

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ АСТРОНОМИИ

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

«Характеристики оптических излучений широких атмосферных
ливней и оптических фонов в эксперименте СФЕРА-Антарктида»

Выполнила студентка

636 группы

Энтина Елена Львовна

Научный руководитель:

К.ф.-м.н., н.с. Подгрудков Д. А.

Допущена к защите

Зав. кафедрой _____

Москва

2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
1 РЕГИСТРАЦИЯ ШАЛ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	6
1.1 Развитие ШАЛ	6
1.2 ИВЧ ШАЛ	7
1.3 Флуоресцентный свет ШАЛ	8
1.4 Обзор основных экспериментов по регистрации ШАЛ высоких энергий	9
1.5 Источники оптического фона	10
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ	12
2.1 Моделирование ШАЛ	12
2.2 Звездный фон	12
2.3 Зодиакальный свет	15
2.4 Непрозрачность атмосферы	17
2.5 Учёт рэлеевского рассеяния	17
2.6 Учет отражения от снежной поверхности	18
3 РЕЗУЛЬТАТЫ	19
3.1 Спектры ИВЧ ШАЛ	19
3.2 Спектры флуоресцентного света ШАЛ	22
3.3 Звездный фон	23
3.4 Зодиакальный свет	26
3.5 Собственное свечение атмосферы	27
ВЫВОДЫ	28
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	29

ЛИТЕРАТУРА	29
----------------------	----

ВВЕДЕНИЕ

Регистрация и идентификация частиц космических лучей (КЛ) представляет большой интерес, в частности, потому, что КЛ служат источником информации об астрофизических объектах. Для уточнения теории ускорения и распространения КЛ высоких энергий необходимо более детальное изучение явлений, вызываемых попаданием таких частиц в атмосферу Земли, — широких атмосферных ливней (ШАЛ).

Электроны — основная заряженная компонента ШАЛ вблизи максимума ливня. Каждый электрон, имеющий энергию выше 22 МэВ на уровне моря (т.е. движущийся со скоростью, превышающей фазовую скорость света в воздухе), образует большое количество фотонов излучения Вавилова-Черенкова (ИВЧ ШАЛ). Регистрация ИВЧ ШАЛ считается одним из самых перспективных методов исследования и идентификации первичных частиц ШАЛ [1]. Кроме того, заряженные частицы ШАЛ при прохождении через атмосферу возбуждают молекулы азота, которые снимают это возбуждение, изотропно излучая флуоресцентный свет. Установка СФЕРА-А будет регистрировать оба эти излучения, что позволит повысить точность идентификации частиц ПКЛ.

СФЕРА-А — планируемый антарктический баллонный эксперимент по измерению энергетического спектра и элементного состава космических лучей сверхвысоких энергий (10^{18} – 10^{20} эВ, [2]). Баллон будет летать по циркулярной орбите на высоте 15–30 км над уровнем моря. С помощью системы линз фотоны флуоресцентного света и отраженные от снежной поверхности фотоны ИВЧ ШАЛ фокусируются на фотодетектор, состоящий из ~ 3000 кремниевых фотоумножителей. Данные, полученные с фотодетектора и сопутствующих датчиков, записываются на бортовой компьютер.

Так как спектры ИВЧ и флуоресцентного света ШАЛ различаются по форме и уровню сигнала, фотодетектор имеет собственную спектральную чувствительность, отдельно встает вопрос о спектральных особенностях приходящего на детектор излучения и возможных шумах, загрязняющих ту или иную область спектра. В этой работе оценены потоки оптических излучений ШАЛ с энергией первичных частиц 10^{18} – 10^{20} эВ (предполагаемая область

видимости эксперимента СФЕРА-А) и оптические фоны, яркость которых определяет нижний порог чувствительности эксперимента.

ГЛАВА 1.

РЕГИСТРАЦИЯ ШАЛ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

§ 1.1. Развитие ШАЛ

При попадании в атмосферу частица КЛ высокой энергии: протон или более тяжелое ядро, — сталкивается с ядром атома атмосферы и рождает новые ядерно-активные частицы (протоны, нейтроны и в большей степени π - и K -мезоны), которые в дальнейшем также сталкиваются с атомами среды. Это приводит к лавинообразному увеличению числа ядерно-активных частиц. Если образовавшиеся π^\pm -мезоны имеют небольшую энергию, — а при высокой энергии характерный пробег до их взаимодействия с атомами среды меньше пробега до распада вследствие релятивистского замедления времени, и π -мезоны дальше участвуют в развитии каскада, — то они распадаются и рождают мюонную (ядерно-пассивную) компоненту ливня:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu,\end{aligned}\tag{1.1}$$

а π^0 -мезоны распадаются на γ -кванты, которые дают начало электронно-фотонной компоненте ливня:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma,\tag{1.2}$$

В сильном электромагнитном поле ядер атомов атмосферы фотоны рождают электронно-позитронные пары (e^-e^+ -пары), которые в дальнейшем рассеиваются в кулоновских потенциалах атомов среды. e^- и e^+ получают ускорение, и, следовательно, рождают фотоны тормозного излучения. Если их энергия велика, вновь образуются e^-e^+ -пары, и процесс повторяется. Вследствие этого число частиц в электронно-фотонном каскаде лавинообразно возрастает, а средняя энергия \bar{E} частиц резко уменьшается на каждом шаге, пока не упадет до некоторого критического значения, при котором средние ионизационные и радиационные потери за единицу проходимого e^- пути сравняются. Тогда число частиц в лавине достигнет максимума, а затем начнёт постепенно уменьшаться (подробнее об этом процессе, например, [3]).

§ 1.2. ИВЧ ШАЛ

Основным источником черенковского света являются быстрые электроны, которые собственным полем поляризуют атомы среды, близкие к траектории своего движения. Для каждой отдельной заряженной частицы волновой вектор и частота электромагнитной волны, распространяющейся в прозрачной среде, связаны соотношением $k = n\omega/c$, где n — показатель преломления среды. С другой стороны, частота Фурье-компоненты поля равномерно движущейся в среде частицы связана с x -компонентой волнового вектора (ось x направлена вдоль скорости частицы) соотношением $\omega = k_x \cdot v$. Для того, чтобы такая компонента представляла собой свободно распространяющуюся электромагнитную волну, соотношения $k = n\omega/c$ и $k_x = \omega/v$ не должны противоречить друг другу. Если θ — угол между направлением движения частицы и направлением излучения, то из соотношения $\omega/v = k_x = k \cdot \cos \theta = (n\omega/c) \cdot \cos \theta$ следует, что:

$$\cos \theta = \frac{c}{v \cdot n} = \frac{1}{\beta n}, \quad (1.3)$$

где $\beta = v/c$ — безразмерная скорость частицы. Таким образом, излучение Вавилова-Черенкова распространяется в узком конусе с углом раствора θ . Формула Франка-Тамма [4] для энергетического потока ИВЧ без учета анизотропии среды и квантовомеханических поправок будет иметь вид:

$$\frac{dW}{dl} = \frac{e^2}{c^2} \int_{\beta n > 1} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega d\omega. \quad (1.4)$$

Тогда, переходя от энергии W к числу фотонов $N = W/\hbar\omega$ и от частоты ω к длине волны $\lambda = 2\pi c/\omega$, получим соотношение:

$$\frac{dN}{dl d\lambda} = 2\pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2}. \quad (1.5)$$

Зависимость $N(\lambda)$ называется спектром излучения. Если положить $n = \text{const}$ и пренебречь всеми возможностями среды взаимодействовать с излучением, спектр излучения Вавилова-Черенкова сведется к спектру эмиссии $N \sim 1/\lambda^2$.

§ 1.3. Флуоресцентный свет ШАЛ

Флуоресценция — малоинтенсивное изотропное свечение среды, которое возникает за счет высвечивания молекул азота, возбуждаемых при прохождении рядом с ними заряженных частиц ШАЛ. Релятивистский электрон вызывает излучение ~ 4.7 фотонов на метр пройденного в атмосфере пути (при $T = 0^\circ$ и нормальном давлении). Флуоресцентное свечение атмосферы при прохождении ШАЛ пропорционально числу частиц ливня, т.е. может быть найдено по известной форме каскадной кривой, описываемой кривой Гайсера-Хилласа [5]:

$$N(X) = N_{max} \cdot \frac{X - X_0}{X_{max} - X_0}^{\frac{X_{max} - X_0}{\lambda}} \cdot \exp\left(\frac{X_{max} - X}{\lambda}\right), \quad (1.6)$$

где X — глубина наблюдения, X_0 — глубина первого взаимодействия, X_{max} — глубина максимума ливня, параметр затухания λ был подобран эмпирически на уровне 70 г/см^2 .

Молекула азота определяет основную долю флуоресценции атмосферы. Спектр молекулярного азота, измеренный коллаборацией AIRFLY [6], представлен на рис. 1.1.

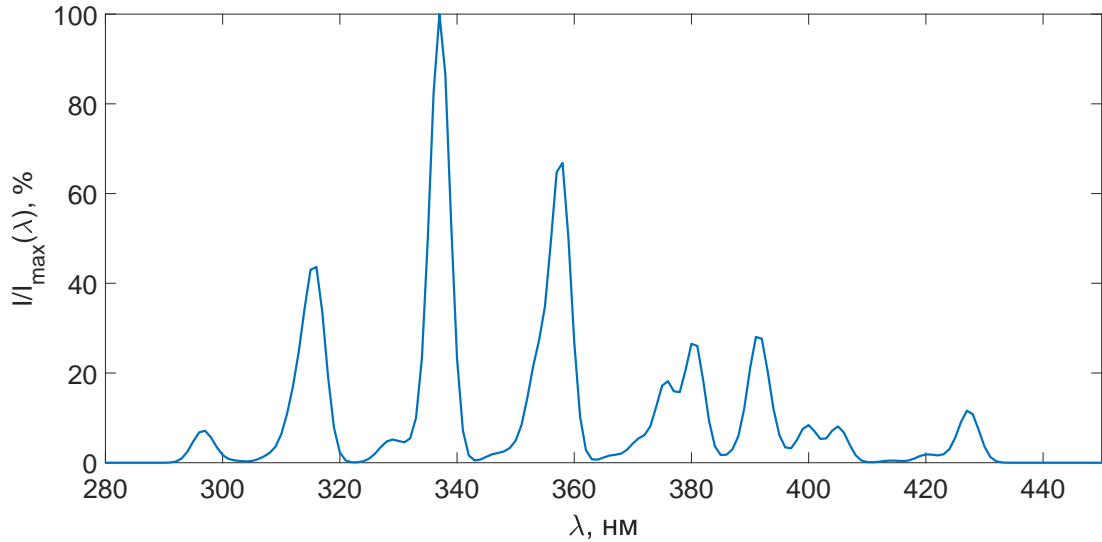


Рисунок 1.1. Спектр излучения молекулярного азота, по данным [6]

§ 1.4. Обзор основных экспериментов по регистрации ШАЛ высоких энергий

В настоящее время работают три обсерватории, регистрирующие оптические излучения ШАЛ от частиц КЛ сверхвысоких энергий: Якутская комплексная установка ШАЛ [7], Pierre Auger Observatory [8] и Telescope Array [9].

Якутская комплексная установка ШАЛ (ЯКУШАЛ) им. Д.Д. Красильникова расположена на реке Лене около деревни Октемцы (50 км к юго-западу от Якутска, в 100 м над уровнем моря). За время работы обсерватории ее максимальная площадь достигала 18 км². В центральной части телескопа сцинтилляционных детекторы расположены на расстоянии от 100 м до 250 м друг от друга, на периферии до 500 м друг от друга. В центральном круге 1 км расположены детекторы мюонов. Кроме того, установка включает в себя 35 детекторов ИВЧ ШАЛ, расположение которых нефиксированно (актуальная схема расположения не опубликована).

Обсерватория имени Пьера Оже (Pierre Auger Observatory) находится в западной Аргентине. Auger использует два типа детекторов: флуоресцентные телескопы (диаметр сферических зеркал 3,6 м) для регистрации флуоресцентного света ШАЛ и водяные баки объёмом 12 000 л, каждый из которых просматривается фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), для регистрации заряженной компоненты ШАЛ. Массив состоит из 1660 контейнеров, размещённых в узлах треугольной решетки с интервалом 1.5 км друг от друга, покрывая площадь в 3000 км². 27 флуоресцентных телескопов образуют 4 станции в кольце радиусом примерно 30 км.

Telescope Array — гибридный эксперимент, расположенный в штате Юта, США, также содержит два типа детекторов. Массив включает в себя более 500 наземных сцинтилляционных детекторов, покрывающих площадь 730 км². Эксперимент также включает в себя 38 флуоресцентных телескопов, объединённых в 3 станции (одна из станций — пересобранный на новом месте эксперимент HiRes).

В таблице 1.1 перечислены основные эксперименты, завершившие свою работу.

Таблица 1.1. Завершённые эксперименты в физике КЛ высоких энергий

Установка	Локация	Годы работы	Площадь регистрации	Метод
Haverah Park [10]	Англия	1964–1987	12 км ²	Регистрация ИВЧ ШАЛ в водном объёме
AGASA [11]	Япония	1990–2004	100 км ²	Регистрация заряженной и мюонной компоненты ШАЛ
Fly's Eye [12] Observatory	США	1981–1993	Площадь зависит от энергии	Регистрация флуоресценции ШАЛ
HiRes [13, 14]	США	1997–2006	Площадь зависит от энергии	Регистрация флуоресценции ШАЛ

§ 1.5. Источники оптического фона

Все эксперименты, регистрирующие оптические компоненты ШАЛ, должны выделять сигнал ИВЧ и флуоресцентного света ШАЛ над оптическим шумом (или фоном). Источники такого фона можно разделить на две группы: внеатмосферные (звёздный и зодиакальный свет) и атмосферные (собственное свечение верхней атмосферы, люминесценция (флуоресценция) компонентов воздуха под действием космических лучей низких энергий, метеоритов, атмосферных электрических разрядов и естественной радиации). Оценка вкладов различных источников шума приведена в работе [15], самые значимые: рассеянный звёздный свет — 30 %, собственное свечение ночной атмосферы — до 40 % и зодиакальный свет — 15 % (аналитические оценки этих вкладов в другой номенклатуре можно посмотреть в [16]). Вклады разных компонент оценены для видимой области спектра, для диапазона, в котором чувствительны ФЭУ проектируемого эксперимента, данные расходятся (см., например, [17, 18]). В той же работе [15] отдельно рассматривается вопрос

о влиянии облачного покрова на уровень перечисленных шумов. Для регистрации ИВЧ и флюоресцентного света подходят детекторы с диапазоном чувствительности менее 530 нм [19], поэтому возможные источники фоновой засветки в красной области видимой полосы не должны вносить существенных поправок в результаты экспериментов.

Разные оптические компоненты ШАЛ проходят разные пути в атмосфере, поэтому по-разному ослабляются рассеянием и поглощением. Флюоресцентный свет ШАЛ попадает на детектор примерно с той же высоты, на которой генерируется. Т.о. для него действует только ослабление за счет релеевского рассеяния и поглощения в тонком атмосферном слое. ИВЧ ШАЛ, в свою очередь, проходит путь до снежной поверхности, ослабляется поглощением и релеевским рассеянием, отражается от снежной поверхности (с альбедо порядка 95%) и проходит вторую часть пути до высоты детектора, повторно ослабевая. Аналогично, в оптических фонах две составляющие: фотоны, рассеянные релеевским рассеянием назад, попадающие напрямую в детектор, и фотоны, отраженные от снежной поверхности и вернувшиеся на уровень детектора, дважды пройдя приземный слой атмосферы.

ГЛАВА 2.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

§ 2.1. Моделирование ШАЛ

Для моделирования спектра излучения Вавилова-Черенкова ШАЛ в программном пакете CORSIKA 74000 [20] были использованы модели QGSJet-II [21–25] для описания взаимодействий адронов высоких энергий и Gheisha-2002d [26] для адронов низких энергий. Для расчёта электромагнитных каскадов в CORSIKA применяется модель EGS4 [27].

Параметры точки наблюдения были установлены соответствующими южному полюсу, магнитное поле 20,0 мкТ для горизонтальной составляющей и 42,8 мкТ для вертикальной составляющей [28].

Спектр ИВЧ ШАЛ моделировался в диапазоне 180 — 700 нм для первичных протонов p , ядер кислорода O и железа Fe с энергиями 10^{18} эВ, 10^{19} эВ, 10^{20} эВ и углами входа в атмосферу 0° — 40° с шагом 10° . Статистика для каждой точки указанной сетки параметров — 5 событий.

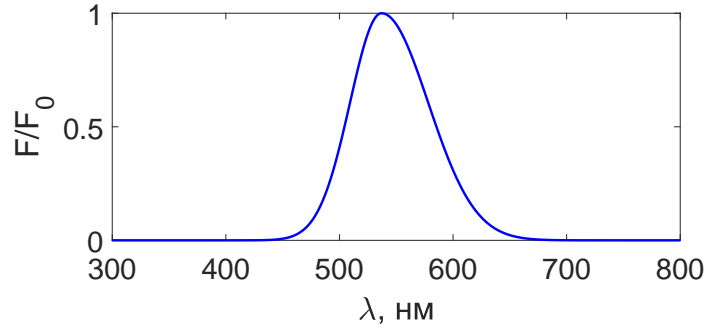
Входное окно детектора будем полагать равным $S = 1 \text{ м}^2$, поток фотонов в детекторе на высоте H оценивать как $\pi^{-1} I_0 \cdot S/H^2$, где I_0 — поток фотонов на уровне моря (для флюоресцентного света высота детектора будет считаться не от уровня моря, а от высоты максимума ливня, найденной из каскадной кривой).

§ 2.2. Звездный фон

Для вычисления оптического фона, даваемого свечением звездного неба, были взяты данные каталогов Yale Bright Star Catalog [29] для объектов ярче $2.5 m_V$, Tycho-2 Catalogue [30, 31] для объектов слабее $2.5 m_V$.

Количество фотонов, приходящих от каждого объекта, высчитывалось по формуле Погсона как $10^{(m_V/2.5)+6}$. Общее число фотонов, даваемое каждым объектом в полосе V , поправлялось на кри-

вую реакции фотометрической полосы V (рис.2.1). Нуль-пунктом шкалы величин служила звезда Вега (0^m спектрального класса $A0$), поток фотонов от которой в полосе V принимался равным 10^6 фот/м²/с.



Для вычисления потока фотонов от звёзд других спектральных классов полученная из формулы Погсона величина домножалась на отношение нормированных суммарных энергий поло-

Рисунок 2.1. Кривая реакции полосы V

сы V . Таким образом, вся процедура получения полного числа фотонов от звезды алгоритмизируется следующими этапами:

1. Нахождение параметров звезды. Звёздная величина объекта прямо указана в каталогах. Температуры объектов из Yale Bright Star Catalog рассчитывались по приведенным там же спектральным классам (шкала соответствия класса и температуры взята из [32], значения температур в промежуточных спектральных классах линейно проинтерполированы в логарифмическом масштабе). Температуры объектов из Tycho-2 Catalogue находилась по формуле (см. [31]):

$$T_e = 10^{(3.929883 - 0.360726 \cdot BV + 0.168806 \cdot BV^2 - 0.048300 \cdot BV^3)} \quad (2.1)$$

2. Аппроксимация спектра звезды спектром АЧТ и нормировка на полную энергию во всём спектре:

$$u(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} \bigg/ \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda; \quad (2.2)$$

Нижний предел $\lambda_{min} = 0$ нм. Верхний предел $\lambda_{max} = 2000$ нм взят как заведомо превосходящий границу рабочей области спектра для облегчения численного счёта.

3. Коррекция энергии внутри полосы V на Вегу (поправка на то, что при

одинаковой энергии внутри полосы звёзды разных спектральных классов будут иметь разное число фотонов в полосе):

$$Vega_correction = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} V(\lambda) \cdot u(\lambda) d\lambda / u_{Vega}; \quad (2.3)$$

где

$$u_{Vega} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi hc^2 \cdot V(\lambda)}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B \cdot 9602^\circ K}\right) - 1 \right]} d\lambda / \dots$$

$$\dots / \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi c \cdot V(\lambda)}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B \cdot 9602^\circ K}\right) - 1 \right]} d\lambda; \quad (2.4)$$

$V(\lambda)$ — кривая реакции полосы V .

4. Коррекция числа фотонов внутри полосы V на кривую реакции полосы (поправка на то, что внутри полосы для звёзд разных классов содержится разная доля фотонов от общего числа):

$$PhotNum_correction = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} V(\lambda) \cdot u_{ph}(\lambda) d\lambda; \quad (2.5)$$

где

$$u_{ph}(\lambda) = \frac{2\pi c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} / \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda; \quad (2.6)$$

u_{ph} — спектр звезды (АЧТ), пересчитанный к числу фотонов в $d\lambda$, т.е. нормированный на энергию фотона:

$$u_{ph}(\lambda) = \frac{u(\lambda)}{hc/\lambda} / \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{u(\lambda)}{hc/\lambda} d\lambda; \quad (2.7)$$

5. Получение окончательного спектра (по числу фотонов) от звезды:

$$I_{ph}(\lambda) = u_{ph}(\lambda) \cdot Vega_correction / PhotNum_correction; \quad (2.8)$$

Общий поток фотонов от каждой площадки небесной сферы находился

сложением потоков от принадлежащей площадке объектов. Спектр каждой площадки получался сложением спектров принадлежащих ей объектов, нормировался, аппроксимировался функцией Планка, откуда находилась эффективная температура площадки.

§ 2.3. Зодиакальный свет

В работе [33] предлагается численная модель распределения яркости зодиакального света от положения Солнца (рис. 2.2). Для использования в

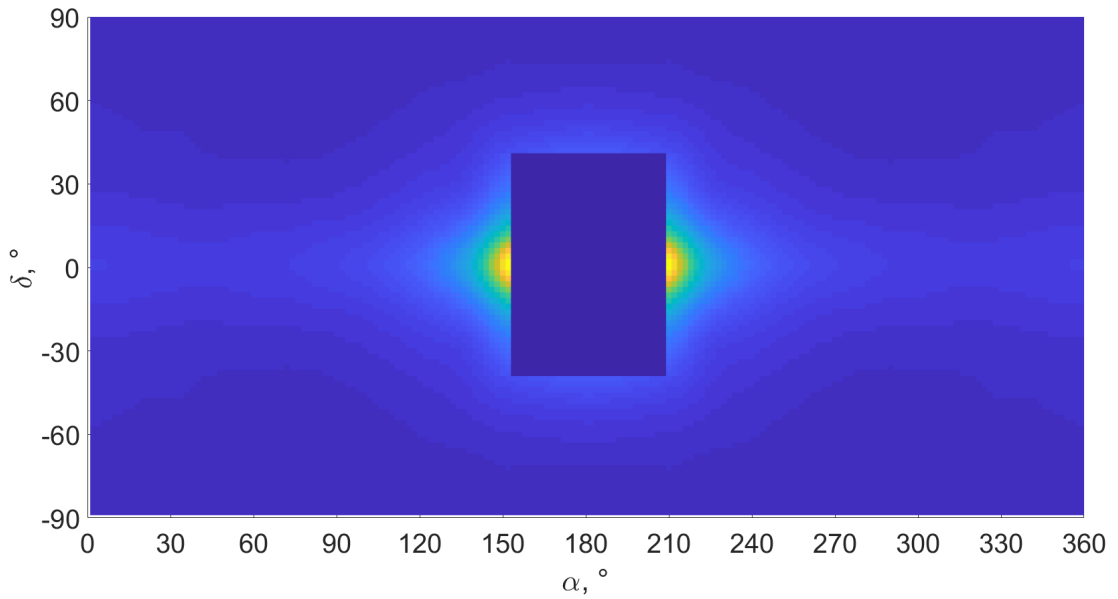


Рисунок 2.2. Распределение зодиакального света в эклиптических координатах
расчетах необходимо преобразование координат (рис. 2.3 после приведения к экваториальным координатам с $\Lambda_{\odot} = 50^\circ$):

$$\begin{aligned}\cos \delta \cos \alpha &= \cos \beta \cos(\Lambda - \Lambda_{\odot}); \\ \cos \delta \sin \alpha &= \cos \beta \sin(\Lambda - \Lambda_{\odot}) \cos \epsilon - \sin \beta \sin \epsilon; \\ \sin \delta &= \cos \beta \sin(\Lambda - \Lambda_{\odot}) \sin \epsilon + \sin \beta \cos \epsilon;\end{aligned}\tag{2.9}$$

где $\epsilon = 23^\circ 26'$ — наклон плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора.

Для оценки числа фотонов зодиакального света применялась процедура, описанная в п.2.2. Так как зодиакальный свет есть солнечный свет, рассеянный

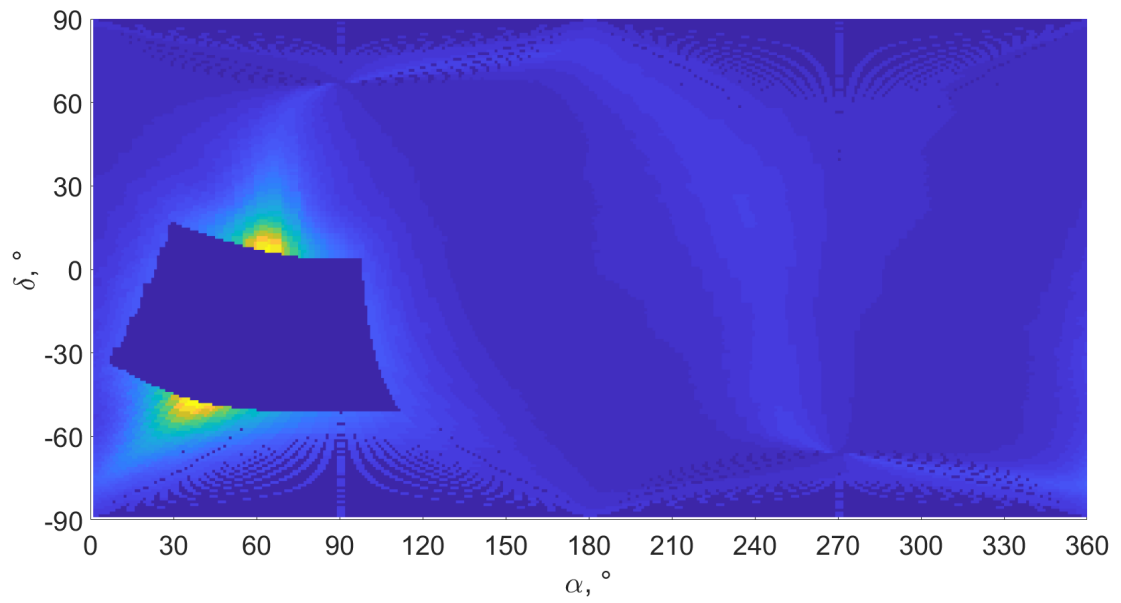


Рисунок 2.3. Распределение зодиакального света в экваториальных координатах

частицами пыли, лежащими в плоскости эклиптики, спектр зодиакального света в заданном диапазоне длин волн можно считать солнечным (см. [18]).

§ 2.4. Непрозрачность атмосферы

Вероятность прохождения фотонов с длиной волны λ с высоты h через атмосферу рассчитывается по формуле:

$$P = \exp(atm(h, \lambda) / \cos(\theta)), \quad (2.10)$$

где коэффициенты $atm(h, \lambda)$ приведены в CORSIKA в отдельном файле для высот 0—50 км с шагом 1 км и длин волн 180—700 нм с шагом 5 нм. Значения коэффициентов в промежуточных точках получаются линейной интерполяцией. Коэффициенты $atm(h, \lambda)$ учитывают ослабление светового потока из-за поглощения отдельными молекулами (O_2 , O_3 , H_2O_2 и др.), молекулярного (релеевского) рассеяния, рассеяния и абсорбции на аэрозолях. Подробно о физических механизмах процессов рассказывается в [34], процедура расчета и апробации коэффициентов освещена в [35].

§ 2.5. Учёт рэлеевского рассеяния

Доля упавшего потока фотонов I_0 , рассеянных в направлении θ определяется формулой:

$$I = I_0 S(\lambda, \theta, h), \quad (2.11)$$

$$S(\lambda, \theta, h) = \frac{\pi^2(n^2 - 1)^2}{2} \frac{\rho(h)}{N} \frac{1}{\lambda^4} (1 + \cos^2(\theta)), \quad (2.12)$$

где λ — длина волны света, θ — угол рассеяния, h — высота точки, $n = 1.00029$ — показатель преломления воздуха при нормальных условиях, $N = 2.504 \cdot 10^{25}$ — количество молекул на кубический метр стандартной атмосферы, $\rho(h)$ — коэффициент плотности (на уровне моря равно $\rho(h) = 1$ и экспоненциально уменьшается с увеличением h). Многократным рэлеевским рассеянием можно пренебречь. Коэффициент рэлеевского рассеяния $\beta(\lambda, h)$ обозначает долю света, теряемую из-за рассеяния после первого столкновения:

$$\beta(\lambda, h) = \frac{8\pi^3(n^2 - 1)^2}{3} \frac{\rho(h)}{N} \frac{1}{\lambda^4} \quad (2.13)$$

Количество света, сохранившегося после рассеяния после прохождения x метров через среду с постоянным коэффициентом рассеяния β , равно:

$$I = I_0 \exp \{-\beta x\}. \quad (2.14)$$

Последняя формула может использоваться для численного решения уравнения (2.11) на сеточной функции с шагом, в пределах которого β можно считать константой.

§ 2.6. Учет отражения от снежной поверхности

Свежий снежный покров является ортотропной (ламбертовой) поверхностью, т.е. отражает падающий свет в 2π (обоснование этого факта можно найти в [36]). Альбедо снежной поверхности можно считать слабо зависящим от длины волны и варьирующимся в пределах от 87% до 95%, что было показано в [37].

ГЛАВА 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

§ 3.1. Спектры ИВЧ ШАЛ

Сравнительные спектры ИВЧ ШАЛ для разных параметров первичной частицы (тип, энергия, угол входа в атмосферу) и положений детектора приведены на рис. 3.1,3.2,3.3. Видно, что положение детектора сказывается на коротковолновой области спектра, в то время как варьирование параметров первичной частицы на форму спектра не влияет. Здесь и далее спектры представлены в виде зависимости плотности распределения числа фотонов от длины волны, нормированной на суммарный поток фотонов, $[\text{нм}^{-1}]$.

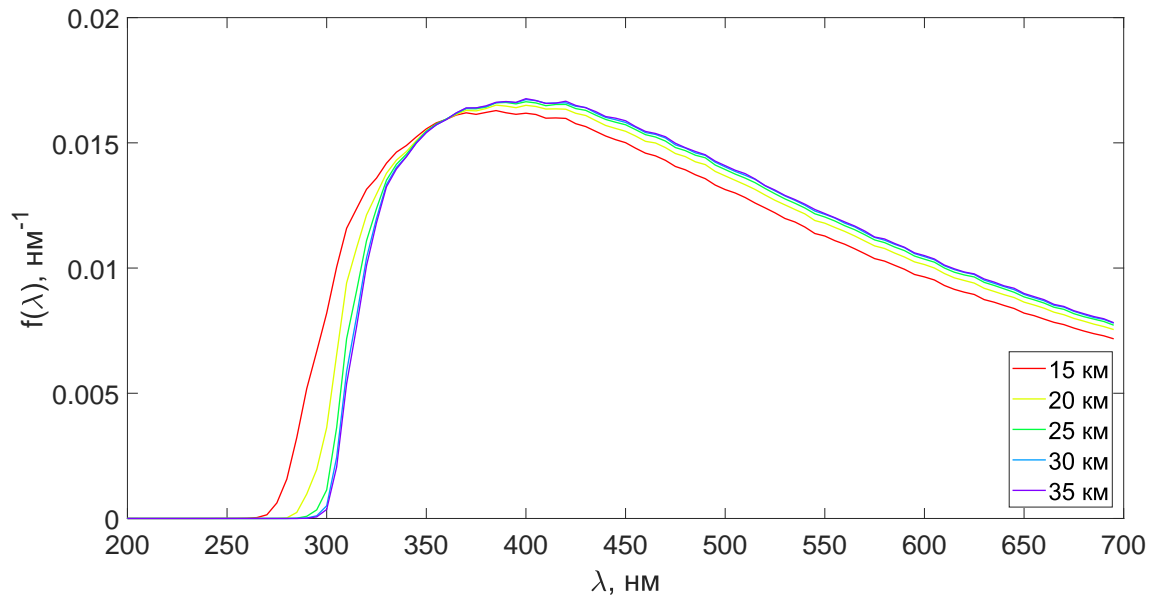


Рисунок 3.1. Спектральная плотность числа фотонов ИВЧ ШАЛ (Fe , 10^{19} эВ, 0°) для разных высот положения детектора

Оценки по порядку величины суммарного числа фотонов ИВЧ, приходящих за характерное время сбора сигнала 10 мкс на детектор на высоте 15 км, даны в таблице 3.1. Оценки по порядку величины суммарного числа фотонов ИВЧ на детекторе, находящемся на разных высотах, даны в таблице 3.2 (здесь и далее потоки приведены в единицах $[\text{число фотонов}/\text{м}^2/\text{с}]$).

Таблица 3.1. Оценка числа фотонов ИВЧ в детекторе, расположенном на высоте 15 км, от ШАЛ с первичными частицами разных типов и энергий

	p	O	Fe
10^{18} эВ	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$
10^{19} эВ	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^0$	$2-3 \cdot 10^0$
10^{20} эВ	$8 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$

Таблица 3.2. Оценка числа фотонов ИВЧ в детекторе, расположенном на разной высоте, от ШАЛ от первичных протонов

	15 км	20 км	25 км	30 км	35 км
10^{18} эВ	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$4 \cdot 10^{-1}$	$3 \cdot 10^{-1}$	$2-3 \cdot 10^{-1}$
10^{19} эВ	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^0$	$1-2 \cdot 10^0$	$1-2 \cdot 10^0$
10^{20} эВ	$8 \cdot 10^1$	$6-7 \cdot 10^1$	$6-7 \cdot 10^1$	$5-6 \cdot 10^1$	$5-6 \cdot 10^1$

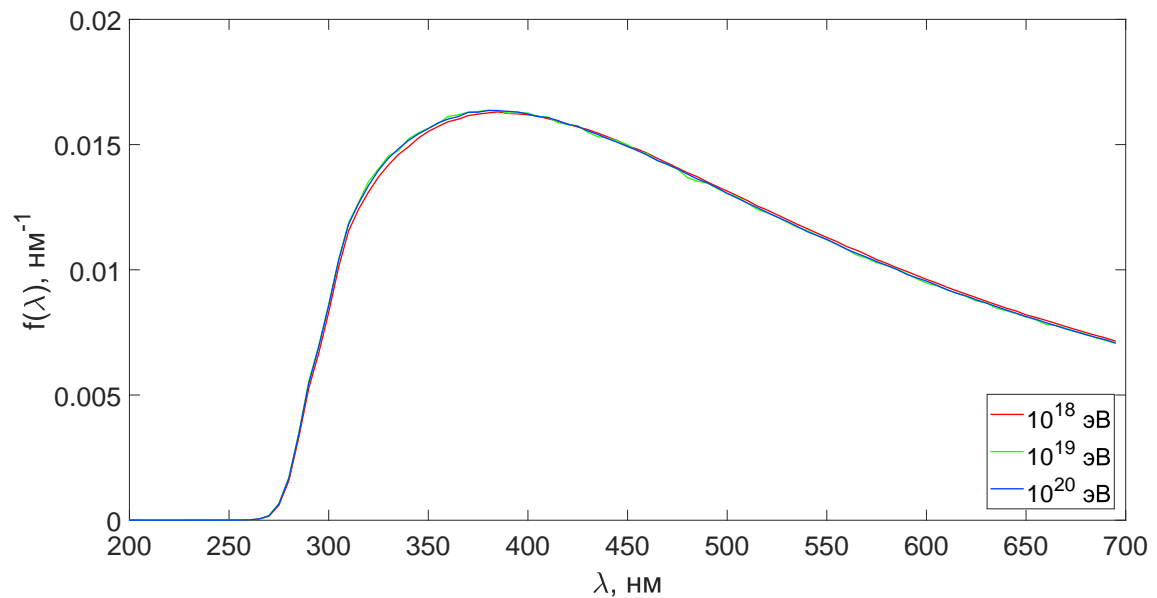


Рисунок 3.2. Спектральная плотность числа фотонов ИВЧ ШАЛ (p , 0° , детектор на 15 км) для разных энергий первичной частицы

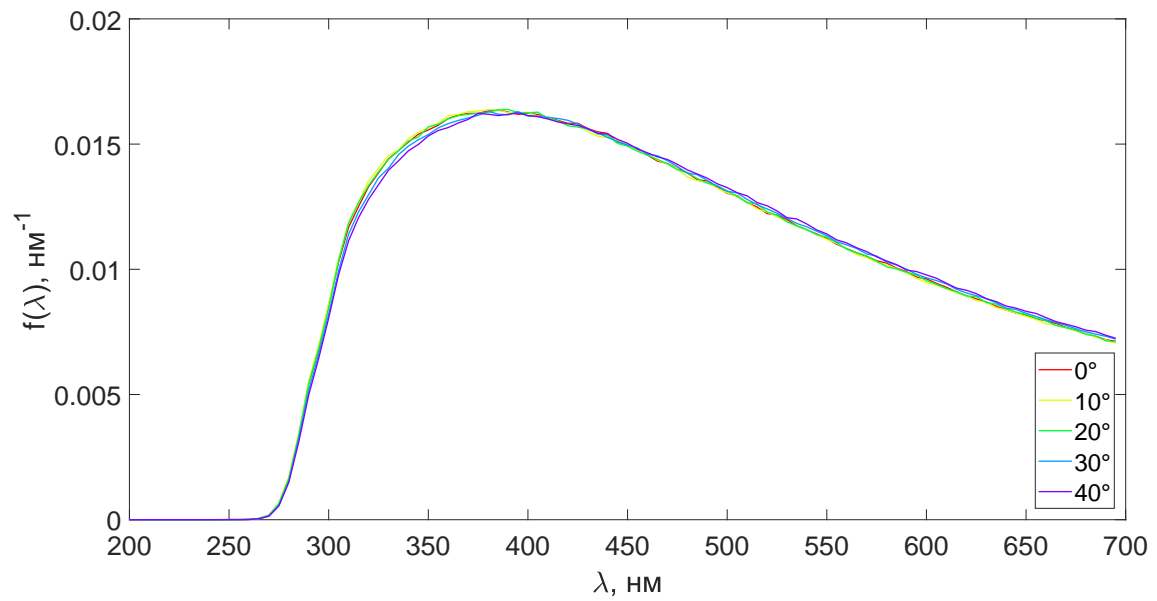


Рисунок 3.3. Спектральная плотность числа фотонов ИВЧ ШАЛ (p , 10^{19} эВ, детектор на 15 км) для разных углов входа в атмосферу первичной частицы

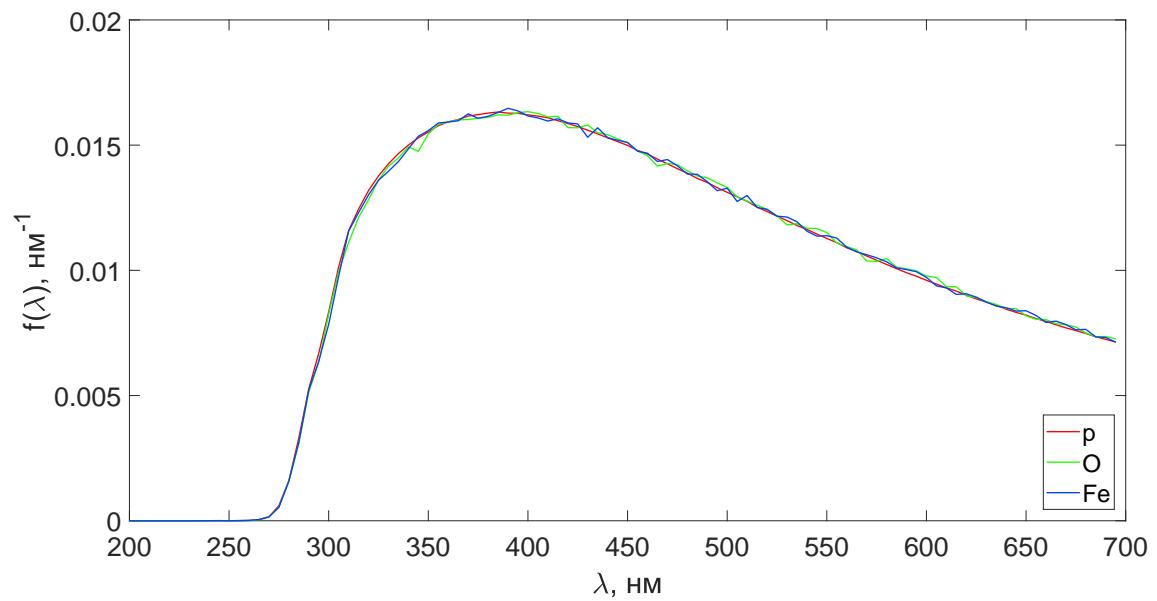


Рисунок 3.4. Спектральная плотность числа фотонов ИВЧ ШАЛ (10^{18} эВ, 0° , детектор на 15 км) для разных типов первичной частицы

§ 3.2. Спектры флуоресцентного света ШАЛ

Оценки по порядку величины суммарного числа фотонов флуоресцентного света, приходящих в детектор на уровне 15 км, даны в таблице 3.3. Оценки по порядку величины суммарного числа фотонов флуоресцентного света, приходящих за характерное время сбора сигнала 10 мкс в детектор, расположенный на разной высоте, даны в таблице 3.4. Сравнительные спектры флуоресцентного света ШАЛ для разных положений детектора приведены на рис. 3.5.

Таблица 3.3. Оценка числа фотонов флуоресцентного света детекторе, расположенном на высоте 15 км, от ШАЛ с первичными частицами разных типов и энергий

	p	O	Fe
10^{18} эВ	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^1$
10^{19} эВ	$4 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^1$	$2 \cdot 10^2$
10^{20} эВ	$6 \cdot 10^2$	$7 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^2$

Таблица 3.4. Оценка числа фотонов флуоресцентного света детекторе, расположенном на разной высоте, от ШАЛ от первичных протонов

	15 км	20 км	25 км	30 км	35 км
10^{18} эВ	$2-3 \cdot 10^1$	$1-2 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^0$	$1-2 \cdot 10^0$
10^{19} эВ	$4 \cdot 10^1$	$1-2 \cdot 10^1$	$1-2 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^0$
10^{20} эВ	$6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^1$

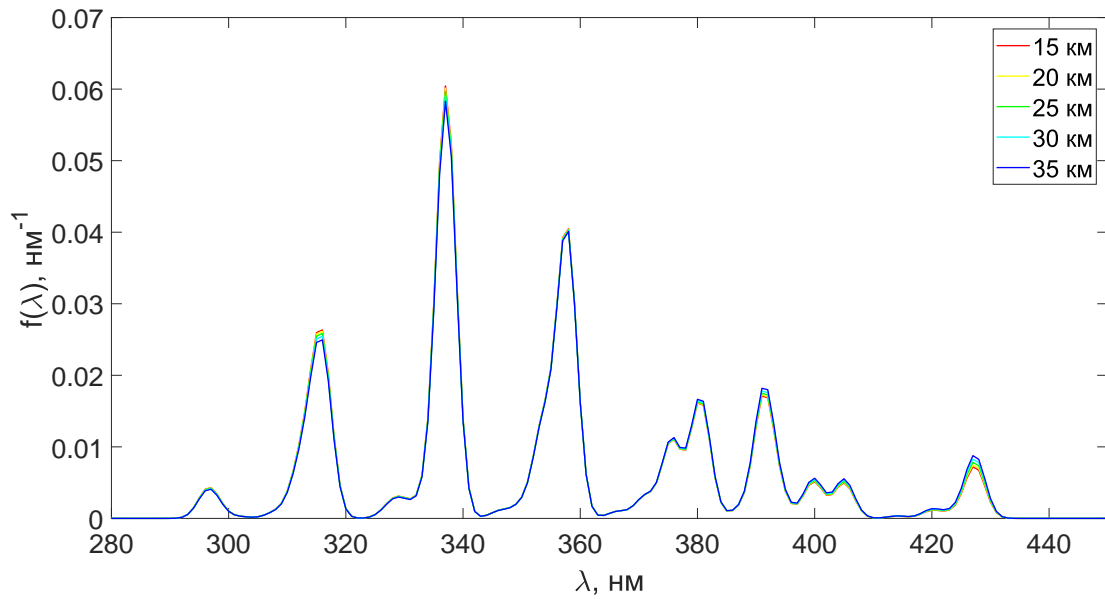


Рисунок 3.5. Спектр флуоресцентного света ШАЛ

§ 3.3. Звёздный фон

Распределение яркости звёздного фона показано на рис. 3.6, для наглядности отображения спектральной дифференциации различных площадок на рис. 3.7 показана эквивалентная температура, полученная аппроксимацией суммарного спектра данной площадки спектром АЧТ. Эквивалентная температура не несёт физического смысла.

Спектр звёздного фона после прохождения атмосферы представлен на рис. 3.8. Спектры звёздного фона, отраженного снежной поверхностью и дошедшего до разных уровней детектора, представлены на рис. 3.9.

Суммарный поток фотонов звёздного фона на уровне моря оценивается в $4 \cdot 10^{14}$ фотонов. На уровне детектора полный поток варьируется в пределах 2% при 15–30 км и оценивается в $3 \cdot 10^4$ фотонов (при $\lambda < 530$ нм полный поток составляет 10^4 фотонов).

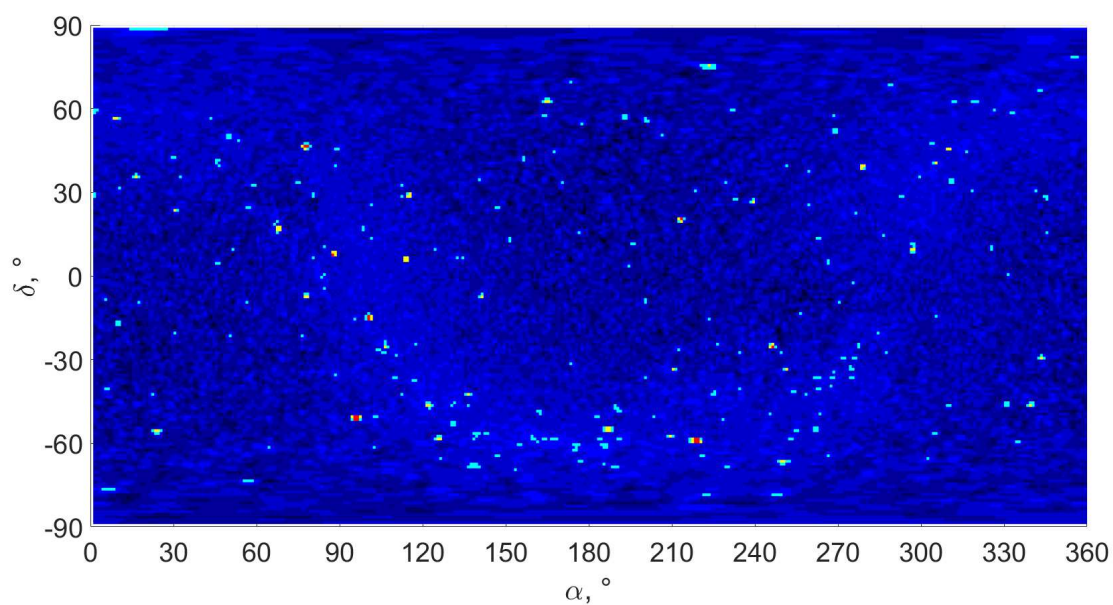


Рисунок 3.6. Распределение светимости звёздного фона в экваториальных координатах

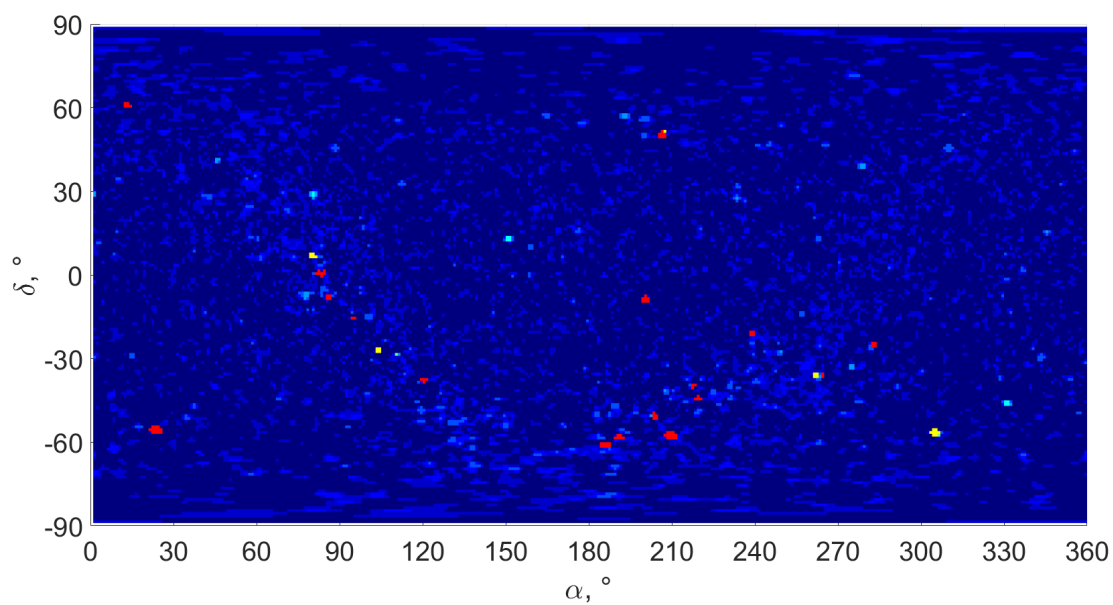


Рисунок 3.7. Распределение эффективной температуры звёздного фона в экваториальных координатах

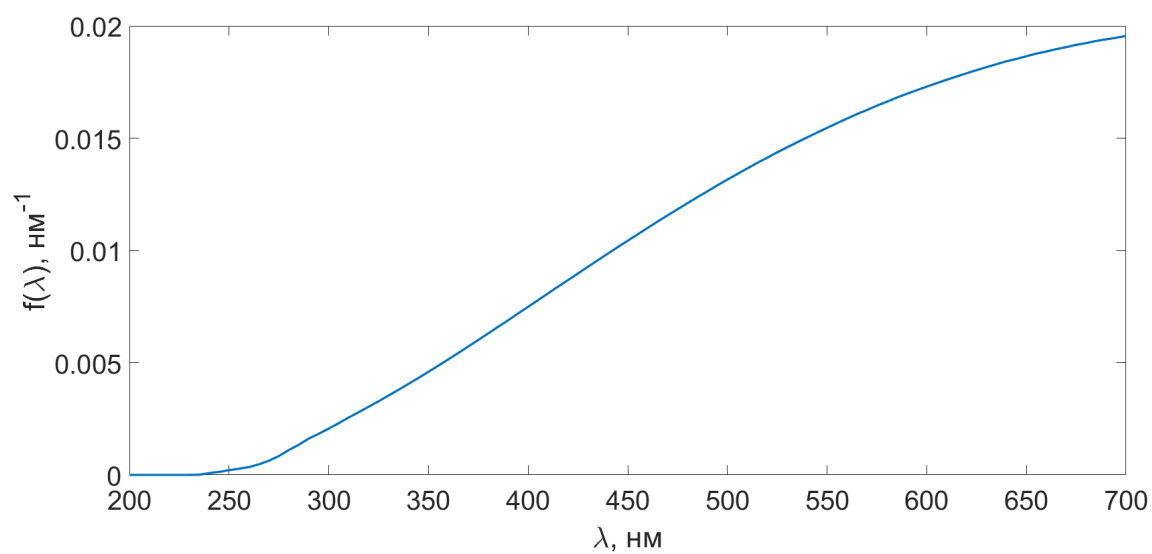


Рисунок 3.8. Спектральная плотность числа фотонов звёздного фона на уровне моря

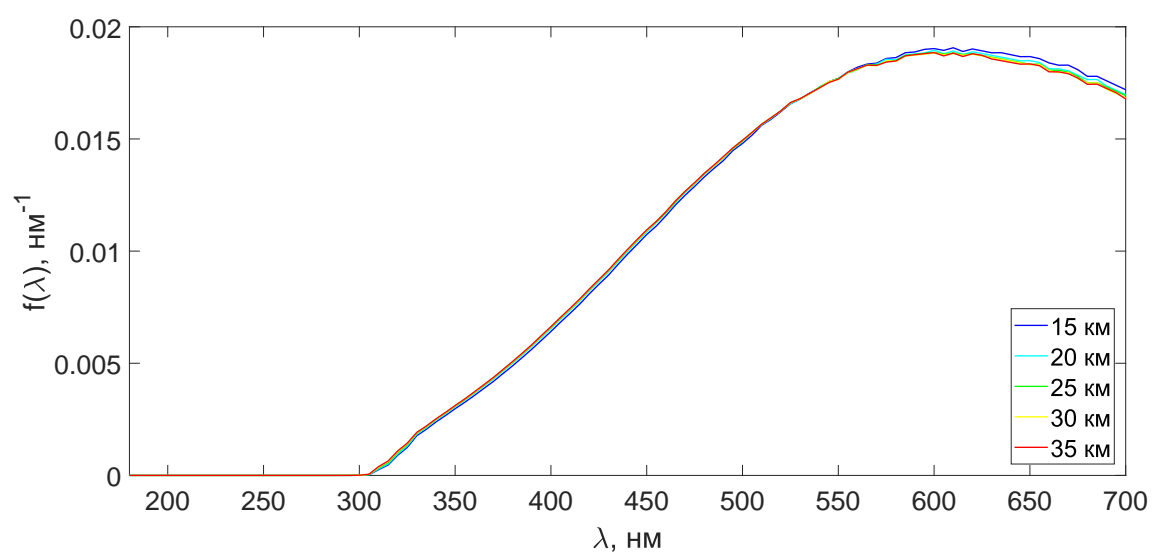


Рисунок 3.9. Спектр звёздного фона на разных высотах детектора как функция длины волны фотонов

§ 3.4. Зодиакальный свет

Спектр зодиакального света после прохождения атмосферы представлен на рис. 3.10.

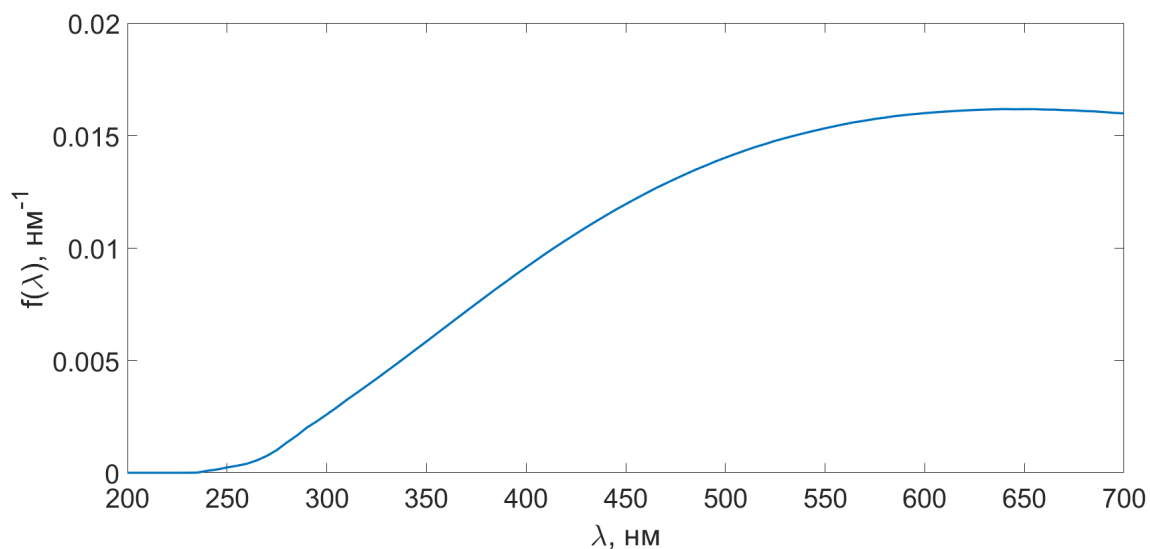


Рисунок 3.10. Спектральная плотность числа фотонов зодиакального света на уровне моря

Спектры зодиакального света, отраженного снежной поверхностью и дошедшего до разных уровней детектора, представлены на рис. 3.11

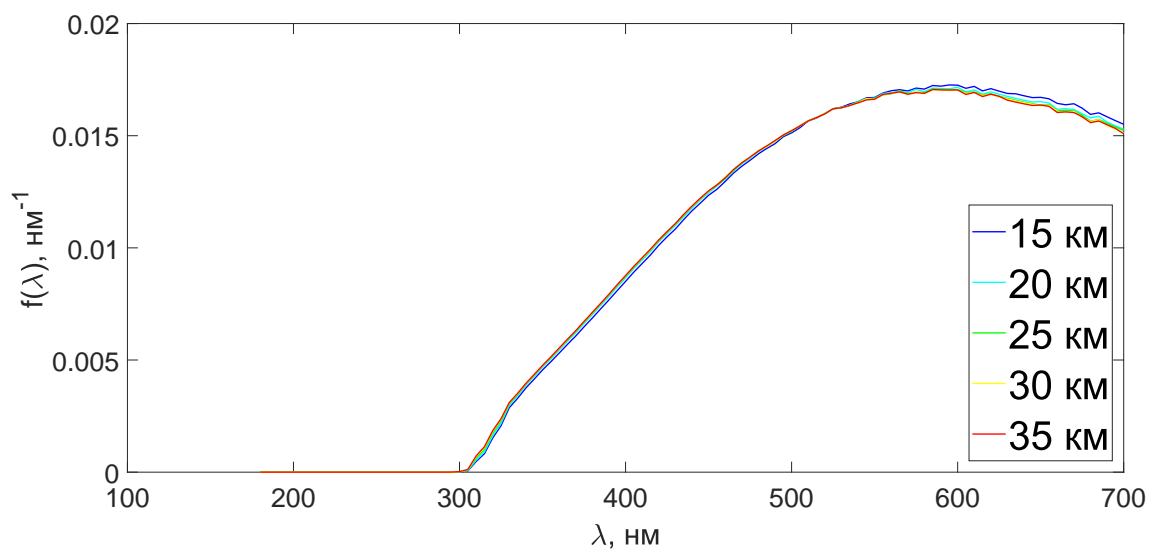


Рисунок 3.11. Спектр зодиакального света на разных высотах детектора как функция длины волны фотонов

При опускании центра солнечного диска на 28° под горизонт вариации суммарного потока зодиакального света составляют менее 10%, поэтому в условиях полярной ночи можно считать поток на поверхности постоянным.

Суммарный поток фотонов зодиакального света на уровне моря оценивается в $2 \cdot 10^{14}$ фотонов. На уровне детектора полный поток варьируется в пределах 1% при 15—30 км и оценивается в $2 \cdot 10^4$ фотонов (при $\lambda < 530$ нм полный поток составляет $8 \cdot 10^3$ фотонов).

§ 3.5. Собственное свечение атмосферы

Оценить величину собственного свечения атмосферы можно из факта, что собственное свечение имеет 22^m с квадратной секунды. Такая оценка дает величину порядка 10^8 фотонов/м²с, что существенно меньше оцененных выше шумов. Вклад собственного свечения атмосферы можно считать незначимым.

ВЫВОДЫ

1. Смоделированы спектры ИВЧ ШАЛ для первичных протонов p и ядер кислорода O и железа Fe с энергиями, 10^{18-20} эВ и углами входа в атмосферу $0^\circ-40^\circ$. Суммарный поток фотонов на детекторе от единичного ШАЛ на высоте 30 км оценивается в несколько штук (при полном потоке на высоте детектора порядка 10^{8-9} шт.), спектр ИВЧ ШАЛ не зависит от параметров первичной частицы, но становится более красным при увеличении высоты расположения детектора. Существенную роль в этом играет релеевское рассеяние;
2. Смоделированы спектры флюоресцентного света ШАЛ на той же сетке параметров. Суммарный поток фотонов в детекторе от единичного ШАЛ на высоте 30 км оценивается в единицы—сотни штук;
3. Получены угловое распределение и спектр звездного фона на уровне моря и различных высотах детектора. Спектр звёздного фона практически не модулируется суточным вращением Земли (из-за близости предполагаемого места проведения к полюсу), суммарный поток на уровне моря составляет $9 \cdot 10^{12}$ фотонов, на детектор попадает $3 \cdot 10^4$ фотонов;
4. Получены угловое распределение зодиакального света (с учетом преобразования координат к нужной точке поверхности) и его спектр на уровне моря и различных высотах детектора. Спектр зодиакального света более синий, чем спектр звёздного фона, полный поток фотонов на уровне моря оценивается в $5 \cdot 10^{12}$ фотонов, на детектор попадает $8 \cdot 10^3$ фотонов;
5. Оценена фотонная засветка, даваемая собственным свечением атмосферы, в условиях эксперимента её можно считать пренебрежимо малой;
6. Поток фоновых фотонов в детекторе превышает поток фотонов полезного сигнала, однако уровень фона (N штук в секунду), в то время как все фотоны ИВЧ и флуоресцентного света ШАЛ высвечиваются за десятки микросекунд. Это позволяет считать нижним порогом чувствительности эксперимента энергию 10^{19} эВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе приведены оценки сигнала и возможного шума в проектируемом эксперименте СФЕРА-А. Оценки суммарных потоков источников шума качественно совпадают с [15, 17]. Полученные выше спектры и оценки потоков полезного сигнала (ИВЧ и флуоресцентного света ШАЛ) и спектры и оценки потоков оптических фонов позволяют заключить, что спектр сигнала является существенно более синим. Для более точного моделирования откликов детектора на оптические излучения ШАЛ необходимо подробное моделирование самого детектора и учет пространственного распределения приходящих на уровень детектора фотонов.

Литература

1. РА Антонов, ТВ Аулова, ЕА Бонвеч, ВИ Галкин, ТА Джатдоев, ДА Подгрудков, ТМ Роганова, and ДВ Чернов. Регистрация отраженного черенковского света ШАЛ в эксперименте сфера как метод изучения космических лучей сверхвысоких энергий. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 46(1), 2015.
2. РА Антонов, ДВ Чернов, and ЮИ Стожков. Изучение энергетического спектра и массового состава первичных космических лучей в области энергий 1018-1020 эВ с помощью аэростатной установки в Антарктиде (проект Сфера-Антарктида). Краткие сообщения по физике Физического института им. ПН Лебедева Российской Академии Наук, (2):48–58, 2016.
3. Н.А. Добротин и др. Широкие атмосферные ливни космических лучей. Успехи Физических наук, т.XLIX(вып.2), 1953.
4. И.М.Франк и И.Е.Тамм. Когерентное излучение быстрого электрона в среде. Доклады Академии Наук СССР, (14 (3)):107, 1937.
5. A.M. Gaisser, T.K.; Hillas. Reliability of the method of constant intensity cuts for reconstructing the average development of vertical showers. Proc. of 15th Int. Cosmic Ray Conf, (8):353, 1977.
6. AIRFLY Collaboration. Measurement of the pressure dependence of air fluorescence emission induced by electrons. Astroparticle Physics, (28):41–57, 2007.
7. B.N. Afanasiev et al. Proc. of the tokyo workshop on techniques of the study of the extremely high energy cosmic rays. 1993.
8. J. Abraham et al. “properties and performance of the prototype instrument for the pierre auger observatory. In Nucl.Instrum.Meth., volume vol. A523, pp. 50–95,, 2004.
9. H Kawai, S Yoshida, H Yoshii, K Tanaka, F Cohen, M Fukushima, N Hayashida, K Hiyama, D Ikeda, E Kido, et al. Telescope array experiment. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 175(SUPPL.: COMPLETE):221–226, 2008.

10. C. B. A. McCusker et. al R. G. Brownlee. // . Proc.11th ICCR, 1970.
11. Kenji Shinozaki, Masahiro Teshima, Agasa Collaboration, et al. Agasa results. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 136:18–27, 2004.
12. D.J. Bird et al. Results from the fly’s eye experiment. American Institute of Physics, 1995.
13. T. Abu-Zayyad et. al. Status of the high resolution fly’s eye detector: Operation and installation. Proceedings of the 25th International Cosmic Ray Conference, 5:329, 1997.
14. T. Abu-Zayyad et al. The prototype high-resolution fly’s eye cosmic ray detector. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 450:253–269, 2000.
15. В.П. Будник, А.П. и Лунев. Свечение ночного неба. 2008.
16. Хвостиков И.А. Свечение ночного неба. Издательство Академии Наук СССР, Ленинград, 1937.
17. M. Bott-Bodenhausen et al. A new air cherenkov counter concept for the observation of extended air shower. Nuclear instruments and Methods in Physics Research A315, pages 236–251, 1992.
18. Ch. et al Leinert. The 1997 reference of diffuse night sky brightness. Astronomy and Astrophysics Supplement, 127:1–99, 1998.
19. Д. В. Чернов, Е. А. Бонвеч, Т. А. Джатдоев, Мир Фингер, Мих Фингер, В. И. Галкин, Г. К. Гарипов, В. А. Кожин, Д. А. Подгрудков, and А. В. Скурихин. Position-sensitive sipm detector for separation of cherenkov and fluorescent light of eas. PoS, (ICRC2017):1–8, 2017.
20. Dieter Heck, G Schatz, J Knapp, T Thouw, and JN Capdevielle. Corsika: A monte carlo code to simulate extensive air showers. Technical report, 1998.
21. N.N. Kalmykov and S.S. Ostapchenko. // . Phys. At. Nucl., 56(3):P. 346, 1993.
22. С.С. Остапченко и А.И. Павлов Н.Н. Калмыков. // . Изв. РАН. Сер. физ., 58(12):с. 21, 1994.

23. НН Калмыков, СС Остапченко, and АИ Павлов. Модель КГС с учетом струй и ШАЛ. Известия РАН, сер. физ, 58(9):21, 1994.
24. NN Kalmykov, SS Ostapchenko, and AI Pavlov. Quark-gluon-string model and eas simulation problems at ultra-high energies. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 52(3):17–28, 1997.
25. S.S. Ostapchenko. Qgsjet-ii: towards reliable description of very high energy hadronic interactions. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 151:143–146, 2006.
26. H Fesefeldt. Report pitha-85/02. RWTH Aachen, 647, 1985.
27. WR Nelson, H Hirayama, and DWO Rogers. The egs4 code system stanford linear accelerator center report slac-265, 1985.
28. P. Alken M. Nair A. Woods Chulliat, A. and S. Maus. The enhanced magnetic model 2015-2020. 2015.
29. Warren Jr W.H. Hoffleit D. The bright star catalogue. In Astronomical Data Center, volume NSSDC/ADC, 1991.
30. Hog E. et al. The tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. In Astronomy and Astrophysics, volume 355, L27, 2000.
31. Hog E. et al. Construction and verification of the tycho-2 catalogue. In Astronomy & Astrophysics, volume 357, 367, 2000.
32. C. de Jager and H. Nieuwenhuijzen. A new determination of the statistical relations between stellar spectral and luminosity classes and stellar effective temperature and luminosity. Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361), (1-2):217–227, 1987.
33. SM Kwon, SS Hong, and JL Weinberg. An observational model of the zodiacal light brightness distribution. New Astronomy, 10(2):91–107, 2004.
34. T. G. Kyle. Atmospheric Transmission, Emission and Scattering. Pergamon Press, Oxford, 1991.
35. Bernlöhr K. CORSIKA and SIM.TELARRAY — A package for the simulation of the imaging atmospheric Cherenkov technique and an investigation of

important environmental parameters for such simulations. HERGDA/HESS Internal Report, 1998.

36. Васильев А.В. Тимофеев Ю.М. Основы теоретической атмосферной оптики. Санкт-Петербург, 2007.
37. Т. Haar H. Korff, J. Gailiun. Radiation measurements over a snowfield at an elevated site. In NASA-CR-139674, volume N 74-31878, 1974.