

XXV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:
Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине
Секция «Физика космических лучей и солнечно-земных связей»

Численная модель яркости ночного неба в оптическом диапазоне

А. А. Аминева,^{1,2*} Д. А. Подгрудков^{1,2†}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики космоса
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

²Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 07.04.2025; подписана в печать 14.04.2025)

При проведении любого наземного оптического эксперимента всегда необходимо работать с фоном, который присутствует в сигнале наряду с интересующими событиями. В работе с данными таких экспериментов очень полезна модель фона ночного неба. В настоящий момент в этой области существуют полнокупольные модели или модели в узком диапазоне длин волн. Основным недостатком заключается в том, что в таких работах представлен полный поток, поэтому получить спектр для отдельно взятого участка неба не представляется возможным. В статье представлены первые этапы реализации модели яркости ночного неба в оптическом диапазоне. Модель небесной сферы строится по квадратам размером $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, что позволяет вычислить спектр и поток для любой заданной области.

PACS: 92.60.hw, 42.68.-w

УДК: 520

Ключевые слова: собственное свечение атмосферы, фон ночного неба, зодиакальный свет.

ВВЕДЕНИЕ

Модели фона ночного неба, существующие на сегодняшний день, являются полнокупольными или созданы для работы в узком диапазоне длин волн. Такие модели не подойдут для оптических экспериментов, в частности, для черенковских детекторов. Здесь нужна модель, применимая в оптическом диапазоне и дающая спектр и поток от отдельных участков небесной сферы.

В рассмотрении в рамках задачи входят следующие компоненты фона: зодиакальный свет, собственное свечение атмосферы, звездные каталоги, планеты Солнечной системы и антропогенная засветка. Кроме того, для корректной работы с моделью необходимы вспомогательные инструменты: работа с системами координат, полосами пропускания и атмосферными эффектами. Готовая модель будет представлена в виде пакета на языке Python.

В настоящей работе представлены первые шаги реализации модели — учет и реализация в виде программного пакета собственного свечения атмосферы и зодиакального света, которые дают наибольший вклад в фоновую засветку.

1. ЗОДИАКАЛЬНЫЙ СВЕТ

Первая компонента — зодиакальный свет — получила свое название из-за видимости в области зодиакальных созвездий. Представляет собой белый светящийся конус, который виден на западе через несколько часов после захода Солнца или на востоке до рассвета. Этот вклад обусловлен рассеянием солнечного света на линзообразном облаке, состоящем из частиц межпланетной пыли и вытянутом вдоль плоскости эклиптики [1]. Соответственно, в рамках работы спектр зодиакального света полагается солнечным, хотя до сих пор неизвестно, где именно расположены рассеивающие объекты [2].

А. Воспроизведение модели яркости зодиакального света

Для учета зодиакального света была воспроизведена и использована модель, предложенная в рамках работы с данными прибора Solar Mass Ejection Imager (SMEI) [3]. Прибор был направлен на наблюдения за потоком корональных выбросов массы (КВМ) и других гелиосферных структур.

Для обнаружения КВМ в данных авторами были разработаны алгоритмы удаления инструментальных артефактов, в том числе зодиакального света, поверхностная яркость которого примерно в 100 раз больше, чем у КВМ. Была предложена эмпирическая на основе данных SMEI модель яркости зодиакального све-

* amineva.aa19@physics.msu.ru

† d.a.podgrudkov@physics.msu.ru

та. Она строится в эклиптической системе координат. В модели не уделяется внимание фактическому распределению межпланетной пыли или учету рассеивающих свойств этой пыли; выбор функций, констант и системы координат основан на наилучшем соответствии данным SMEI. Модель применима начиная с 18° по эклиптической долготе и широте, если отсчитывать от положения Солнца. Результаты моделирования выражаются в единицах SMEI ADU, все углы представлены в градусах.

Переменные, необходимые для описания модели:

- λ — эклиптическая долгота;
- β — эклиптическая широта;
- λ_{Sun} — солнечная эклиптическая долгота;
- $\tilde{\lambda} = (\lambda - \lambda_{Sun} - 180)$ — антисолнечная эклиптическая долгота;
- $c = \cos(\varepsilon) = \cos(\lambda - \lambda_{Sun}) \cos(\beta)$ — выражение, через которое определяется элонгация ε ;
- $\tilde{\varepsilon} = 180 - \varepsilon$ — антисолнечная элонгация;

- $\text{tg}(\gamma) = \sin(\lambda - \lambda_{Sun}) / \text{tg}(\beta)$ — выражение, через которое определяется позиционный угол γ , увеличивающийся против часовой стрелки от эклиптического севера.

В плоскости эклиптики использование модуля широты $|\beta|$ приведет к возникновению разрыва первой производной в плоскости эклиптики (при $\beta = 0$). Поэтому $|\beta|$ заменяется на $b = 1.5 \times (\sqrt{1 + (\beta/1.5)^2} - 1)$. Некоторые элементы модели применимы только к определенной части неба. Для их учета используется ступенчатая функция Хевисайда $u(x)$:

$$\begin{cases} u(x) = 1, & x > 0 \\ u(x) = 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

Зависимость от гелиоцентрического расстояния (расстояние между Солнцем и Землей) R нормализована до $R_0 = 1$ а.е.

На основе приведенных выше определений и формул, модель зодиакального света описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} (R_0/R)^{-2.3} Z = & 7 + 8(1 - \cos(b)) + 6e^{-\beta^2/512} + \\ & + \{u(90 - \varepsilon)\{65 + 120c - 185c^2 + 65c^3\} \sin^{-2.3}(\varepsilon) + \\ & + u(\varepsilon - 90)\{65 + 120c + 154c^2 + 88c^3\}\} \times 10^{-\{\frac{\sin(b)}{0.09(\varepsilon+40)}\}} + \\ & + u(90 - \varepsilon)\{30(\sin^{-2.3}(\varepsilon) - 1) \cos(b)\} + \\ & + \{8800e^{\{1 - \sqrt{1 + ((|\gamma| - 90)/3)^2}\}/10} - 1200\} \times e^{-\varepsilon/10} + \\ & + S(\lambda_{Sun}, \Omega, \varepsilon) + D(\lambda - \lambda_{Sun}, \beta) + E + F(\lambda_{Sun}) + G(\beta, \tilde{\lambda}) \end{aligned} \quad (2)$$

Первыми слагаемыми в формуле 2 задается моделирование основного вклада в зодиакальный свет. Добавочные компоненты описаны ниже.

Компонента $S(\lambda_{Sun}, \Omega, \varepsilon)$ учитывает наклон плоскости симметрии зодиакальной пыли относительно плоскости эклиптики. Формула для него имеет вид:

$$\begin{aligned} S(\lambda_{Sun}, \Omega, \varepsilon) = & 6|\sin(\lambda_{Sun} - \Omega)| + \\ & + [u(90 - \varepsilon) \sin^{-2.3}(\varepsilon) + u(\varepsilon - 90) \sin(\varepsilon)] + \\ & + [1 - u(\Omega - \lambda_{Sun})/4 + 2u(90 - \varepsilon)c] + \\ & + \max(0, \min(\{u(\Omega - \lambda_{Sun}) - \\ & - u(\lambda_{Sun} - \Omega)\}\beta + 5)/10, 1)) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\max$ означает выбор наибольшего значения из двух, а $\min$ — наименьшего.

Вклад $G(\beta, \tilde{\lambda})$ явно описывает эффект противосияния [4], определяемый следующим образом:

$$\begin{aligned} G(\beta, \tilde{\lambda}) = & (1 - 0.02(\beta\tilde{\lambda}^2)/\varepsilon^3) \times (\beta^2 G_\beta + \tilde{\lambda}^2 G_{\tilde{\lambda}})/\varepsilon^2 \times \\ & \times \{1 - u(\tilde{\varepsilon} - 60) \times (1 - e^{\{(\tilde{\varepsilon} - 60)^2/300\}})\} \end{aligned} \quad (4)$$

G_β и $G_{\tilde{\lambda}}$ задаются так:

$$G_\beta = 7.5e^{-\tilde{\varepsilon}/4} + 39.5e^{-\tilde{\varepsilon}/25}, \quad (5)$$

$$G_{\tilde{\lambda}} = 7.5e^{-\tilde{\varepsilon}/4} + 39.5e^{-\tilde{\varepsilon}/35}. \quad (6)$$

Компоненты, зависящие от ε и b в уравнении 2 хорошо описывают данные SMEI, но это согласие ухудшается в направлении к Солнцу, особенно вдали от эклиптики и полюсов. Компонента $D(\lambda - \lambda_{Sun}, \beta)$ имеет форму гантели и включает в себя остаточное моделирование для эмпирической картины, что улучшает соответствие моделирования и наблюдений.

Для описания вклада $D(\lambda - \lambda_{Sun}, \beta)$ нужно ввести некоторые параметры:

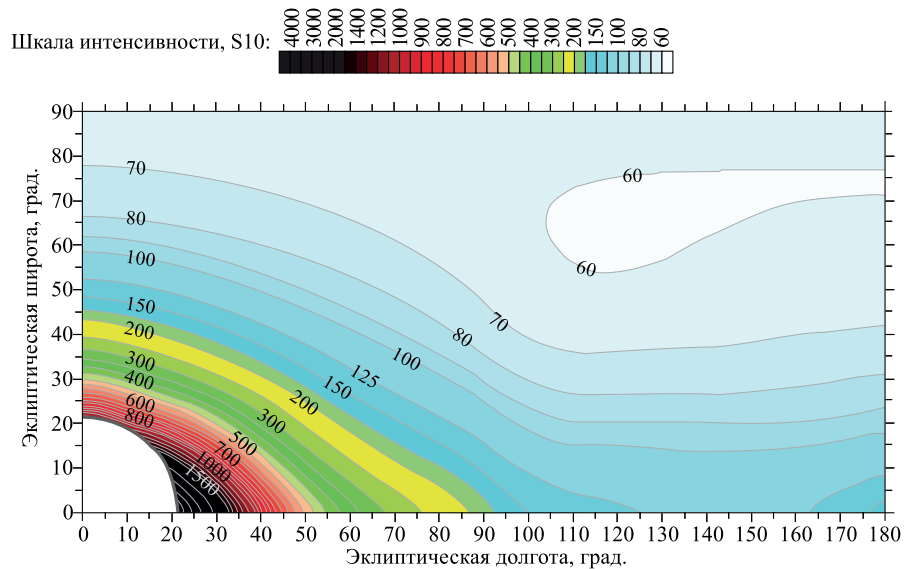


Рис. 1. Результаты моделирования поверхностной яркости зодиакального света в рамках опорной статьи. Область солнца ограничена значением в 20° , шаг взят за 1° .

$$d = (|\lambda - \lambda_{Sun}|/6.5) - |\beta| + 15 + 5 \times u(\beta). \quad (7)$$

Также вводятся долгота λ' , широта β' , элонгация ε' , позиционный угол γ' . Они задаются относительно направления, смещенного на 21° к северу от эклиптики вблизи Солнца ($\lambda = \lambda_{Sun}$, $\beta_0 = +21^\circ$), когда $\beta > 0$, и на 15° к югу ($\lambda = \lambda_{Sun}$, $\beta_0 = -15^\circ$), когда $\beta < 0$.

Далее определяются вспомогательные функции:

$$h = \gamma' \times u(-\beta) + (180 - \gamma') \times u(\beta), \quad (8)$$

$$A = \{1 + 0.5 \times u(-\beta)\} \times u(90 - \varepsilon) \times \{u(75 - \varepsilon) + u(\varepsilon - 75) \times e^{-(\varepsilon - 75)^2/120}\}, \quad (9)$$

$$f(\varepsilon', h) = 60 \times e^{-\varepsilon'/16} \times \{0.15 + 0.85e^{-6 \cos^4(0.6h)}\}, \quad (10)$$

$$g(\lambda', \beta') = 25 \times e^{-[\arccos(\cos(2\lambda') \times \cos(0.7\beta'))]/10}. \quad (11)$$

Тогда компонента $D(\lambda - \lambda_{Sun}, \beta)$ задается следующим выражением:

$$D(\lambda - \lambda_{Sun}, \beta) = A \times \{[f \times e^{-d/10} + g \times e^{-d/8}] \times u(d) \times [f + g] \times u(-d)\}. \quad (12)$$

Остаточные компоненты минимизируются и учитываются в E и $F(\lambda_{Sun})$. Первая компонента — годовая усредненная карта остаточной яркости, охватывает области, которые сложно параметризовать. $F(\lambda_{Sun})$ описывает интерполируемые еженедельные остаточные карты. Эти две компоненты не учтены в рамках настоящей работы.

Данные, которые легли в основу модели, усреднялись за период в год, а также по северной и южной

полусферам. Результат моделирования, проведенного авторами статьи, представлен на рис. 1. Поверхностная яркость зодиакального света выражена в единицах S10. Величина S10 — яркость, эквивалентная потоку света звезды десятой звездной величины в рассматриваемом диапазоне длин волн, распределенному на один градус в квадрате. В основном это относится к звездам категории A0, которые, по существу, имеют одинаковую звездную величину во всех диапазонах длин волн. Одной единице S10 соответствуют 100 фотонов средней энергии в фотометрической полосе пропускания V (visible) от звезды класса A0 [5]. Подробная работа с этими единицами будет рассмотрена ниже.

В ходе воспроизведения модели в рамках данной работы были найдены и исправлены несоответствия между получаемыми нами по приведённой формуле результатами и примером от самих авторов из статьи. Формула 10 после корректировки принимают вид:

$$f(\varepsilon', h) = 60 \times e^{-\varepsilon'/16} \times \{0.85 + 0.15e^{-6 \cos^4(0.6h)}\} \quad (13)$$

Кроме того, для устранения разрыва все выражения вида $u(90 - \varepsilon)$ были заменены на выражения вида $(1 - u(\varepsilon - 90))$.

Картина распределения поверхностной яркости зодиакального света с учетом правок в формулах представлена на рис. 2. Видно небольшое несоответствие с результатами опорной статьи в области больших долгот и широт. Оно связывается с оговоренными ранее опечатками в исходной статье и может быть устранено путем варьирования вклада $G(\beta, \tilde{\lambda})$, что будет сделано на этапе уточнения полной модели.

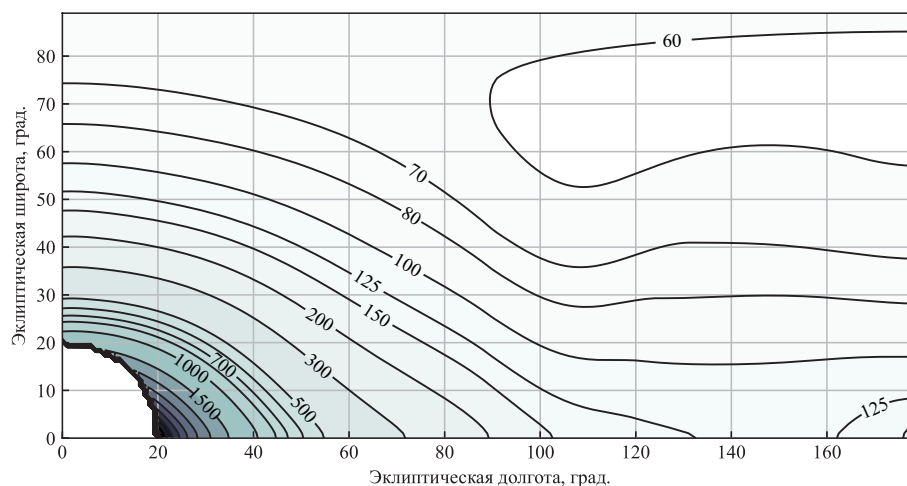


Рис. 2. Результаты моделирования поверхностной яркости зодиакального света в рамках данной работы. Область солнца ограничена значением в 20° , шаг взят за 1° .

В. Переход от единиц S10 к количеству фотонов

В силу того, что зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного света на линзообразном облаке, состоящем из частиц межпланетной пыли, спектр этой компоненты полагается солнечным в фотометрической полосе пропускания V. Солнечный спектр взят из работы [6] и представлен на рис. 3. Фотометрическая полоса пропускания V — область в видимом спектре, введенная Джонсоном и используемая для описания яркости объекта с сохранением информации о спектре [7]. Данные, необходимые для построения зависимости пропускной способности от длины волны для полосы V были взяты из работы [8] и интерполированы кубическими сплайнами для комфортной работы с различными длинами волн. Полученная зависимость представлена на рис. 4.

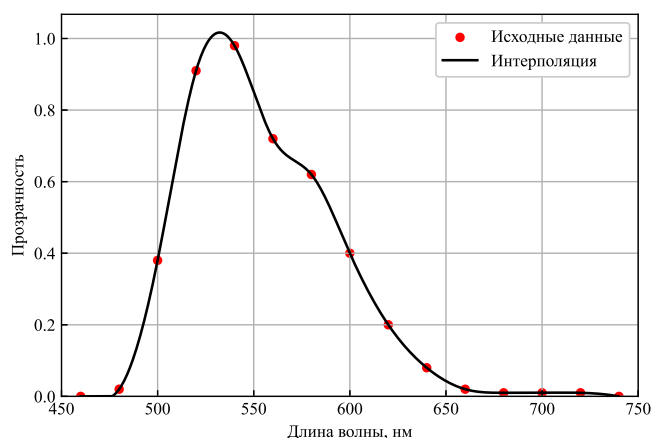


Рис. 3. Солнечный спектр, взятый из работы [6]

Для восстановления спектра зодиакального света необходимо знать количество фотонов от Солнца, со-

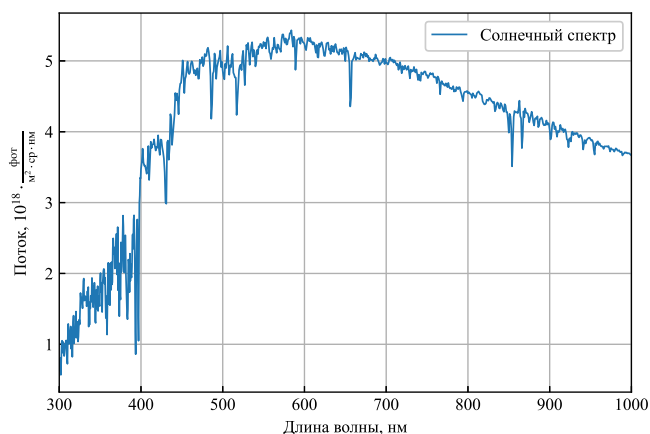


Рис. 4. Данные для фотометрической полосы пропускания V и их интерполяция кубическими сплайнами

ответствующее определенному направлению и времени (то есть фиксированным эклиптическим долготе и широте, положению Солнца) наблюдений. Значит, нужно описать механизм пересчета единиц S10, в которых выражена поверхностная яркость компоненты, в количество солнечных фотонов.

Как обсуждалось ранее, одна единица S10 соответствует 100 фотонам от звезды A0 в полосе пропускания V. Для пересчета к солнечным фотонам нужно понять, какую энергию несут 100 фотонов от звезды класса A0 в полосе V, а потом пересчитать эту энергию в количество фотонов от Солнца в той же полосе V. Солнечный спектр, принятый для расчетов, представлен на рис. 3. Результат свертки этого спектра с полосой пропускания V изображен на рис. 5.

Спектр звезды класса A0 был приближенно посчитан с помощью формулы Планка для температуры $T = 9800 \text{ K}$:

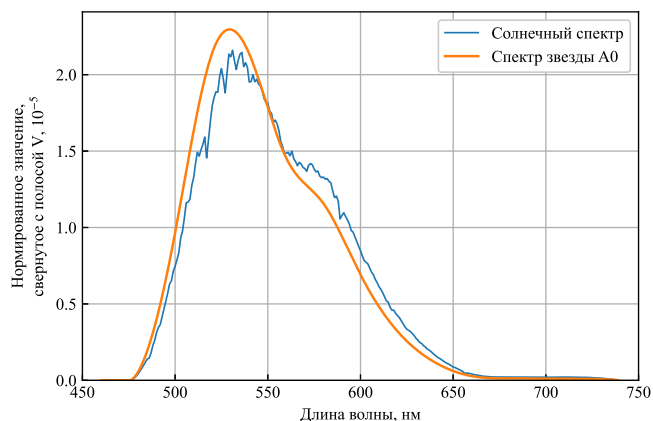


Рис. 5. Солнечный спектр и спектр для звезды A0, свернутые с фотометрической полосой пропускания V

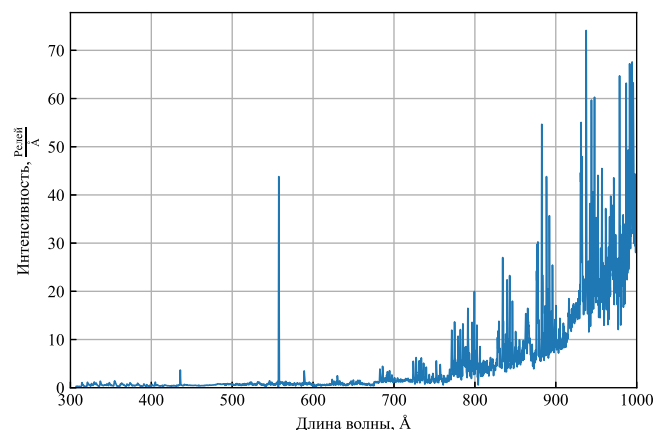


Рис. 6. Спектр собственного свечения атмосферы по данным обсерватории Китт Пик [10].

$$B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \quad (14)$$

Далее этот спектр также был свернут с полосой пропускания V , результат представлен на рис. 5. Вычитывая площади под графиками, можно оценить энергию, которую несет фотон в случае каждого из двух спектров. Поделив одну величину на другую, получаем коэффициент пересчета количества фотонов от звезды класса A0 в количество солнечных фотонов:

$$N = 100 \times \frac{W_{A0}}{W_{Sun}} = 102.14 \quad (15)$$

Тогда итоговая формула пересчета единиц S10 в количество солнечных фотонов принимает вид:

$$N_{Sun} = N \times S10 = 102.14 \times S10 \quad (16)$$

2. СОБСТВЕННОЕ СВЕЧЕНИЕ АТМОСФЕРЫ

Собственное свечение атмосферы — слабое излучение света атмосферой планеты. Оно вызывается процессами в верхних слоях атмосферы: рекомбинация атомарного кислорода, рекомбинация ионизированного азота и кислорода, флуоресценция молекулы OH, излучение возбужденных частиц (например, Na). Процесс протекает и в дневное, и в ночное время, но особенно заметен ночью [9].

Для учета этой компоненты фона выбран спектр, полученный в обсерватории Китт Пик [10]. Наблюдения проводились на высоте 2080 м под углом 30° от зенита в сторону галактического полюса для уменьшения звездного фона. Спектр, построенный на основе данных статьи, представлен на рис. 6. Интенсивность приведена в единицах релей/ангстрем. Один релей соответствует эмиссии 10^6 фотонов в секунду в столбечением 1 см^2 .

В рамках построения модели планируется собрать каждую из компонент за атмосферой, после чего просуммировать их и результат проводить через атмосферу для определенной высоты. Поэтому появляется необходимость перехода от измеренного спектра собственного свечения атмосферы к спектру, который наблюдается на высоте возникновения этой компоненты, в данной работе эта высота принята за 70 км. Для аккуратного перехода был использован пакет MODTRAN [11], который по заданным параметрам моделирует прозрачность атмосферы. Расчитанная прозрачность атмосферы для параметров эксперимента представлена на рис. 7. Поделив значения интенсивности собственного свечения атмосферы на прозрачность, получаем спектр на необходимой высоте — рис. 8.

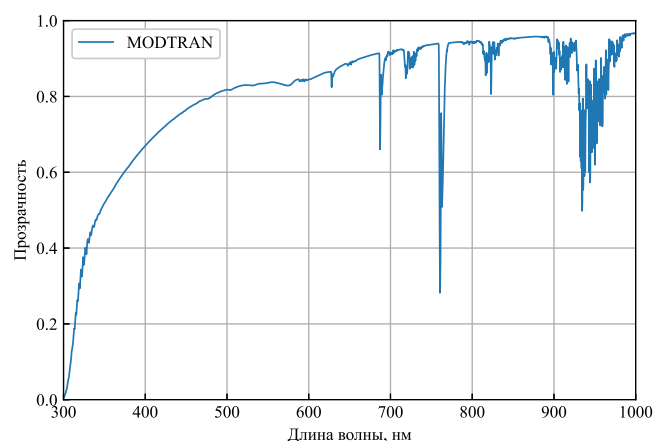


Рис. 7. Прозрачность атмосферы в зависимости от длины волны, полученная с помощью пакета MODTRAN

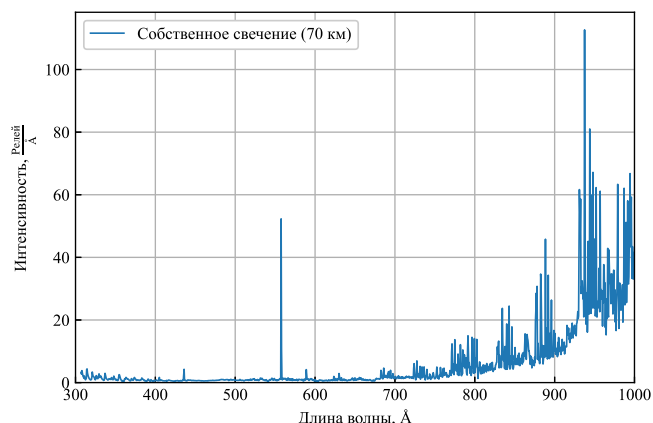


Рис. 8. Спектр собственного свечения атмосферы на высоте 70 км

3. ПАКЕТ SKYMAPMOD ДЛЯ PYTHON

Пакет для моделирования фона ночного неба в оптическом диапазоне является основной целью работы.

С его помощью можно будет получить моделирование как отдельных компонент фона, так и всех компонент в совокупности. Описанные выше вклады — зодиакальный свет и собственное свечение атмосферы — уже заложены внутри библиотеки SkyMapMod (<https://pypi.org/project/SkyMapMod/>). Пакет обновляется и дополняется по мере появления новых компонент фона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На первых этапах реализации модели фона ночного неба в оптическом диапазоне были учтены две основные компоненты: зодиакальный свет и собственное свечение атмосферы. В рамках каждой из них предложены источники данных и методы получения спектра от того или иного участка неба. Каждая из компонент уже заложена в пакет на языке Python, а работа над оставшимися вкладами в фон ведется в настоящее время.

-
- | | |
|--|--|
| <p>[1] Дивари Н. Б. // Успехи физ. наук. 84, № 9. 75 (1964).
 [2] Бялко А. В. // Природа. № 6. 22 (2020).
 [3] Buffington A., Bisi M. M., Clover J. M. et al. // Icarus. 272. 88 (2016).
 [4] Buffington A., Bisi M. M., Clover J. M. et al. // Icarus. 203, N 1. 124 (2009).
 [5] Leinert C., Bowyer S., Haikala L. K. et al. // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 127, N 1. 1 (1998).
 [6] Gueymard C. A. // Solar energy. 76, N 4. 423 (2004).</p> | <p>[7] Johnson H. L., Morgan W. W. // The Astrophysical Journal. 117, N 3. 313 (1953).
 [8] Moro D., Munari U. // Astronomy and Astrophysics Supplement Series. 147, N 3. 361 (2000).
 [9] Silverman S. M. // Space Science Reviews. 11, N 2. 341 (1970).
 [10] Broadfoot A. L., Kendall K. R. // J. of Geophys. Res. 73, N 1. 426 (1968).
 [11] Berk A., Conforti P., Kennett R. et al. // 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS). 1 (2014).</p> |
|--|--|

Numerical model of the night sky brightness in the optical range

A. A. Amineva^{1,a}, D. A. Podgrudkov^{1,2,b}

¹Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia

²Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University
Moscow 119191, Russia

E-mail: ^aamineva.aa19@physics.ru, ^bd.a.podgrudkov@physics.msu.ru

When conducting any ground-based optical experiment, it is always necessary to account for the background, which is present in the signal alongside the events of interest. A model of the night sky background is highly useful when working with data from such experiments. Currently, existing models in this field are either full-dome or limited to a narrow wavelength range. The main drawback is that these models represent the total flux, making it impossible to obtain the spectrum for a specific region of the sky. This paper presents the initial stages of implementing a model for night sky brightness in the optical range. The celestial sphere model is constructed in grids of $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, allowing for the calculation of both the spectrum and flux for any given region.

PACS: 92.60.hw, 42.68.-w

Keywords: airglow, night sky brightness, zodiacal light.

Received 07 April 2025.

Сведения об авторах

- Аmineva Анна Александровна — студент 2 курса магистратуры кафедры физики космоса физического факультета МГУ; e-mail: amineva.aa19@physics.ru.
- Подгрудков Дмитрий Аркадьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: d.a.podgrudkov@physics.msu.ru.