of thermal conditions of non-hermetic spacecrafts [in Russian] // Informatics. 2019. V. 16. № 4. P. 25–39.
4. Oleinykov M.I., Khatanzeiskaya M.A., Osipova I.V. Modeling of the reflective characteristics of space objects taking into account the Earth's rereflected solar radiation [in Russian] // Proc. of the TSU. Technical Sci. 2021. № 3. P. 313–320. <http://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-3-313-320>
5. Znamensky I.V., Tungushpaev A.T. Regarding the possibility of detecting space objects in spectral range of 8–12 μm // Photonics. 2022. V. 16. № 1. P. 44–58. <http://doi.org/10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.1.44.58>
6. Dzitoev A.M., Lapovok E.V., Penkov M.M., et al. Calculation of the effect of earthsine and radiation on radiation-panel performance for space-based telescopes // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 10. P. 688–693. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000688>
7. Standard: Solar constant and zero air mass Solar spectral irradiance tables ASTM E490-00a. 2019. 16 p.
8. Berk A., Conforti P., Kennett R., et al. MODTRAN6: A major upgrade of the MODTRAN radiative transfer code // Proc. SPIE 9088. Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XX, 90880H (June 13, 2014). <https://doi.org/10.1117/12.2050433>

9. Абакумова А.А., Малинова Т.П., Меденников П.А., Павлов Н.И. Программно-алгоритмический комплекс имитационного моделирования для исследования и разработки оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 8. С. 56–64. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-08-56-64>
10. Mc Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. Optical properties of the atmosphere (revised). Report-AFCRL-71-0279. AFCRL, Bedford, 1971. 88 p.
11. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Яцык В.С. Атмосфера и моделирование оптико-электронных систем в динамике внешних условий. Казань: изд. Казанского университета, 2015. 632 с.
12. Киселева М.С., Мирзоева Л.А., Голованов С.Н. и др. Новые методы расчета прозрачности атмосферы с использованием эффективных параметров атмосферы и оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 10. С. 76–82.
13. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами: пер. с англ. М.: изд. «Мир», 1971. 165 с.
14. Филиппов В.Л., Танташев М.В., Вендеревская И.Г. Оптическая модель атмосферы для задач расчета облученности входных зрачков оптико-электронных систем // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 4. С. 3–10.
15. Филиппов В.Л., Вендеревская И.Г. Модельный расчет спектральной прозрачности и яркости атмосферы в динамике погодных условий. Итоги разработки // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 15–21.
16. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Report Int. Ass. for Meteorology and Atm. Physics WCP-112 WMO/TD-NO.24. Boudler, Colorado, USA. 1984. 64p.
17. Галилейский В.П., Гришин А.И., Морозов А.М. Численное моделирование углового распределения яркости рассеянного солнечного излучения в земной атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 11. С. 1005–1007.
18. Лобанова М.А., Васильев А.В., Мельникова И.Н. Зависимость параметра асимметрии индикатрисы рассеяния // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 4. С. 147–157.
9. Abakumova A.A., Malinova T.P., Medennikov P.A., Pavlov N.I. Algorithmic simulation-modeling software complex for the investigation and development of optoelectronic observation systems // J. Opt. Technol. 2019. V. 86. № 8. P. 503–509. <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000503>
10. Mc Clatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A. Optical properties of the atmosphere (revised). Report-AFCRL-71-0279. AFCRL, Bedford, 1971. 88 p.
11. Filippov V.L., Ivanov V.P., Yatsyk V.S. Atmosphere and modeling optoelectronic systems operating in changing external conditions [in Russian]. Kazan: Kazan University Publ., 2015. 632 p.
12. Kiseleva M.S., Mirzoeva L.A., Golovanov S.N., et al. New methods of calculating the transmittance of the atmosphere, using the effective parameters of the atmosphere and optoelectronic systems // J. Opt. Technol. 2006. V. 73. № 10. P. 723–728. <https://doi.org/10.1364/JOT.73.000723>
13. Deirmendjian D. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. N.Y.: American Elsevier Publ. Comp., 1969. 290 p.
14. Filippov V.L., Tantashev M.V., Venderevskaya I.A. Optical model of the atmosphere for problems of calculating the irradiance of the entrance pupils of optoelectronic systems // J. Opt. Technol. 2014. V. 81. № 4. P. 168–173. <https://doi.org/10.1364/JOT.81.000168>
15. Filippov V.L., Venderevskaya I.A. Model calculation of the spectral transmittance and radiance of the atmosphere as the vary with weather conditions: Development results // J. Opt. Technol. 2017. V. 84. № 3. P. 167–172. <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000167>
16. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Report Int. Ass. for Meteorology and Atm. Physics WCP-112 WMO/TD-NO.24. Boudler, Colorado, USA. 1984. 64 p.
17. Galileiskii V.P., Grishin A.I., Morozov A.M. Numerical simulation of angular distribution of the scattered solar radiation brightness in Earth atmosphere [in Russian] // Atmosphere and Ocean Optics. 2013. V. 26. № 11. P. 1005–1007.
18. Lobanova M.A., Vasilyev A.V., Mel'nikova I.N. The phase function asymmetry parameter dependence on scattering media properties [in Russian] // Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2010. V. 7. P. 147–157.

АВТОРЫ

Павел Александрович Меденников — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Соновый Бор Ленинградской обл., Россия; <https://orcid.org/0009-0002-3463-2113>; medennik@rambler.ru

Николай Ильич Павлов — доктор технических наук, заместитель директора по научной работе, Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения, г. Соновый Бор Ленинградской обл., Россия; <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>; pavlovNI@niioep.ru

AUTHORS

Pavel A. Medennikov — PhD(Engineering), Leading Researcher, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia; <https://orcid.org/0009-0002-3463-2113>; medennik@rambler.ru

Nikolai I. Pavlov — Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director in Science, Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-1641-8319>; pavlovNI@niioep.ru

Статья поступила в редакцию 02.02.2024
Одобрена после рецензирования 24.04.2024
Принята к печати 29.07.2024

The article was submitted to the editorial office 02.02.2024
Approved after review 24.04.2024
Accepted for publication 27.07.2024