

## SkyMapMod: Численная модель яркости ночного неба в оптическом диапазоне на языке Python

А. А. Аминова,<sup>1,2\*</sup> Д. А. Подгрудков<sup>1,2†</sup>

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, НИИЯФ МГУ, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
(Поступила в редакцию 10.06.2025; подписана в печать 16.02.2026)

В данной работе представлена модель яркости ночного неба в оптическом диапазоне SkyMapMod для целей наземных астрофизических экспериментов, опирающихся на регистрацию оптических излучений (флуоресцентные и гамма-телескопы, черенковские детекторы ШАЛ). Модель предсказывает спектр потока фотонов от выбранного участка неба для указанного места и времени наблюдения. В модели учтены звёзды и диффузные галактические и внегалактические источники, собственное свечение атмосферы, зодиакальный свет и планеты солнечной системы. Моделируется и прохождение света через атмосферу. Модель реализована в виде пакета на языке Python и доступна для использования.

PACS: 92.60.hw, 42.68.-w      УДК: 53.05, 520

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

### ВВЕДЕНИЕ

При проведении любого наземного оптического эксперимента всегда приходится работать с фоном, который присутствует в сигнале наряду с интересующими событиями. В работе с данными таких экспериментов очень полезна модель фона ночного неба. В каждом крупном эксперименте существует свой подход к оценке и анализу фона (см., например, [1]), что говорит об отсутствии универсальности в их реализациях.

Самостоятельные же модели являются моделями отдельных компонентов фона [2, 3], либо моделями полного потока либо потока в узком диапазоне длин волн или для радио- или инфракрасного диапазона (например, работа [4]). Основной недостаток таких работ (помимо того, что они не являются моделями для оптической части спектра) заключается в том, что получить суммарный спектр для отдельного участка неба не представляется возможным. Наиболее развитые модели дают поток фотонов в фиксированном наборе полос пропускания (см. GAMBONS [5], на которой основаны расчёты яркости ночного неба крупных гамма-телескопов). А при работе, например, с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ) хорошо бы учитывать не просто коэффициент квантовой эффективности, а зависимость этого коэффициента от длины волны, оценить влияние фильтров и т. п.

Целью настоящей работы является написанная на языке python модель фона ночного неба в оптическом (от 300 до 1000 нм) диапазоне SkyMapMod. В модель закладываются четыре основных компонента: зодиакальный свет, собственное свечение атмосферы,

вклад от звёзд и от планет Солнечной системы. Модель небесной сферы строится по квадратам размером  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ , что позволяет вычислить спектр и поток для любой заданной области.

### 1. КОМПОНЕНТЫ ФОНА НОЧНОГО НЕБА

В данную модель в настоящий момент заложено 4 компонента фона:

1. зодиакальный свет;
2. собственное свечение атмосферы;
3. свет звёзд и диффузных источников;
4. планеты солнечной системы (Венера, Марс, Юпитер, Сатурн).

Каждая из компонент обладает своим спектром и интенсивностью.

#### 1.1 Зодиакальный свет

Зодиакальный свет обусловлен рассеянием солнечного света на линзообразном облаке, состоящем из частиц межпланетной пыли и вытянутом вдоль плоскости эклиптики [6]. В нашей работе рассматривается модель зодиакального света, предложенная для анализа данных прибора Solar Mass Ejection Imager (SMEI) [7]. Модель в этой работе, ориентированной на изучение коронарных выбросов массы, построена в эклиптической системе координат, которые далее приводятся к галактическим с помощью пакета AstroPy [8–10].

\* amineva.aa19@physics.msu.ru

† d.a.podgrudkov@physics.msu.ru

Для использования в рамках этой работы в модели зодиакального света были опущены «остаточные» компоненты, являющиеся случайными и влияющими на узкий диапазон углов возле Солнца, и внесены изменения в компонент, описывающий противосияние (ввиду опечатки в исходной статье, не позволяющей прямо воспроизвести результаты исходной работы (см. детали в [11]).

Спектр зодиакального света в оптическом диапазоне полагается солнечным (спектр Солнца взят из работы [12]).

### 1.2. Собственное свечение атмосферы

Собственное свечение атмосферы — слабое излучение света атмосферой планеты, вызванное процессами в верхних слоях (например, рекомбинация атомарного кислорода, флуоресценция молекулы ОН). Этот компонент учитывается на основе спектра, полученного в обсерватории Китт-Пик [13]. Интенсивность представлена в единицах [Рэлей/Å]. Переход к единицам [фотон м<sup>-2</sup> нм<sup>-1</sup> с<sup>-1</sup>] осуществляется на основе определения Рэля:

$$1 \text{ Рэлей} = \frac{10^{10}}{4\pi} \cdot \frac{\pi^2}{180^2} \cdot \frac{1}{100} \cdot \frac{\text{фот}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{бин}}, \quad (1)$$

фотонов      ср в °      ° в бины

где учтено разбиение на области размером 0,1° × 0,1°.

В используемом спектре помимо основных линий присутствует «континуум» — неразрешенные линии. Хотя их интенсивность на фоне основных линий мала, они дают значительный вклад при интегрировании. Также в опорном спектре наблюдаются остаточные вклады зодиакального света и антропогенной зачатки. В связи с этим в настоящей работе была произведена грубая нормировка спектра. Отмечается, что вклад в спектр на длине волны 557.7 нм — 250 Рл [14]. В качестве нормировки было принято, что эта длина волны дает основной вклад в фотометрической полосе V, и весь спектр нормировался так, чтобы в этой полосе наблюдалось именно 250 Рл.

Все компоненты фона собираются за атмосферой, поэтому с помощью прозрачности, смоделированной с использованием пакета MODTRAN [15], спектр был пересчитан с высоты 2080 метров к высоте 100 километров. На данном этапе полагается, что вклады от разных участков 0.1° × 0.1° равны.

### 1.3. Свет звёзд и диффузных источников

Этот компонент восстанавливается на основе панорамы Млечного Пути [16] — мозаичного изображения неба, снятого в 3 каналах (red — R, green — G и blue — B), каждый со своей характерной полосой пропускания. Данные представлены в галактических координатах с шагом в 0,1° по *l* и *b* и включают в себя:

1. Поток от точечных источников или разрешенных диффузных объектов *S*;
2. Интегральный звездный свет *I<sub>ISL</sub>*;
3. Диффузный галактический свет *I<sub>DGL</sub>*;
4. Внегалактический фоновый свет *I<sub>EVL</sub>*.

В настоящей работе на основе значений, записанных в каналах R, G, B, в два этапа восстанавливается спектр Планка, соответствующий тому или иному квадрату:

$$u(\lambda, T) = A \cdot \frac{2c}{\lambda^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — набор длин волн, выраженных в метрах;  $T$  — температура;  $A$  — нормировочная константа;  $c = 3 \times 10^8$  м/с — скорость света;  $h = 6.63 \times 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка;  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

На первом этапе подбирается температура. На основе данных высчитываются параметры  $(R/B)_{\text{data}}$  и  $(B/G)_{\text{data}}$ . Строится распределение Планка для начальной температуры  $T_0$ , который сворачивается с полосами пропускания R, G, B. Далее вычисляются параметры  $(R/B)_{\text{approx}}$  и  $(B/G)_{\text{approx}}$ . Путем варьирования температуры достигается наилучшее сходство параметров, полученных на основе данных, и параметров, вычисленных на основе заданной температуры. Результат этого этапа — массив температур размером 1800 × 3600, в котором записаны подобранные для каждой тройки параметров R, G, B температуры.

На втором этапе ведется работа с амплитудой. Здесь три параметра  $R_{\text{data}}$ ,  $G_{\text{data}}$ ,  $B_{\text{data}}$  рассматриваются независимо. С точки зрения аппроксимации на основе полученной на предыдущем этапе температуры и начальной амплитуды  $A_0$  строится распределение Планка, которое сворачивается с полосами пропускания R, G, B. После вычисляются параметры  $R_{\text{approx}}$ ,  $G_{\text{approx}}$ ,  $B_{\text{approx}}$ . Путем варьирования амплитуды достигается наилучшее сходство параметров, полученных на основе данных, и параметров, вычисленных на основе заданной амплитуды. Результат этого этапа — массив амплитуд размером 1800 × 3600.

В дальнейшем при восстановлении спектра участка неба для каждого элемента выбирается амплитуда и температура из вычисленных (и хранимых в модели), восстанавливается спектр этих элементов и суммируется.

### 1.4. Планеты Солнечной системы

В рамках этого компонента учитываются вклады от Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. Форма спектра от каждой планеты получается путем свертки солнечного спектра и альbedo планеты. Последние представлены

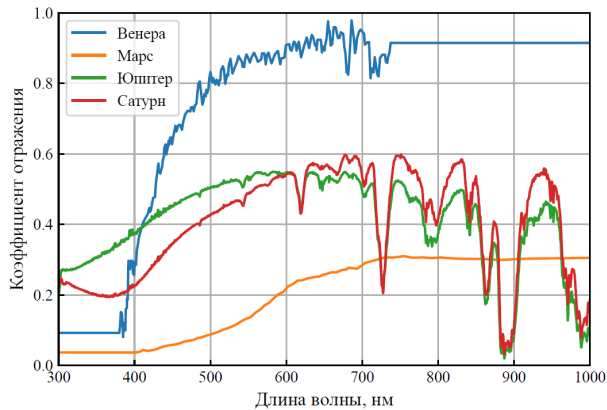


Рис. 1. Альbedo Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна.

на рисунке 1. Данные по альbedo Венеры взяты из работы [25], в случае Марса — из работы [24], а в случае Юпитера и Сатурна — из работы [26]. Для нормировки спектров используется звездная величина планеты, которая вычисляется на основе времени наблюдения с помощью библиотеки PyEphem [27].

Вклад планеты учитывается, если она попадает в поле зрения. Галактические координаты планеты для выбранного времени наблюдения вычисляются с использованием библиотеки AstroPy.

## 2. УЧЁТ ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

Результатом суммирования спектров от четырех компонентов является спектр, построенный в галактических координатах и за атмосферой. При суммировании учет сжатия ячейки к полюсам производится с помощью множителя  $\cos(b)$ . Для работы со спектром в контексте оценки фона необходимо осуществить переход к параметрам эксперимента и провести вклады через атмосферу.

По географическим координатам точки наблюдения, зенитному и азимутальному углам и времени наблюдения с помощью библиотеки AstroPy вычисляются галактические координаты, по которым восстанавливается суммарный спектр за атмосферой.

Учет прозрачности атмосферы производится на основе:

1. программного обеспечения CORSIKA [28], откуда берутся зависимость толщины атмосферы от высоты и коэффициенты, соответствующие стандартной модели атмосферы США;
2. пакета MODTRAN, с помощью которого вычисляются обратные коэффициенты массового поглощения в зависимости от длины волны для стандартной модели атмосферы США.

Таким образом, по заданной высоте наблюдения получается зависимость прозрачности атмосферы от дли-

ны волны:

$$transparency = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp\left(-\frac{T(h)}{T_0(\lambda)}\right), \quad (3)$$

где  $I(\lambda)$  — интенсивность на высоте наблюдения;  $I_0$  — интенсивность за атмосферой;  $T(h)$  — толщина атмосферы на высоте наблюдения;  $T(\lambda)$  — обратные коэффициенты массового поглощения.

Путем свертки этой зависимости с исходным суммарным спектром получается спектр, проведенный через атмосферу. Помимо описанного «встроенного» механизма учета атмосферы в рамках пакета SkyMapMod у пользователя есть возможность заложить свою зависимость прозрачности атмосферы от длины волны.

## 3. СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАМИ

Для сравнения полученной модели с экспериментом нужно подходить к задаче с двух сторон. С одной стороны, помимо данных о местоположении, угле наблюдения, дате и времени, нужны показания прибора и его характеристики (угол обзора, эффективная площадь, кривая квантовой эффективности и др.). С другой стороны, нужно обеспечить расчет всех компонентов модели, провести их через атмосферу. В настоящей работе производится сравнение модели с результатами экспериментов SIT (Small Imaging Telescope) и СФЕРА-2. В первом случае имеем дело с кремниевыми фотоумножителями (КФУ), а во втором — с ФЭУ. И там, и там сравнение производится путем приведения показаний прибора и фона к числу первичных фотоэлектронов, зарегистрированных прибором.

### 3.1. Сравнение с SIT

Прототип широкоугольного телескопа SIT входит в состав астрофизического комплекса TAIGA [17, 18]. Он направлен на регистрацию черенковского излучения от широких атмосферных ливней (ШАЛ). Телескоп подключен к системе сбора данных и синхронизации массива TAIGA-HiSCORE и рассчитан в том числе на совместную с ним работу [19].

Расположение SIT описывается следующими географическими координатами:  $\varphi = 51^\circ 48' 36''$  N,  $\lambda = 103^\circ 07' 00''$  E. Высота над уровнем моря — 670 м. Во время наблюдений прибор был направлен под углом  $30^\circ$  к зениту на юг ( $z = 30^\circ$ ,  $A = 180^\circ$ ).

Камера прототипа состоит из 49 КФУ SensL MicroFC-SMTPA-60035 [20]. Эффективная площадь —  $354 \text{ см}^2$ , угол обзора —  $8.5^\circ$ . В работе [21] производилась калибровка прототипа — были найдены зависимости коэффициента усиления от температуры и напряжения для каждого отдельного КФУ. Коэффициенты усиления используются для пересчета тока, снятого с прибора, в количество фотоэлектронов.

Из данных, регистрируемых телескопом, извлекаются время наблюдения (записано в UNIX time), ток с матрицы  $I$  (мА), температура  $T$  (°C) и напряжение  $U$  (В).

Рассмотрим сравнение на примере момента времени  $t = 1610470000$ . Это время — 12 января 2021 года, 16:46:40 (по UTC). Остальные параметры для этой даты:  $I = 0.541$  мА,  $T = -20.2^\circ\text{C}$ ,  $U = 25.956$  В. По температуре и напряжению на основе работы [21] рассчитываются коэффициенты усиления  $K$  для 48 каналов, далее значение усредняется. Пересчет в количество фотоэлектронов производится следующим образом:

$$N_{\text{фотоэл}} = \frac{N_{\text{зарег}}}{K} = \frac{I \cdot t}{e \cdot K}, \quad (4)$$

где  $N_{\text{фотоэл}}$  — количество фотоэлектронов;  $N_{\text{зарег}}$  — количество зарегистрированных вторичных электронов;  $I = 5.41 \times 10^{-4}$  А — зарегистрированный ток;  $t = 1$  с — время, в течение которого происходила регистрация;  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Кл — заряд электрона;  $K = 1.655 \times 10^6$  — коэффициент усиления, рассчитанный для заданных температуры ( $T = -20.2^\circ\text{C}$ ) и напряжения ( $U = 25.956$  В) и усредненный по 48 каналам.

Итоговое значение, полученное для выбранного момента времени:

$$N_{\text{фотоэл}}^{\text{SIT}} = 2.043 \cdot 10^9 \quad (5)$$

Здесь также необходимо учесть «кросс-токи», которые, могут вызвать срабатывания соседних микроячеек. Вклад «кросс-токов» для выбранных температуры и напряжения составляет около 13% [21]. Тогда количество фотоэлектронов:  $N_{\text{фотоэл}}^{\text{SIT}} = 1.778 \cdot 10^9$ .

Для того, чтобы получить количество фотоэлектронов, которые дает фон ночного неба, в контексте используемого прибора необходимо учесть квантовую эффективность (PDE). Этот параметр выражается в процентах и показывает, насколько эффективно фотоны регистрируются детектором. Нормированная на 1 по амплитуде зависимость квантовой эффективности от длины волны взята из документации КФУ [20]. Для того, чтобы эта зависимость характеризовала детектор при определенных температуре и напряжении, нужно подобрать нормировочную константу, при умножении на которую получится необходимое для пересчета распределение. Эта константа была рассчитана по методике, описанной в работе [21], и для данных условий равна  $PDE = 0,33$ .

Теперь, когда определены все зависящие от прибора характеристики, можно переходить к работе с моделью. Сначала в галактических координатах выделяется область, попадающая в поле зрения телескопа. Она разбивается на области с шагом  $0.1^\circ$  по каждому из углов. Для каждой точки покомпонентно высчитываются: зодиакальный свет, собственное свечение атмосферы, свет от звезд и от планет Солнечной системы. Все

функции, отвечающие за эти расчеты, описаны в документации к пакету. Итоговый спектр после проведения через атмосферу и учета эффективной площади прибора представлен на рисунке 2. Видно, что для такого поля зрения собственное свечение, зодиакальный свет и свет от звезд дают близкие по порядку величины вклады. Что касается планет — ни одна из них не попала в поле зрения для обозначенной даты. Далее спектр сворачивается с квантовой эффективностью — результат представлен на рисунке 3 — и интегрируется. Результат интегрирования — количество фотоэлектронов:  $N_{\text{фотоэл}}^{\text{модель}} = 1.885 \times 10^9$ . А соотношение между моделью фона и показаниями прибора:

$$N_{\text{фотоэл}}^{\text{модель}} / N_{\text{фотоэл}}^{\text{SIT}} = 1.06 \quad (6)$$

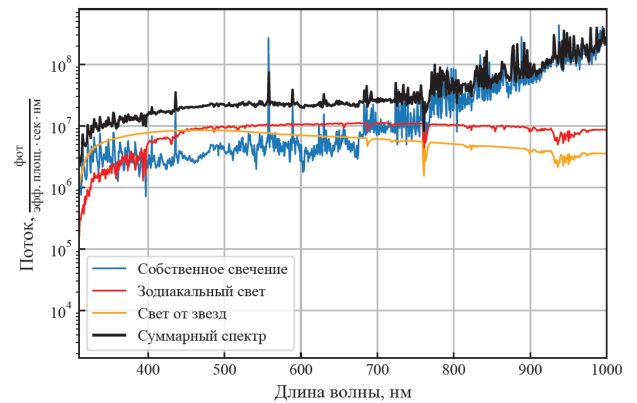


Рис. 2. Спектры компонент фона ночного неба 12 января 2021 г. в 16:46:40 UTC после проведения через атмосферу и учёта эффективной площади и ориентации детектора SIT.

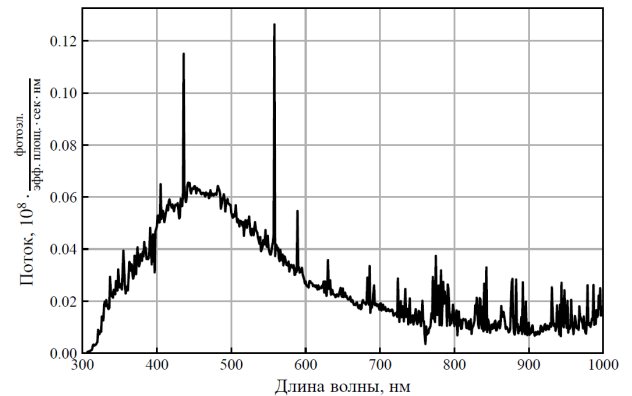


Рис. 3. Результат свертки спектра фона ночного с кривой квантовой эффективности регистрации фотонов для SIT.

### 3.2. Сравнение с экспериментом СФЕРА-2

Эксперимент СФЕРА предназначен для исследования первичного космического излучения в интервале

энергий от 10 до 1000 ПэВ. Установка поднималась на привязном аэростате ночью в безлунное и безоблачное время над покрытой снегом поверхностью озера Байкал на высоту до 1 км и регистрировала отраженный от снежной поверхности черенковский свет ШАЛ.

Место запуска эксперимента было расположено в районе  $\varphi = 51^\circ 47' 50'' \text{ N}$ ,  $\lambda = 104^\circ 23' 24'' \text{ E}$ . В контексте сравнения с этим экспериментом сначала нужно понять, сколько света падает на область снега площадью  $1 \text{ м}^2$ . В качестве высоты принимается высота точки запуска — 455 метров. В качестве зенитного угла —  $z = 0$ . В контексте угла обзора считаем, что на снег попадает все, что падает с зенитным углом от  $0^\circ$  до  $80^\circ$ . За дату и время наблюдения принимаем 7 марта 2012, 17:00:00 (по UTC, местные дата и время — 8 марта 2012, 02:00:00).

Аналогично тому, как это было в случае SIT, для модели сначала получаем область в галактических координатах, которую «видит» снег. Далее — покомпонентный расчет фона для каждой точки области и проведение полученного спектра через атмосферу. При расчетах учитывалось, что вклады от больших углов падают на площадку меньшей площади:  $S = \cos(z) \cdot \text{м}^2$ . Результат представлен на рисунке 4. Наименьший вклад в случае большого поля зрения, как и ожидалось, дают планеты. Наибольший вклад наблюдается от собственного свечения атмосферы.

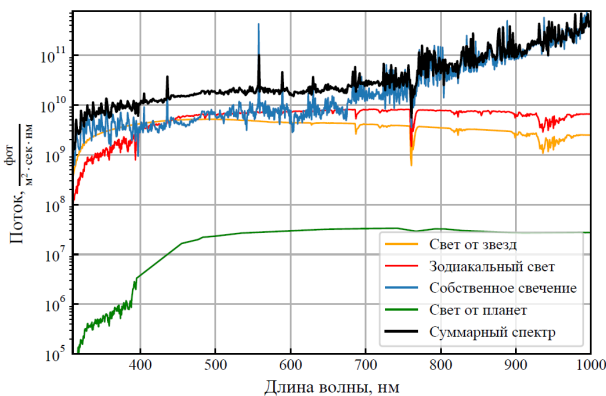


Рис. 4. Спектр фона ночного неба после проведения через атмосферу. В качестве площадки выбран один квадратный метр снега на высоте 455 м

Пересчет спектра от квадратного метра снега к спектру, который попадает на центральный ФЭУ прибора, осуществляется путем учета эффективности светосбора детектора СФЕРА-2 — расчёт показывает, что центральный ФЭУ, обозревающий формально  $0.007 \text{ ср}$  (для высоты полёта детектора 500 м это около  $1700 \text{ м}^2$ ), с учётом перерасеяния от снега, с учётом коэффициентов отражения от снега и зеркала и коэффициента заполнения мозаики, небольшого размера диафрагмы «видит» эффективно  $3.7 \text{ см}^2$ . Далее спектр сворачивается с кривой квантовой эффективности ФЭУ Hamamatsu R3886. Данные взяты из ра-

бот [22, 29]. Финальный спектр представлен на рисунке 5. Этот спектр интегрируется, результат — число фотоэлектронов  $N_{\text{фотоэл}}^{\text{модель}} = 2.513 \cdot 10^8$ .

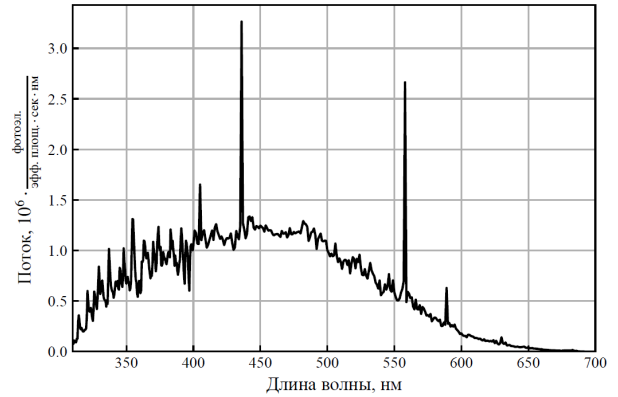


Рис. 5. Результат свертки спектра фона ночного с кривой квантовой эффективности регистрации фотонов для эксперимента СФЕРА-2.

С точки зрения показаний прибора имеем: ток на центральном ФЭУ  $I = 3 \text{ мкА}$  [23], коэффициент усиления  $K = 6.998 \times 10^4$  [22]. Пользуясь расчетами, представленными в формуле 4, получаем число фотоэлектронов:  $N_{\text{фотоэл}}^{\text{СФЕРА}} = 2.679 \times 10^8$ . Тогда итоговое соотношение между числом фотоэлектронов, полученных с помощью модели и на основе данных прибора:

$$N_{\text{фотоэл}}^{\text{модель}} / N_{\text{фотоэл}}^{\text{СФЕРА}} = 0.938 \quad (7)$$

На самом деле, и в случае сравнения с SIT, и в случае сравнения с экспериментом СФЕРА, следовало ожидать немного заниженные оценки модели. Например, из-за того, что не учтен вклад (хоть и небольшой) антропогенной засветки. В контексте обсуждения СФЕРЫ стоит отметить, что в соседние с выбранным днем моменты наблюдались токи от центрального ФЭУ  $I = 3.2 \text{ мкА}$ , что может быть связано в том числе со значительными вариациями собственного свечения атмосферы (его вклад в общий поток значительный — см. рисунок 4). В случае сравнения с экспериментом СФЕРА, имеющим большой угол обзора, были аккуратно учтены прозрачности атмосферы для разных зенитных углов и площади ячейки сетки в галактической системе координат. Для SIT зенитный угол при учете атмосферы и галактическая координата  $b$  при учете площади ячейки сетки полагались постоянными.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование пакета в рамках сравнения с экспериментами SIT и СФЕРА-2 дает завышенные оценки. Это указывает на необходимость улучшения точности модели, и есть несколько направлений улучшения ее точности.

*Первое* — пренормировка спектра собственного свечения и учет вариаций этого вклада. Вместо нормировки, описанной в разделе 1, можно попробовать аккуратно учесть континуум, что должно обеспечить лучшую работу модели. Кроме того, при съемке используемого спектра, если верить опорной статье, не был учтен вклад зодиакального света и не было проверено, попали ли в поле зрения неразрешенные звезды. Для этих вкладов, не имеющих отношения к собственному свечению, можно подобрать метод вычета из исходного спектра. Кроме того, для собственного свечения характерны сильные вариации, механизм возникновения которых неизвестен, а вклад — значителен.

Аналогично, можно адаптировать иную, более сложную модель собственного свечения атмосферы, такую как ESO SKYCALC [30, 31].

*Второе* — аккуратный учет звезд. Вместо одного спектра, рассчитанного по формуле Планка, в некоторые пиксели нужно закладывать несколько таких спектров. Это подтверждается наличием ситуаций, когда в канале G (центральный относительно каналов R и B) по исходным данным записано наименьшее значение. Также иногда в данных встречаются точки, для которых в каналах G и B в исходных данных записаны малые значения, а в канале R — большие. Процедура аппроксимации для такого соотношения значений дает звезду низкой температуры и высокой яркости, что искажает длинноволновую часть. Для более корректной работы с таким типом точек можно использовать данные в полосе IR (инфракрасная часть спектра) в качестве четвертого канала, что даст более надежный результат в области канала R.

*Третье* — подбор более подходящей модели атмосферы. Все расчеты были произведены с использованием стандартной модели атмосферы США. По толщине эта модель атмосферы близка к параметрам атмосферы в районе Байкала в зимнее время. Но итоговый результат очень чувствителен также к плотности атмосферы, количеству аэрозолей и прочим факторам. Для уточнения работы модели необходим более аккуратный учет этих параметров.

Первые два пункта будут проделаны на более поздних этапах реализации модели. Третий же может быть решен конкретным пользователем уже сейчас — вместо встроенной в пакет модели атмосферы можно использовать свою, наиболее подходящую к параметрам того или иного эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работы является готовый к использованию пакет SkyMapMod. С его помощью можно получать как спектры отдельных компонентов фона, так и суммарный спектр. За пользователем остается возможность использовать собственные данные для модели атмосферы, полос пропускания, спектра Солнца. Инструкции по установке пакета SkyMapMod представлены на сайте: <https://pypi.org/project/SkyMapMod/>.

Модель дает хорошие оценки фона для двух разных экспериментов — SIT и СФЕРА-2, но нуждается в более аккуратном учете некоторых компонентов.

- [1] Roellinghoff G., Spencer S. T., Funk S. // arXiv:2505.12895 [astro-ph.IM]. (2025).
- [2] Kelsall T., Weiland J. L., Franz B. A. et al. // *Astrophys. J.* **508**, N 1. 44 (1998).
- [3] San M., Herman D., Erikstad G. B. et al. // *A&A.* **666**. ID A107 (2022).
- [4] Dowell J., Taylor G. B., Schinzel F. K. et al // *MNRAS.* **469**, N 4. 4537 (2017).
- [5] Masana E., Carrasco J. M., Bara S., Ribas S. J. // *MNRAS.* **501**, I. 4. 5443 (2021).
- [6] Дивару Н. Б. // *УФН.* **84**, № 9. 75 (1964).
- [7] Buffington A., Bisi M. M., Clover J. M. et al. // *Icarus.* **272**. 88 (2016).
- [8] *Astropy Collaboration* // *A&A.* **558**. ID A33 (2013).
- [9] *Astropy Collaboration* // *Astron. J.* **156**, N 3. ID: 123 (2018).
- [10] *Astropy Collaboration* // *Astron. J.* **935**, N 2. ID: 167 (2022).
- [11] Аминева А. А., Подгрудков А. А. // Учен. зап. физ. факта Моск. ун-та. № 2. 2520204 (2025).
- [12] Gueymard C. A. // *Solar energy.* **76**, N 4. 423 (2004).
- [13] Broadfoot A. L., Kendall K. R. // *Journal of Geophysical Research.* **73**, N 1. 426 (1968).
- [14] Chamberlain J. W. *Physics of the Aurora and Airglow: International Geophysics Series.* **2**. (2016).
- [15] Berk A., Conforti P., Kennett R. et al. // *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X.* **5425**. 341 (2004).
- [16] Mellinger A. // *Publ. of the Astronom. Soc. of the Pacific.* **121**, N 885. 1180 (2009).
- [17] Волчугов П. А. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. №4. 1941601 (2019),
- [18] Астапов И. И., Безъязыков П. А., Бланк М. и др. // *ЖЭТФ.* **161**, № 4. 548 (2022).
- [19] Chernov D., Astapov I., Bezyazeev P. et al. // *JINST.* **15**. ID C09062. (2020). DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09062
- [20] *ON Semiconductors* // Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive. 2020. URL: [www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf](http://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf)
- [21] Аминева А. А., Пантюхин А. В., Подгрудков Д. А. // Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та. № 4. 2341602 (2023).
- [22] Antonov R. A., Bonvech E. A., Chernov D. V. et al. // *Astropart. Phys.* **77**. 55 (2016).
- [23] Bonvech E., Chernov D., Finger Mir. et al. // *Universe.* **8**, N 1. ID 46 (2022).
- [24] Erard S., Calvin W. // *Icarus.* **130**, N 2. 449 (1997).
- [25] Pellier C. *Venus Spectrum.* (2020). <https://www.planetary-astronomy-and->

- imaging.com/en/venus-spectrum/
- [26] *Karkoschka E.* // *Icarus*. **133**, N 1. 134 (1998).
- [27] *Rhodes B. C.* PyEphem: Astronomical Ephemeris for Python. (2025). <https://rhodesmill.org/pyephem/>.
- [28] *Heck D.* et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers // Report FZKA. **6019**, N 11 (1998).
- [29] *Антонов Р. А., Аулова Т. В., Бонвеч Е. А.* и др. // *ЭЧАЯ*. **46**, вып. 1, 115 (2015).
- [30] *Noll, S., Kausch, W., Barden, M., et al.* // *A&A*. **543**. ID: A92 (2012).
- [31] *Jones A., Noll S., Kausch W.* et al. // *A&A*. **560**. ID: A91 (2013).

## SkyMapMod: A python numerical model of the night sky brightness in the optical range

**A. A. Amineva<sup>1a</sup>, D. A. Podgrudkov<sup>1,2b</sup>**

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119191, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>amineva.aa19@physics.ru, <sup>b</sup>d.a.podgrudkov@physics.msu.ru*

In this work, we present a numerical model of the night sky brightness in the optical range called SkyMapMod, intended for ground-based astrophysical experiments that rely on the detection of optical radiation (such as fluorescence and gamma-ray telescopes, and Cherenkov detectors of extensive air showers). The model predicts the photon flux spectrum from a selected region of the sky for a specified location and observation time. It accounts for stars and diffuse galactic and extragalactic sources, atmospheric airglow, zodiacal light, and light from solar system planets. The propagation of light through the atmosphere is also modeled.

PACS: 92.60.hw, 42.68.-w

*Keywords:* airglow, night sky brightness, zodiacal light.

*Received 10 June 2025.*

### Сведения об авторах

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