

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**«Пространственная структура и вариации УФ свечения ночной  
атмосферы Земли по данным спутников “Вернов” и “Ломоносов”»**

Выполнил студент

214м группы

Куликов Иван Сергеевич

---

Научный руководитель:

Зав. лаб. Климов Павел Александрович

---

Допущен к защите

Зав. кафедрой

---

МОСКВА

2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
Глава 1. Свечение ночной атмосферы Земли в ультрафиолетовом диапазоне	5
1.1 Источники УФ излучения атмосферы Земли .....	5
1.2 Измерения УФ фона ночной атмосферы.....	7
1.2.1. Детекторы УФ излучения на борту спутников «Татьяна-1», «Татьяна-2».....	7
1.2.2. Зависимость УФ фона от фазы и положения Луны.....	10
1.2.3. Антропогенные источники в экспериментах «Татьяна-1» и «Татьяна-2».....	11
1.2.4. Стационарное свечение ночной атмосферы и области повышенной интенсивности по данным спутников «Татьяна-1» и «Татьяна-2».....	11
1.2.5. Результаты эксперимента GUVI.....	16
Глава 2. Пространственная структура УФ свечения по данным спутника «Вернов».....	19
2.1 Детектор УФ свечения на спутнике «Вернов».....	19
2.2 Измерение эффективного поля зрения прибора.....	20
2.3 Антропогенное свечение.....	25
2.4 Зависимость УФ свечения от фазы луны и облачного покрова Земли 26	
2.5 Зависимость УФ свечения от широты.....	28
2.6 УФ свечение в авроральной области.....	35
2.7 УФ свечение в экваториальной области .....	37
Глава 3. Области повышенного УФ свечения атмосферы по данным спутника «Ломоносов» .....	41
3.1 Детектор «ТУС» на спутнике «Ломоносов».....	41
3.2 Антропогенное свечение.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	51
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	53

## ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Земли и ближний космос образуют единую систему, в которой происходят разнообразные и взаимосвязанные процессы. Проблема воздействия космических излучений на атмосферу Земли – междисциплинарная, и находится на стыке таких направлений, как физика плазмы, солнечно-земная физика, оптика, физика атмосферы и метеорология, физика ионосферы и распространения радиоволн.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что УФ излучение является источником информации о процессах, происходящих в атмосфере Земли и воздействии на нее внешних факторов. Например, по УФ излучению полярных регионов можно судить о состоянии магнитосферы, которая в свою очередь тесно взаимосвязана с процессами на Солнце.

В исследованиях космических лучей предельно высоких энергий атмосфера Земли служит огромным калориметром, в котором развиваются электромагнитные и ядерных процессы, проявляющие себя в том числе и в флуоресцентном УФ свечении. Для регистрации КЛ ПВЭ со спутников уровень и вариации УФ фона определяют условия (время экспозиции, порог регистрации) работы детекторов. Также для спутниковых экспериментов необходимо знать пространственное распределение УФ свечения, характерные области повышенного УФ излучения.

Целью данной работы является поиск областей повышенного и фонового УФ свечения, его пространственного распределения и вариации.

Во время выполнения данного исследования были решены следующие задачи:

- проведен отбор данных и написано программное обеспечение для поиска областей повышенного УФ свечения
- сделан анализ УФ свечения на высоких широтах (авроральный регион) и его динамики (ширины аврорального овала и интенсивности излучения)

- проведен отбор данных спутника «Ломоносов» для анализа областей антропогенного УФ свечения
- проведен анализ частотного спектра сигналов антропогенного УФ свечения по данным спутника «Ломоносов».

Работа состоит из трех частей. В первой приведен обзор литературы, в частности описаны источники УФ излучения, обсуждаются результаты предшествующих экспериментов по измерению фона УФ излучения и его вариаций, выделены основные области повышенного УФ свечения. Во второй части описан эксперимент по измерению эффективного поля зрения детектора, а также приведен анализ пространственной структуры УФ свечения. Третья часть посвящена данным спутника «Ломоносов» и проблеме антропогенного свечения.

## Глава 1. Свечение ночной атмосферы Земли в ультрафиолетовом диапазоне

### 1.1 Источники УФ излучения атмосферы Земли

Излучение атмосферы Земли в широком диапазоне длин волн является важным объектом исследования, поскольку несет информацию о разнообразных физических явлениях, определяемых как составом и структурой самой атмосферы, так и факторами, воздействующими на нее. Атмосфера является частью крупной системы и взаимосвязана с процессами, происходящими на поверхности Земли, в ближнем космосе (магнитосфере), на Солнце и более того, постоянным проникновением галактических и внегалактических космических лучей высоких энергий (КЛПВЭ). Существует ряд методик по регистрации КЛПВЭ посредством измерения флуоресцентного и черенковского свечения, производимого широким атмосферным ливнем (ШАЛ). Примерами таких экспериментов являются наземные гибридные установки Обсерватория Пьера Оже[1] и TelescopeArray[2], космические детекторы «ГУС» [3] и «КЛПВЭ»[4], которые используют флуоресцентное свечение ШАЛ, установка «Тунка» [5] и баллонный эксперимент СФЕРА[6], для которых основным источником информации является излучение Вавилова-Черенкова. Для таких экспериментов УФ свечение самого ШАЛ является источником информации о типе, направлении и энергии первичной частицы, а детальная информация о других источниках свечения позволяет правильно проектировать детекторы, рассчитать время экспозиции, порог по энергии. В этом плане, исследование УФ фона ночной атмосферы является и важным методическим аспектом для проектов по исследованию космического излучения. Для космических экспериментов важно иметь информацию о глобальном распределении УФ свечения, знать его пространственные и временные вариации.

Исследованию УФ свечения ночной атмосферы Земли было посвящено достаточно много наземных (в любом крупном эксперименте по регистрации КЛ ПВЭ), баллонных (BABY, NIGHTGLOW)[7] и космических экспериментов (Татьяна-1, Татьяна-2, Вернов, GUVI). Последние дают информацию по распределению свечения по всему земному шару.

Можно выделить следующие основные группы источников УФ свечения ночной атмосферы:

1) Антропогенные – свечение городов и наземной инфраструктуры, а также излучение верхних слоев атмосферы за счет техногенного влияния [8].

2) Природные, разделяемые на типы по временному характеру:

- транзиентные (быстро протекающие, от долей мс до нескольких секунд): молниевые разряды, высоко атмосферные транзиентные явления, метеоры, излучение ШАЛ.

- постоянные: рассеянный свет Луны и звезд, собственное свечение атмосферы за счет рекомбинации ионов в верхних слоях, авроральное свечение, излучение при взаимодействии с высыпавшимися частицами, свечение экваториальной аномалии. Таки образом, постоянные источники можно тоже классифицировать как по времени вариации (свет Луны меняется с характерным периодом месяц, рекомбинация в верхних слоях имеет суточных ход, т.к. связана с ионизацией солнечным излучением), так и по источнику излучения (собственное свечение атмосферы – свечение под действием внешнего фактора, например, потока заряженных частиц). Все типы постоянных и транзиентных свечений наблюдались на первых научно-образовательных спутниках МГУ «Татьяна-1» и «Татьяна-2», а также на спутнике «Вернов», но с большей статистикой благодаря усовершенствованной телеметрической системе.

Данная работа посвящена исследованию стационарного свечения ночной атмосферы Земли по данным КА «Вернов», экспериментальному обнаружению областей повышенного свечения по данным спутниковых измерений, сравнению с предыдущими экспериментами и объяснению причин возникновения этих областей.

## 1.2 Измерения УФ фона ночной атмосферы

Измерению фона УФ свечения на сегодняшний день было посвящено достаточно много экспериментов. Среди них спутниковые эксперименты МГУ: «Космос-45»[9], «Университетский-Татьяна»[10], «Университетский-Татьяна-2»[11], «Вернов»[12] и «Ломоносов»[13], космический эксперимент GUVI на спутнике TIMED[14]. Обработка данных спутников «Вернов» и «Ломоносов» является предметом данной работы. В обзоре приведем результаты других названных экспериментов.

### 1.2.1. Детекторы УФ излучения на борту спутников «Татьяна-1», «Татьяна-2»

«Университетский - Татьяна»- спутник, запущенный 20 января 2005 с космодрома Плесецк в честь празднования 250-летия Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. По данным спутника было проведено первое исследование пространственного распределения свечений ночного неба. «Университетский-Татьяна-2» - космический аппарат для изучения очень энергичных вспышек происходящих в верхних слоях атмосферы в ультрафиолетовом диапазоне. Космический аппарат был запущен 17 сентября 2009 с космодрома Байконур ракетой-носителем «Союз-2.1б». Несмотря на то, что спутник проработал 4 месяца, на нём был получен ряд неожиданных результатов о природе световых транзиентов в верхних слоях атмосферы.

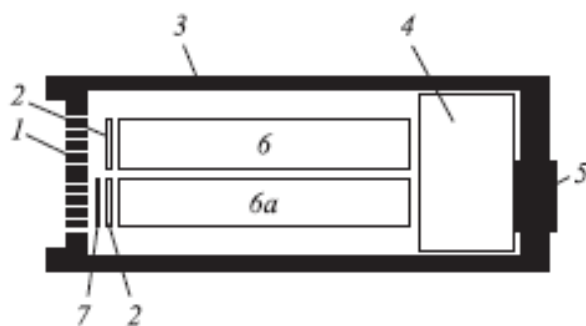


Рисунок 1.2.1 Детектор УФ и ИК излучения[15]

На обоих спутниках был установлен детектор излучения атмосферы Земли, на первом аппарате только в УФ диапазоне (300-400 нм), на втором – в УФ и красном – инфракрасном (600-800 нм)[15]. Схема прибора на спутнике «Татьяна-1» приведена на рисунке 1.2.1, где 1- коллиматор, 6,6а- фотоэлектронные умножители (ФЭУ) Hamamatsu R1463 с соответствующими фильтрами (2). Первый ФЭУ предназначен для изучения оптического излучения, второй для регистрации света, возникшего при прохождении заряженных частиц в стеклянных элементах детектора. 3-корпус детектора, 4-блок электроники, 5-разъем силового и информационного кабеля, 7– крышка (в случае спутника «Татьяна-2» данная крышка отсутствует для регистрации ИК). Полоса пропускания окна ФЭУ ограничена светофильтрамиУФС-1 и КС-11.Поле зрения каждого из детекторов  $16^\circ$  и ориентировано в надир. При вертикальном падении луча эффективная площадь фотокатода составляет  $0,4 \text{ см}^2$ , и падает до нуля при зенитном угле около  $24^\circ$ . Измерения проводились раз в минуту на спутнике «Татьяна-2» и на один виток для «Татьяна-1». Детекторы измеряли как транзистентные УФ и ИК вспышки, так и проводили мониторинг интенсивности излучения атмосферы на ночной стороне. Аналогичный прибор, но с другим временным разрешением был установлен на спутнике «Вернов». Сравнительная характеристика детекторов приведена в таблице 1

Таблица 1. Сравнительная характеристика детекторов УФ и ИК излучения (ДУФ) на спутниках «Татьяна-1», «Татьяна-2» и «Вернов»

	«Татьяна-1»	«Татьяна-2»	«Вернов»
Высота орбиты, км	930	850	650-830
Поле зрения, км	250	240	180 - 240
Временное разрешение	16 мкс 64 мкс	1 мс	0,5 мс
Длина развертки	4 мс 64 мс	128 мс	128 мс
Диапазон длин волн	240 - 400 нм	240 - 400 нм 600 - 800 нм	240 - 400 нм 600 - 800 нм
Период записи	1 раз на виток	1 раз в минуту	1 раз в 4 с

ДУФ измерял интенсивность УФ излучения от минимальных значений в ночные часы  $2 \cdot 10^7$  фотон/(см<sup>2</sup>·с·ср) до максимальных значений  $10^{13}$  фотон/(см<sup>2</sup>·с·ср) на дневной стороне, что дало возможность проводить измерения интенсивности УФ свечения как в области полярных сияний с большой интенсивностью, так и в экваториальной области, где значения интенсивности минимальны.

Важные особенности детекторов:

✓ Ток анода ФЭУ сохраняется постоянным, вследствие работы системы автоматической регулировки усиления ФЭУ (при измерении интенсивности свечения высокое напряжение ФЭУ подстраивается под фон);

✓ Запись информации в виде цифровых осциллограмм с разным временным разрешением за счет цифрового интегрирования сигнала.

Далее опишем основные результаты наблюдений на спутниках «Татьяна-1» и «Татьяна-2»

### 1.2.2. Зависимость УФ фона от фазы и положения Луны

Наиболее мощным источником УФ излучения ночной атмосферы Земли является рассеянный свет Луны. На спутнике «Татьяна-1»[16] были проведены длительные измерения (в течение 2-х лет) интенсивности УФ излучения в зависимости от фазы Луны и получена зависимость, показанная на рисунке 1.2.2. После достижения луной 70% фазы, интенсивность значительно увеличивается в 5-6 раз и достигает максимума в полнолуние.

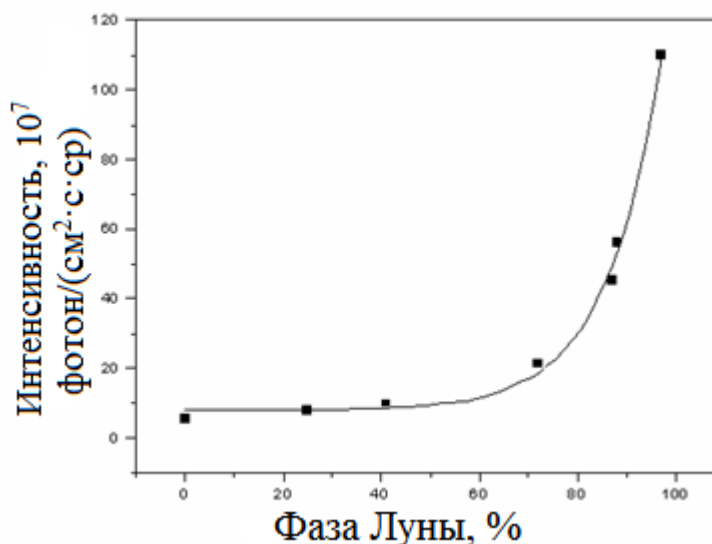


Рисунок 1.2.2 Зависимость интенсивности УФ излучения от фазы луны[16]

Вблизи полнолуния,  $\pm 7$  дней, спутник фиксирует не только существенное повышение УФ фона атмосферы, а также большие его вариации, связанные с переотражением свечения Луны от облачного покрова

Земли. Слабая зависимость УФ свечения от фазы от 0 до 50 % объясняется тем, что Луна находится за горизонтом наблюдения и поэтому, практически не оказывает влияния на интенсивность.

### 1.2.3. Антропогенные источники в экспериментах «Татьяна-1» и «Татьяна-2»

При анализе данных обнаружены постоянные, повторяющиеся от пролета к пролету и находящиеся в одном и том же месте на поверхности Земли, превышения УФ фона, которые в большинстве случаев происходят в районе больших промышленных центров и городов. На рисунке 1.2.3 приведен пример одного ночного витка по данным спутника «Татьяна-1» [17], на котором видны несколько антропогенных источников. На графике показана зависимость интенсивности от времени вдоль траектории космического аппарата. Как видно из этого графика зарегистрировано превышение УФ фона на 800 секунде и на 1000 секунде. На основе данных можно заключить, что это города с координатами  $19^\circ$  северной широты  $99^\circ$  западной долготы и  $30^\circ$  северной широты  $97^\circ$  западной долготы, что соответствует Мехико и Хьюстону.

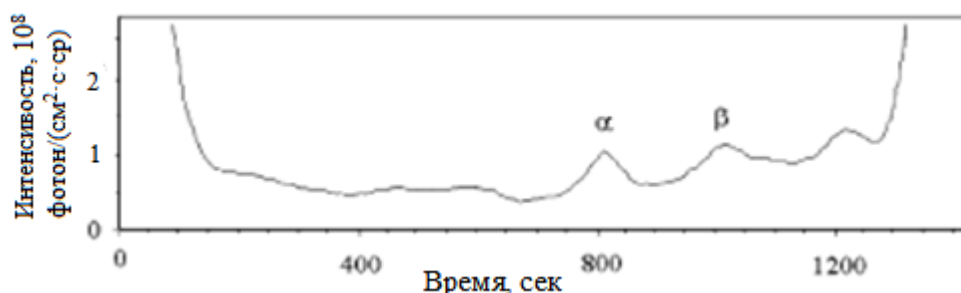


Рисунок 1.2.3 Пример антропогенного УФ свечения ночной атмосферы Земли, где α и β- Мехико и Хьюстон, соответственно [17].

### 1.2.4. Стационарное свечение ночной атмосферы и области повышенной интенсивности по данным спутников «Татьяна-1» и «Татьяна-2»

На рисунке 1.2.4.1 показана карта интенсивности УФ свечения атмосферы в безлунные ночи, полученная за период с 20 октября 2009 года по 16 января 2010 года в эксперименте на спутнике «Татьяна-2». Можно выделить «темные» районы Земли (над океанами и пустыней Сахара) и «светлые» (в основном районы, связанные с человеческой деятельностью, в особенности большие города). Интенсивность над океанами и над пустыней Сахара  $I=3\cdot 5\cdot 10^7$  фот/см<sup>2</sup>·с·ср, в то время как над США  $I=1\text{--}2\cdot 10^8$  фот/см<sup>2</sup>·с·ср. Во время полной луны интенсивность увеличивается и составляет  $I=10^9$  фот/см<sup>2</sup>·с·ср.

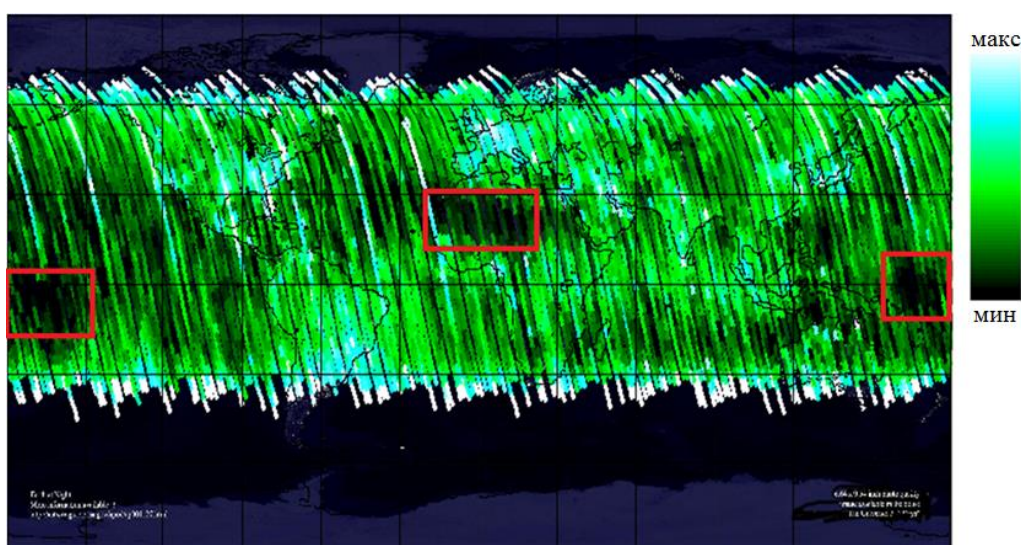


Рисунок 1.2.4.1 Карта интенсивности УФ свечения атмосферы Земли, полученная для безлунных ночей по данным спутника «Татьяна-2» [15]. Цветовая шкала соответствует следующим значениям интенсивности:

мин -  $3\cdot 10^7$  фотон/см<sup>2</sup>·ср·с, макс -  $5\cdot 10^9$  фотон/см<sup>2</sup>·ср·с.

В работе [18] был проведен анализ данных спутника «Татьяна-1» на предмет поиска областей повышенного УФ свечения, не связанного с антропогенным фактором и корреляции этих областей с геомагнитными координатами. На рисунке 1.2.4.2 показано географическое распределение областей повышенного УФ свечения, полученное в этой работе.

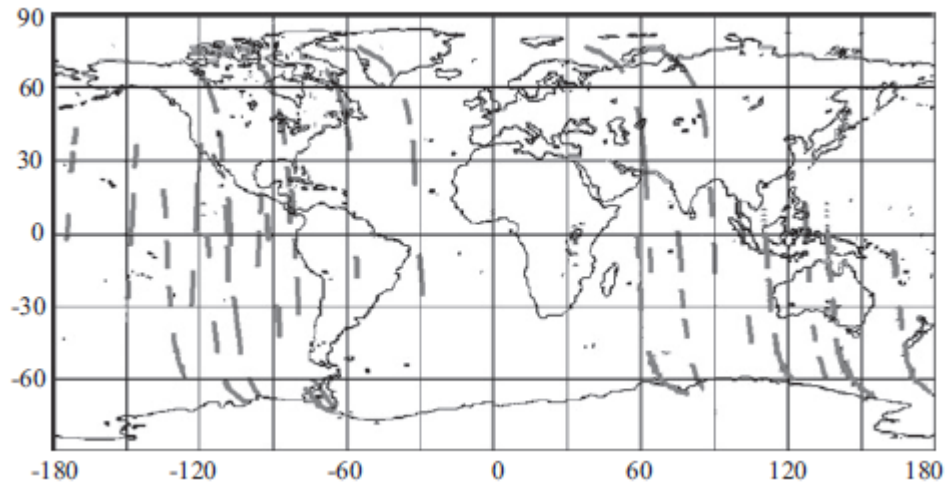


Рисунок 1.2.4.2 Географическая карта УФ свечений. [18]

На этой карте видно, что часть событий может быть отнесена к авроральному региону, но также есть часть событий, распределенная вдоль геомагнитного экватора  $\pm 10-20^\circ$ . Результаты получены при обработке измерения в безлунные ночи, антропогенные источники исключены из анализа. На рис.1.2.4.3 и 1.2.4.4 приведено распределение измерений с повышенным УФ излучением по геомагнитной широте и L-оболочке.

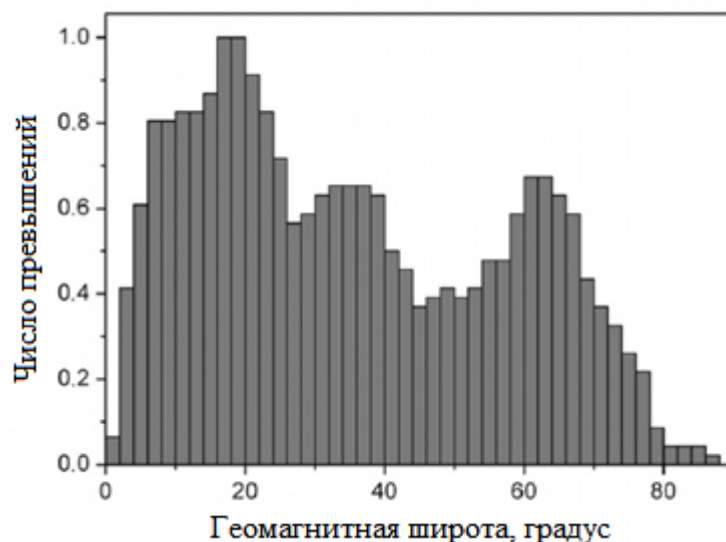


Рисунок 1.2.4.3 Зависимость числа превышений интенсивности УФ свечения над уровнем фона от геомагнитной широты. [18]

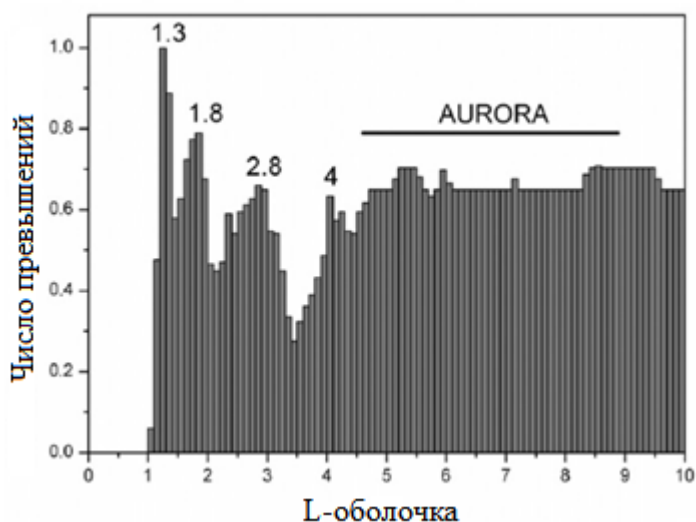


Рисунок 1.2.4.4 Зависимость числа превышений интенсивности УФ свечения над уровнем фона от L-оболочки.[18]

В работе [18] обнаружены четыре максимума УФ излучения на L-оболочках  $L < 4$  при индексе геомагнитной активности  $K_p$  в диапазоне от 3 до 6. Как видно из рисунка 1.2.4.3 можно выделить три пика: на низких широтах  $20^\circ$ , на средних широтах  $30^\circ$ - $40^\circ$  и на высоких широтах  $>60^\circ$ . Для более детального анализа средних широт было построено распределение по L-оболочкам, показанное на рисунке 1.2.4.4. Это распределение имеет 5 максимумов  $L=1.3$ ,  $L=1.8$ ,  $L=2.8$ ,  $L=4$  и  $L=5$ .

На высоких широтах ( $L > 5$ ), широкий максимум УФизлучения - результат авроральных высыпаний и возможно, влияние внешнего радиационного пояса (в области Lot 5 до 6). При магнитных бурях наблюдается увеличение аврорального овала. Его происхождение связывают со свечением верхних слоёв атмосферы вследствие их взаимодействия с заряженными частицами солнечного ветра, проникающими в верхнюю атмосферу из хвоста магнитосферы. Интенсивность порядка 1 кРл согласуется с другими наблюдениями. Интенсивность излучения 1 Рл соответствует эмиссии  $10^6$  фотонов за одну секунду в столбе сечением  $1 \text{ см}^2$  ( $1 \text{ Рл} = 10^6 \text{ фотонов}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ).

Пик УФ излучения с интенсивностью 1 кРл при  $L \sim 4$  возможно соответствует максимуму от взаимодействия частиц из внешнего радиационного пояса, который рассматривается как источник интенсивного высыпания энергичных электронов, и атмосферы Земли.

На самых низких широтах, повышение интенсивности ультрафиолетового излучения совпадает с областью экваториальной аномалии. Тем не менее, УФ излучение от экваториальной аномалии во время спокойных геомагнитных условий очень слабое (десятки Рл) и, следовательно, не может объяснить наблюдаемое увеличение УФ порядка сотен Рл. Следует отметить, что в данном случае УФ свечение наблюдалось при слегка возмущенных геомагнитных условиях.

Была рассмотрена гипотеза о том, что свечения на  $L < 5$  связаны с высыпаниями частиц из внутреннего радиационного пояса Земли. Однако, показано, что известные потоки заряженной компоненты при модельном предположении выхода флуоресценции, основанного на работе [19] не могут вызвать свечения той интенсивности, которое наблюдается на эксперименте.

Возможный источник УФ свечения на низких и средних широтах - энергичные нейтральные атомы (ЭНА) высыпающиеся в верхние слои атмосферы от кольцевого тока в спокойное время из-за перезарядки [20]. Было показано, что высыпание ЭНА производит УФ излучение от возбуждения линий ионизованного молекулярного азота при 391,4 нм, что увеличивает УФ излучение постепенно от 1 Рл на низких широтах до нескольких десятков Рл на средних широтах в области 50-60°, и соответствует диапазону L-оболочек от 2.5 до 4. Поэтому высыпание ЭНА может объяснить обильное УФ излучение, наблюдаемое при  $L = 2.8$  и 4. Однако постепенное широтное изменение свечения, связанное с ЭНА, не может объяснить дискретную структуру повышений УФ при  $L = 1.8, 2.8$  и 4. Кроме того, интенсивность этого излучения очень мала по сравнению с наблюдаемыми превышениями УФ. С другой стороны, УФ свечения с

интенсивностями до нескольких сотен Рл на низких и средних широтах соответствует мезосферной эмиссии атомарного кислорода. Интенсивность этого излучения пропорциональна квадрату плотности кислорода. Изменения плотности атомов кислорода могут быть выявлены как вариации оптического свечения мезосферы. Максимумы эмиссии наблюдались на геомагнитных широтах 20-40° обоих полушарий. Широта максимума возрастает с увеличением местного времени от заката до рассвета. В работе [21] также показали большой объем скорости эмиссии кислорода на 35° географической широты в обоих полушариях для зимнего солнцестояния и весеннего равноденствия. Лу и его коллеги показали, что усиление эмиссии кислорода мезосферы в тропиках (20-40°) имеет суточные и полугодовые вариации и становится более заметной после полуночи во время равноденствий [22]. Эти результаты указывают на то, что вертикальная адвекция, связанная с такими атмосферными процессами, как приливы и крупномасштабная циркуляция, играет важную роль в пространственной и временной вариации мезосферного свечения. Таким образом, максимумы УФ излучения на 20° (L=1.3) и на 35° (L=1.8) геомагнитной широты соответствуют географическим регионам УФ свечений связанных с эмиссией кислорода. Происхождение УФ излучения на средних широтах ( $2 < L < 4$ ) до сих пор неясно и требует дальнейших исследований ночного неба, как в УФ, так и в оптическом диапазоне.

#### 1.2.5. Результаты эксперимента GUVI

TIMED (Термосфера Ионосфера Мезосфера Энергетика и Динамика) - является орбитальной миссией посвященной изучению динамики мезосферы и нижней термосферы. Миссия была запущена с базы ВВС Ванденберг в Калифорнии 7 декабря 2001 года на борту ракеты-носителя Delta II. GUVI (The Global Ultraviolet Imager) - инструмент на борту TIMED, который измеряет спектральное сияние далекого ультрафиолетового свечения Земли в

спектральной области от 120 до 180 нм с использованием кросс-трекового сканирующего спектрометра[14].

В экваториальной аномалии, высокие плотности ионосферных ионов приводят к УФ излучению. Яркость излучения зависит от плотности электронов и концентрации ионов кислорода. Есть небольшой вклад в излучение от взаимной нейтрализации ионов кислорода.

На рисунке 1.2.5 показаны данные за 23 марта 2002 года (день 82) (верхний график) и 24 марта 2002 года (день 83) (нижний график). Это изображение показывает излучение ночной ионосферы на длине волны свечения атомарного кислорода 135,6 нм. Экваториальный фонтан эффект производит дуги (в виде зеленых полос) по обе стороны от магнитного экватора (экваториальная аномалия). Сильные белые полосы сверху и снизу изображения указывают на наличие Авроры.

Изучение экваториального свечения было начато в работе [23]. В 1969 году исследованы две продольные дуги слабого ультрафиолетового излучения, которые довольно симметрично расположены относительно геомагнитного экватора. Спектрометры были установлены на спутнике OGO 4 и регистрировали ультрафиолетовое излучение на длинах волн 130,4 нм и 135,6 нм (линии излучения атомарного кислорода). Широты наблюдаемых дуг приблизительно  $15^\circ$  к северу и югу от геомагнитного экватора, а их интенсивность составляет порядка 100 Рл. Хикс Г. Т. и Т. А. Чааб отметили, что интенсивность дуг не коррелировала с магнитной активностью, определяемой индексом  $K_p$ . Предполагается, что это УФ свечение возникает из-за рекомбинации ионов кислорода[24].

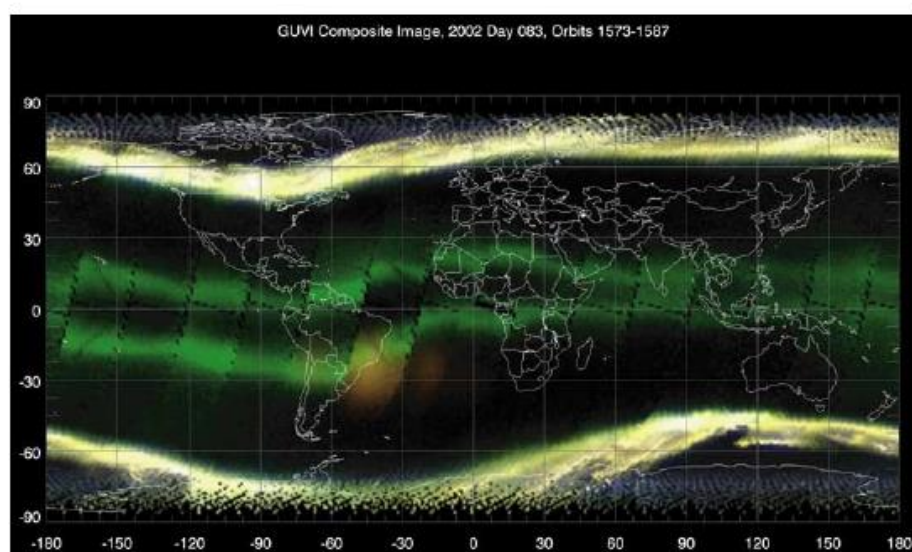
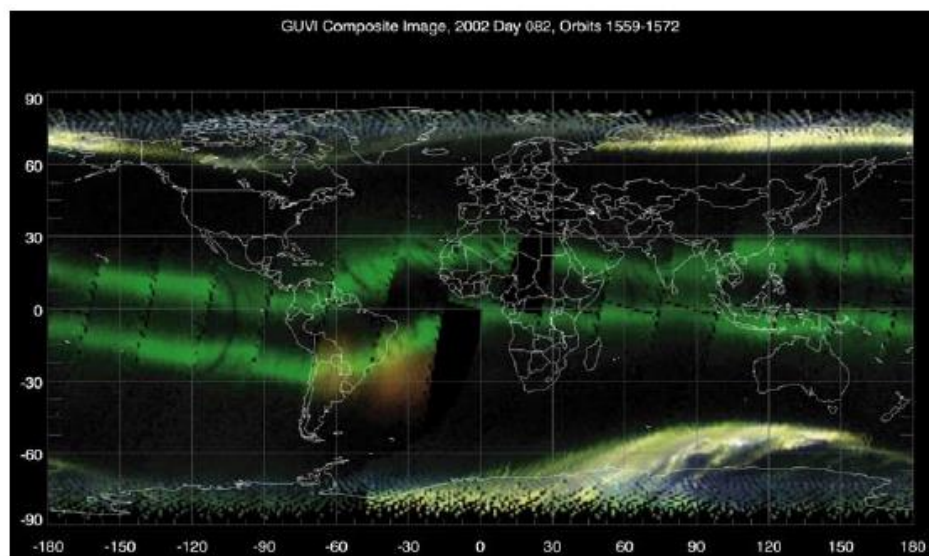


Рисунок 1.2.5 Данные о ночной ионосфере за 23 марта 2002 года (верхний рисунок) и 24 марта 2002 года (нижний рисунок)[14].

## Глава 2. Пространственная структура УФ свечения по данным спутника «Вернов»

### 2.1 Детектор УФ свечения на спутнике «Вернов»

«Вернов» — российский спутник, созданный в рамках программы «Малые космические аппараты для фундаментальных космических исследований». Первый сеанс связи со спутником состоялся 8 июля в 21 час 30 минут (МСК). Первое включение комплекса научных приборов «РЭЛЕК», установленного на спутнике, произошло 16 июля в 17 часов 38 минут (UTC). Космический аппарат был переименован в честь выдающегося советского учёного С. Н. Вернова, одного из первооткрывателей радиационных поясов Земли. На его борту установлен комплекс научной аппаратуры «РЭЛЕК». Комплекс состоит из рентгеновского и гамма-спектрометра (ДРГЭ-1 и ДРГЭ-2), детектора электронов по трем направлениям (ДРГЭ-3), детектора ультрафиолетовых и оптических вспышек (ДУФ), низкочастотных и радиочастотных анализаторов электромагнитного поля и радиоволн (НЧА и РЧА), прибора для получения оптического изображения (МТЕЛ-2).

Одна из научных задач комплекса - исследование транзиентных явлений в атмосфере Земли, в частности, изучение временных и спектральных характеристик атмосферных всплесков в ультрафиолетовом и красном диапазоне. С этой целью был установлен прибор ДУФ, который измерял свечение ночной атмосферы Земли в УФ (240-400 нм) и ИК (610-800 нм) диапазонах. Прибор - аналог прибора УФИК на спутниках «Татьяна-1» и «Татьяна-2» (см. 1.2.1). Важной особенностью является различная частота срабатывания триггера для этих экспериментов. Так для спутника «Вернов» она составляет 4,5 секунды, для спутника «Татьяна-2» - одна минута, а для «Татьяна-1» - один виток (см. таблицу 1).

Принципиальная схема работы электроники приборов на всех трех спутниках в целом одинакова. В обоих детекторах есть система автоматической регулировки усиления (АРУ), которая подстраивает

коэффициент усиления ФЭУ под условия фонового свечения атмосферы Земли путем изменения высокого напряжения. Система АРУ удерживает среднее значение кода АЦП на постоянном уровне (на спутнике «Вернов»  $N_{уф.ср}=36$ ). АРУ позволяет измерять интенсивность фонового УФ и КИК излучения в широком диапазоне интенсивности от  $\sim 10^7$  до  $\sim 10^{12}$  фотонов/см<sup>2</sup>·с·ср.

Электронный триггер выбирает самый большой УФ сигнал в шаге постоянно действующего цифрового осциллографа за интервал времени 4,5 секунды. По команде триггера осциллограмма выбранного события переводится в главную память детектора, и затем все данные, накопленные в этой памяти, передаются на Землю.

Информация о событии записывается в виде кода  $M$  высокого напряжения ФЭУ и кодов  $N$  осциллограмм АЦП. Эти данные позволяют рассчитать количество фотонов транзитного события, попавших в детектор, и среднюю интенсивность излучения атмосферы.

В упрощенном виде интенсивности УФ и ИК излучения для спутника «Вернов» можно рассчитать так:

$$I_{уф}(N,M) = N_{уф} \cdot 4,6 \cdot 10^{24} / M^{8,3} \quad (1)$$

$$I_{ик}(N,M) = N_{ик} \cdot 9,2 \cdot 10^{25} / M^{8,3}$$

Регистрация УФ излучения происходила как на ночной, так и на дневной стороне орбиты спутника благодаря работе системы АРУ. Однако измерения возможно только на ночной стороне в виду слишком высокого порога днем.

## 2.2 Измерение эффективного поля зрения прибора

При сравнении результатов, полученных на спутниках, с литературными данными удобно представлять данные детекторов о полном

числе фотонов в атмосфере  $Q_a$ , которое вычисляется в предположении изотропного излучения источника, находящегося на расстоянии  $R$  от орбитального детектора.

$$Q_a = \Sigma i(N, M) \cdot 4\pi R^2 / pS(\theta) \quad (2)$$

-здесь  $\Sigma$  - сумма значений  $i(N, M)$  числа фотоэлектронов, проходящих через фотокатод ФЭУ за один такт измерений,  $p$ -квантовая эффективность катода ФЭУ,  $S$  - эффективная площадь УФ детектора, зависящая от угла падения  $\theta$ .

Зависимость эффективной площади УФ детектора  $S$  от угла падения  $\theta$  может быть найдена как площадь пересечения двух окружностей, находящихся на расстоянии  $\delta$  друг от друга, причем  $\delta$  зависит от угла падения. На рисунке 2.2.1 изображено отверстие коллиматора с диаметром  $d$  и высотой  $h$ . Из рисунка 2.2.1 видно, что  $\delta = h \cdot \text{tg}(\theta)$ .

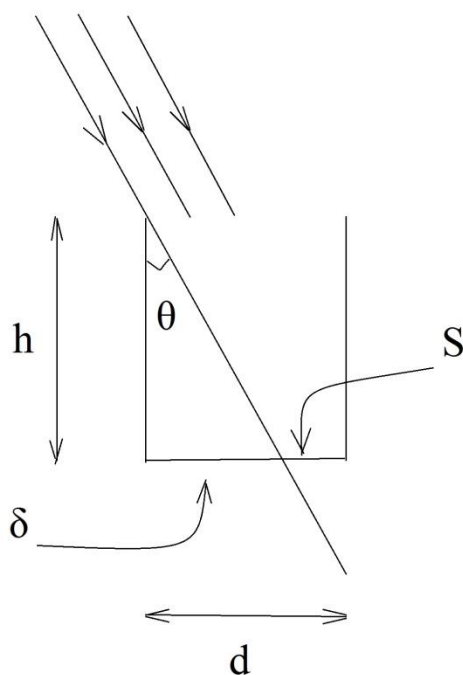


Рисунок 2.2.1 Ход лучей в коллиматоре.

При нулевом угле падения  $\delta=0$  и эффективная площадь достигает максимального значения (см. рис.2.2.2). Чем больше угол падения  $\theta$ , тем больше  $\delta$  и тем меньше эффективная площадь  $S$ .

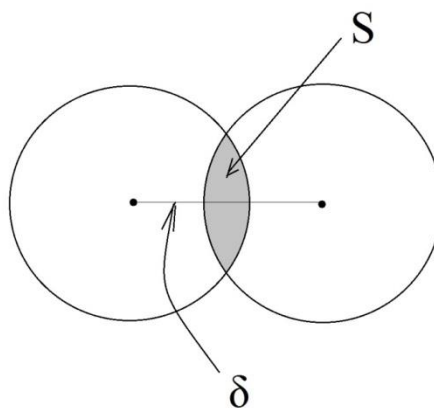


Рисунок 2.2.2 Эффективная площадь УФ детектора  $S$  как площадь пересечения двух окружностей радиуса  $r$ , находящихся на расстоянии  $\delta$  друг от друга, причем  $\delta$  зависит от угла падения

Площадь пересечения двух окружностей равного радиуса  $r$ , находящихся на расстоянии  $\delta$  друг от друга, может быть найдена по формулам:

$$s = r^2 \cdot (F - \sin(F)), F = 2 \cdot \arccos(\delta/2r) \quad (3)$$

Соотношение  $S(\theta)/S(0^\circ)$ , полученное таким простым геометрическим расчетом можно найти по формуле:

$$\frac{S(\theta)}{S(0^\circ)} = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ 2 \cdot \arccos\left(\frac{h}{d} \cdot \operatorname{tg}(\theta)\right) - \sin\left(2 \cdot \arccos\left(\frac{h}{d} \cdot \operatorname{tg}(\theta)\right)\right) \right\} \quad (4)$$

-где  $\delta=h \cdot \operatorname{tg}(\theta)$ ,  $d=2r$  и  $S(0^\circ)=\pi r^2$ . График этой зависимости представлен на рисунке 2.2.3 (сплошная красная кривая). Как и ожидалось, кривая имеет максимум при  $\theta=0$ , и эффективная площадь уменьшается при увеличении угла падения.

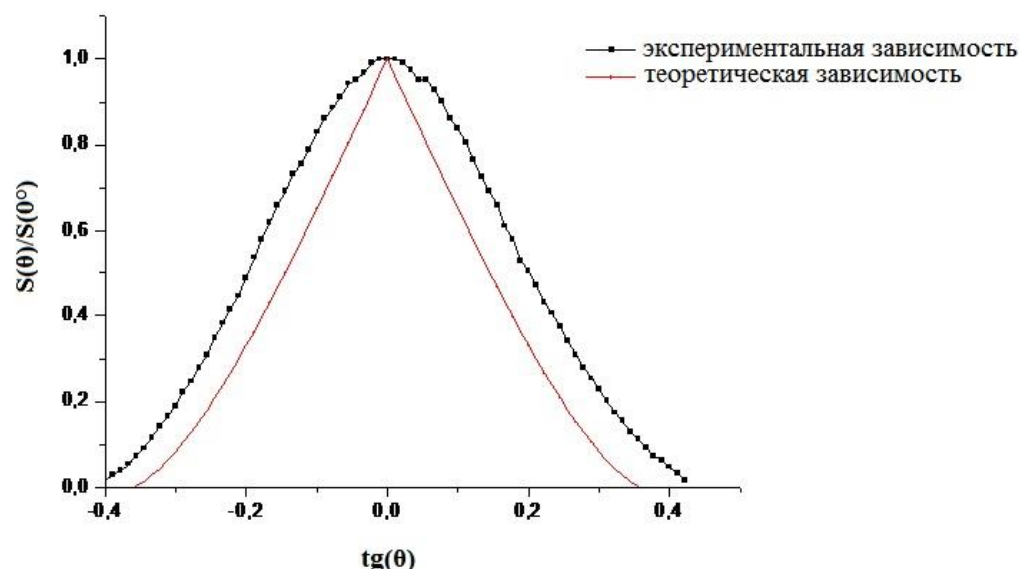


Рисунок 2.2.3 Экспериментальная и теоретическая зависимость эффективной площади УФ детектора от угла падения.

Для проверки модельных расчетов и более корректного расчета поля зрения прибора было проведено экспериментальное исследование зависимости эффективной площади детектора от зенитного угла. Для этого использованы:

- Коллиматор - углепластиковая пластина с 57 отверстиями, высотой 2,2 мм и диаметром отверстий - 0,8 мм.
- Источник света - светодиод NSHU550, УФ свечение ( $375 \pm 6$ ) нм, импульсный режим (длительности импульса 10 мкс, интервал 100 мс).
- ФЭУ Hamamatsu R1463.

Схема эксперимента представлена на рисунке 2.2.4. ФЭУ(3) жестко фиксируется и перед его окном помещается коллиматор(1). Изменение угла падения происходит за счет перемещения источника света(2). Источник света – светодиод, угловая зависимость светимости которого показана на рис. 2.2.5. (интенсивность излучения уменьшается в 2 раза при угле больше чем  $55^\circ$ ).

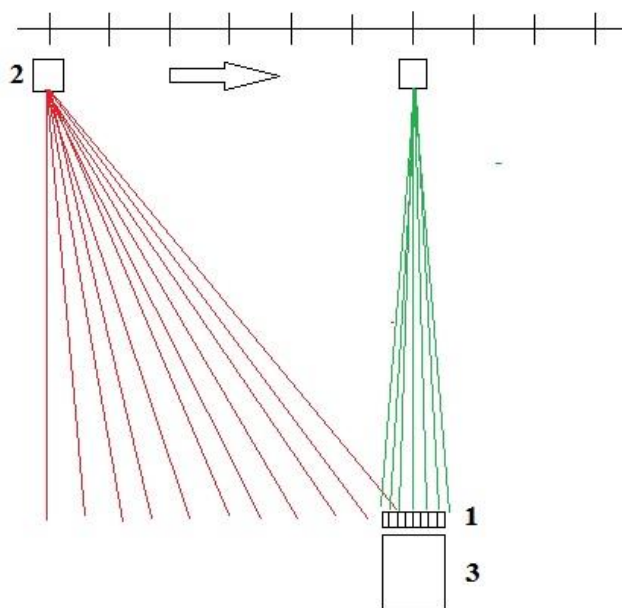


Рисунок 2.2.4 Схема эксперимента.

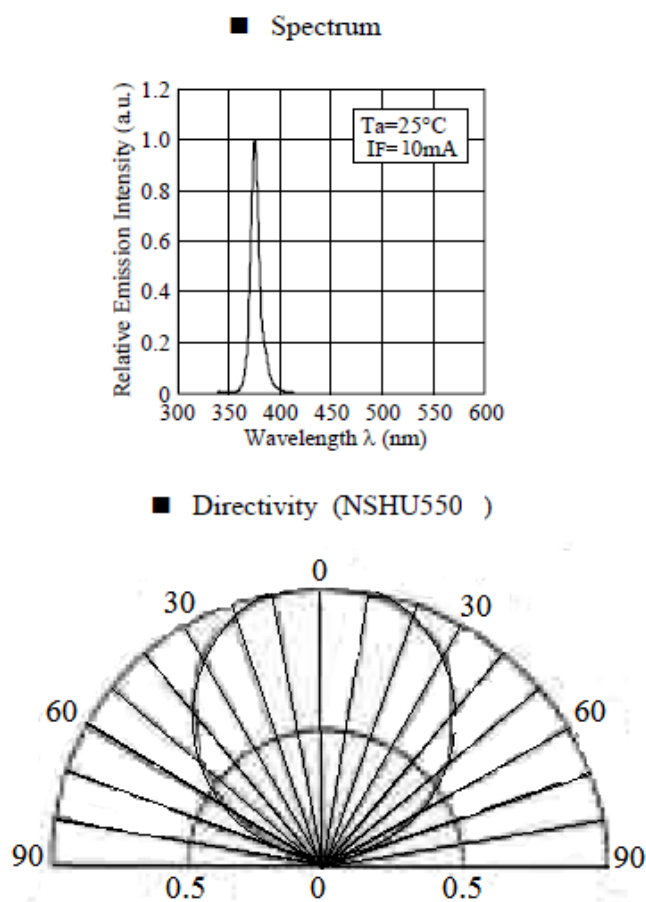
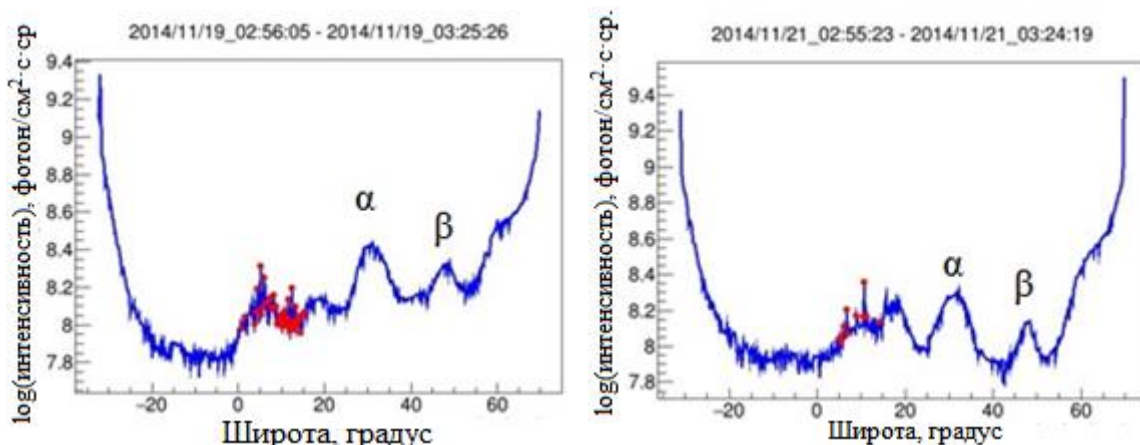


Рисунок 2.2.5 Спектр излучения (верхний график) и диаграмма направленности (нижний график) светодиода NSHU550

В качестве выходных данных снимается амплитуда сигнала ФЭУ в зависимости от угла падения. Результаты эксперимента показаны на рисунке 2.2.3. Как видно из этого графика максимум сигнала ФЭУ приходится на  $\theta=0^\circ$  и также падает при увеличении угла падения, как и расчетная кривая, однако, это уменьшение носит несколько другой характер – более плавное, а предельный угол регистрации больше. Разница между теоретическим и экспериментальным графиками может быть объяснена переотражением, возникающим в отверстиях коллиматора, которое не учитывается при вычислении теоретической зависимости.

### 2.3 Антропогенное свечение

Спутники «Татьяна-1» и «Татьяна-2» показали, что города и другие объекты, связанные с деятельностью человека, дают большой вклад в интенсивность УФ свечения ночной атмосферы Земли (см. раздел 1.2.3, рис. 1.2.4.1). Область свечения является локальной, с максимальной интенсивностью порядка  $1\text{-}2 \cdot 10^8$  фотон/см<sup>2</sup>·с·ср, в то время как интенсивность свечения самой атмосферы (например, над океанами и над пустыней Сахара) существенно меньше и составляет  $3\text{-}5 \cdot 10^7$  фотон/см<sup>2</sup>·с·ср.



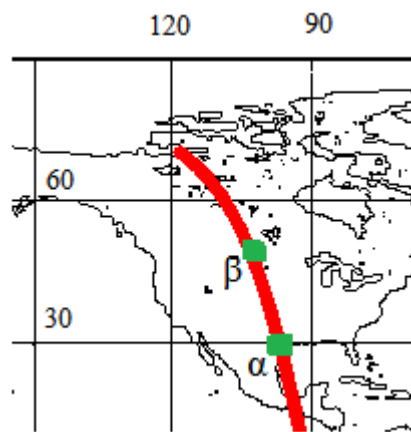


Рисунок 2.3 Пример антропогенного УФ свечения ночной атмосферы Земли по данным спутника «Вернов», где  $\alpha$ - Хьюстон,  $\beta$ - Реджайна (Канада)

Аналогичные наблюдения сделаны и по данным спутника «Вернов». Постоянные, повторяющиеся от пролета к пролету и находящиеся в одном и том же месте на поверхности Земли, превышения УФ фона локализованы над большими городами. На рисунке 2.3 приведен пример таких антропогенных источников. На верхних рисунках показаны графики зависимости интенсивности УФ свечения от географической широты, для двух дней (левый: 19.11.2014, правый: 21.11.2014), но измеренные в одном и том же регионе. Один из максимумов УФ свечения имеет географические координаты  $30^\circ$  северной широты  $97^\circ$  западной долготы. В этом месте расположен город Хьюстон (географические координаты города:  $29^\circ 45' 46''$  северной широты  $95^\circ 22' 59''$  западной долготы). Поэтому источником УФ свечения для этих двух пиков  $\alpha$  является город. Повторяющееся превышение  $\beta$  в районе  $50^\circ$  северной широты  $103^\circ$  западной долготы – зарегистрировано над городом Реджайна (Канада).

#### 2.4 Зависимость УФ свечения от фазы луны и облачного покрова Земли

Одним из самых мощных источников УФ свечения является рассеянный свет Луны. Это показали измерения спутников «Татьяна-1» (подробнее 1.2.2). Вблизи полнолуния,  $\pm 7$  дней от полнолуния, спутник

фиксирует существенное повышение УФ фона атмосферы, а также большие его вариации, связанные с переотражением свечения Луны от облачного покрова Земли. На рисунке 2.4 (верхний график) можно заметить УФ пики на  $-40^\circ$ ,  $-10^\circ$  и  $40^\circ$ . Если совместить карту облачного покрова и траекторию движения спутника (нижний рисунок), то можно заметить, что в этих точках находятся облака, которые отражают свет Луны. Данные измерения проведены при большой фазе Луны, 04 октября 2014 года (полнолуние 08 октября 2014 года).

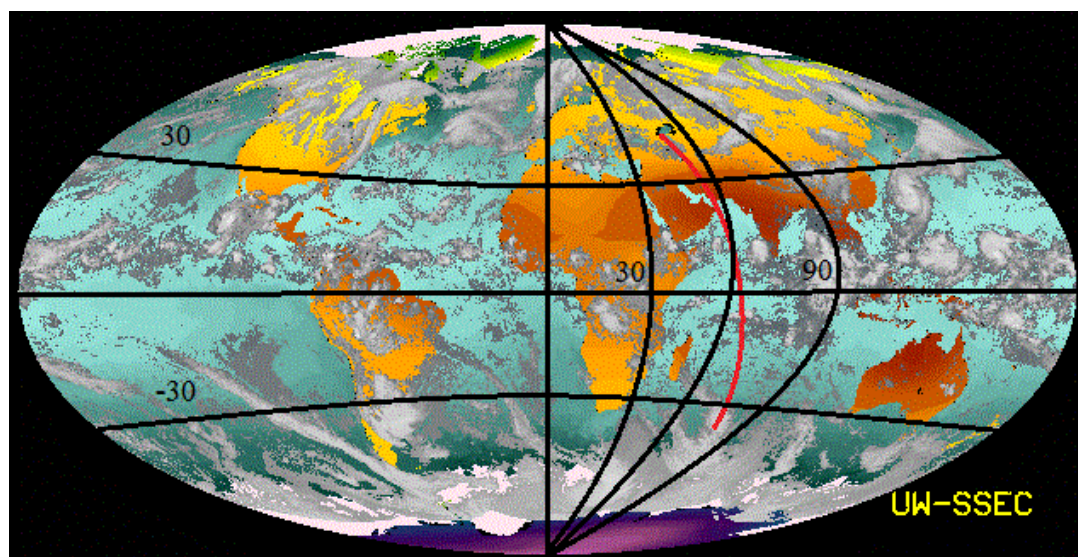
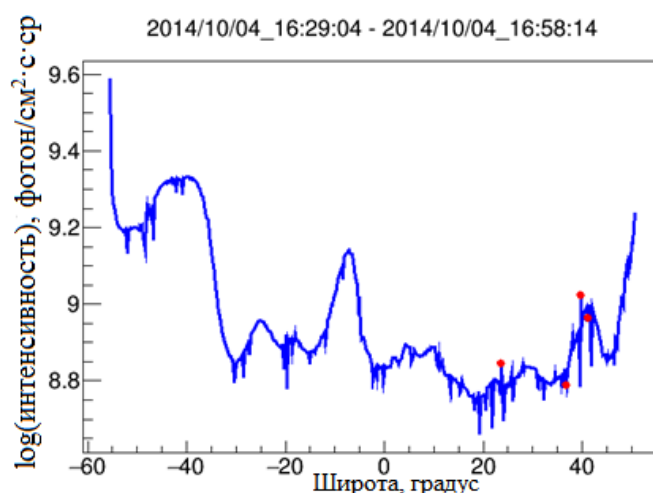


Рисунок 2.4 Влияние Луны на УФ свечение ночной атмосферы Земли. Верхний – график зависимости логарифма интенсивности от широты, нижний- карта облачного покрова и траектория движения спутника

## 2.5 Зависимость УФ свечения от широты

Основной задачей данной работы является поиск и анализ областей свечения атмосферы, которые могут быть связаны с воздействием на ее верхние слои внешних факторов (например, высыпания частиц РПЗ, свечение экваториальной области во время геомагнитных возмущений). Поэтому, в дальнейшем исследовании было важно исключить ряд источников, который подробно описан выше:

- Источники антропогенного характера. Они всегда расположены над континентами и регистрируются в одном и том же месте при каждом пролете аппарата.
- Грозовые районы являются мощным источником транзиентного УФ свечения. В этих районах происходят значительные вариации интенсивности свечения.
- В полнолуние средняя интенсивность свечения атмосферы на два порядка выше, чем в новолуние и многие эффекты могут быть скрыты за этим мощным свечением. Поэтому данные вблизи полнолуния ( $\pm 7$  дней) не учитываются в данном анализе.

Все остальные ночные измерения на спутнике «Вернов» попали в базу данных для дальнейшего анализа. Пример одного ночного витка показан на рисунке 2.5.1. На нем можно различить два пика на  $-60^\circ$  и на  $-15^\circ$ . Первый связан с авроральным овалом, так как широты распространения авроры составляют от  $\pm 45^\circ$  и выше, второй – вероятно, с экваториальной аномалией. Экваториальная аномалия распределена вдоль геомагнитного экватора  $\pm 15^\circ$ . Это не может быть связано с грозовой активностью, потому что нет больших вариаций интенсивности, которые присущи областям молниевых разрядов и не является антропогенным источником, так как спутник пролетал над Индийским океаном.

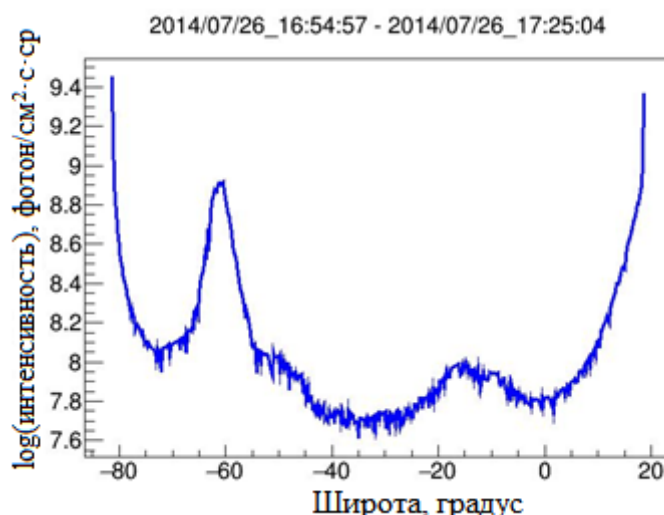


Рисунок 2.5.1 График зависимости логарифма интенсивности от широты.

Для нахождения пространственного распределения отобранных УФ событий написана программа на языке C++. Программа выполняет расчет интенсивности свечения по данным в кодах АЦП и высокого напряжения со спутника по формулам (1).

В данных спутника «Вернов» также содержится информация о дате и времени события, о географических координатах, высоте спутника, геомагнитных координатах и L-оболочке. Каждому значению интенсивности соответствует единственное значение координат. Для удобства используется значение логарифма интенсивности. В таблице 2 приведены типичные данные после обработки программой.

Таблица 2. Выходной файл программы

log(интенсивности) , фотонов/см <sup>2</sup> ·с·ср	Широта , градус	Долгота , градус	L- оболочка	геомаг. широта, градус	геомаг. долгота, градус
7.88009	20.9	129.68	1.11	11.47	200.5
7.90241	21.13	129.63	1.11	11.71	200.45
7.83586	21.37	129.57	1.11	11.94	200.4
7.88009	21.6	129.51	1.11	12.17	200.35
7.88009	21.9	129.44	1.12	12.46	200.29
7.92486	22.14	129.39	1.12	12.69	200.24
7.8579	22.37	129.33	1.12	12.93	200.19
7.88009	22.61	129.27	1.12	13.16	200.14
7.90241	22.84	129.22	1.13	13.39	200.09
7.92486	23.14	129.14	1.13	13.68	200.03
7.94746	23.37	129.09	1.13	13.91	199.98
7.92486	23.61	129.03	1.14	14.14	199.93
7.90241	23.85	128.97	1.14	14.38	199.88
7.92486	24.08	128.91	1.14	14.61	199.82
7.90241	24.38	128.84	1.15	14.9	199.76
7.90241	24.61	128.78	1.15	15.13	199.71
7.92486	24.85	128.72	1.15	15.36	199.66
7.92486	25.08	128.66	1.16	15.6	199.61
7.94746	25.32	128.61	1.16	15.83	199.56
7.92486	25.62	128.53	1.16	16.12	199.5
7.97021	25.85	128.47	1.17	16.35	199.45
7.94746	26.09	128.41	1.17	16.58	199.39
7.90241	26.32	128.35	1.18	16.82	199.34
7.92486	26.56	128.29	1.18	17.05	199.29
7.92486	26.85	128.22	1.18	17.34	199.23
7.92486	27.09	128.16	1.19	17.57	199.18

С помощью другой программы происходит расчет ширины пика на полувысоте (ШПВ). Для дальнейшего анализа отбираются значения интенсивностей и координаты, находящиеся выше этого уровня. На рисунке 2.5.3 приведен пример графика зависимости логарифма интенсивности от времени регистрации. Красная линия – интенсивность УФ свечения, зеленая

– сглаженная функция (скользящее среднее за 16 интервалов), синяя – отобранный участок максимума, находящийся выше ШПВ.



Рисунок 2.5.3 Диалоговое окно программы. Вертикальная ось – логарифм интенсивности, горизонтальная – время регистрации (один шаг равен 4.5 с)

В качестве результата работы этих двух программ имеем значения интенсивностей пиков выше ШПВ и различные координаты (географические, геомагнитные, L-оболочка).

По этим данным построено распределение областей повышенного свечения на географической карте, которое представлено на рисунке 2.5.4. Общее время измерения детектора на спутнике «Вернов» на ночной стороне орбиты составило 166,5 часов. Распределение времени экспозиции по геомагнитной широте представлено на рис.2.5.5. Необходимо отметить, что из экспозиции были удалены данные вблизи полнолуния (т.е. только для времени набора статистики, используемой в данном исследовании).

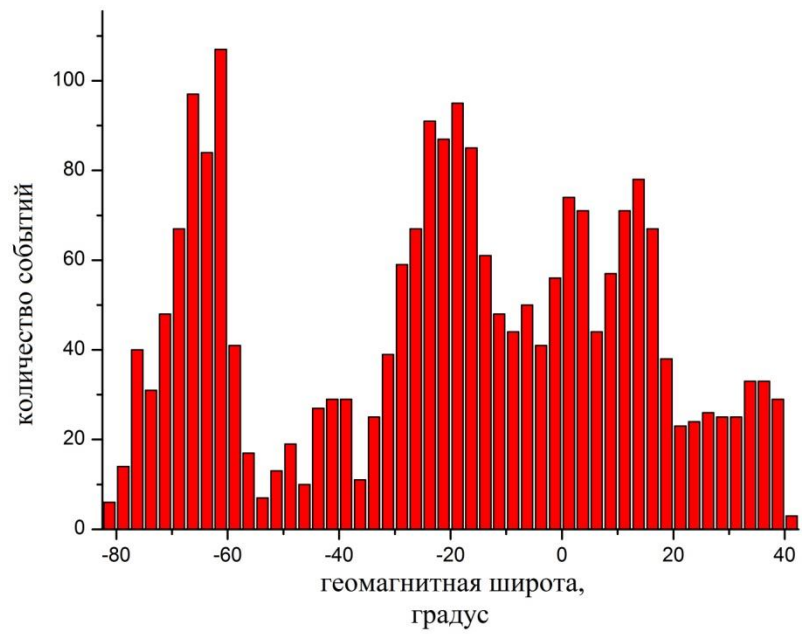
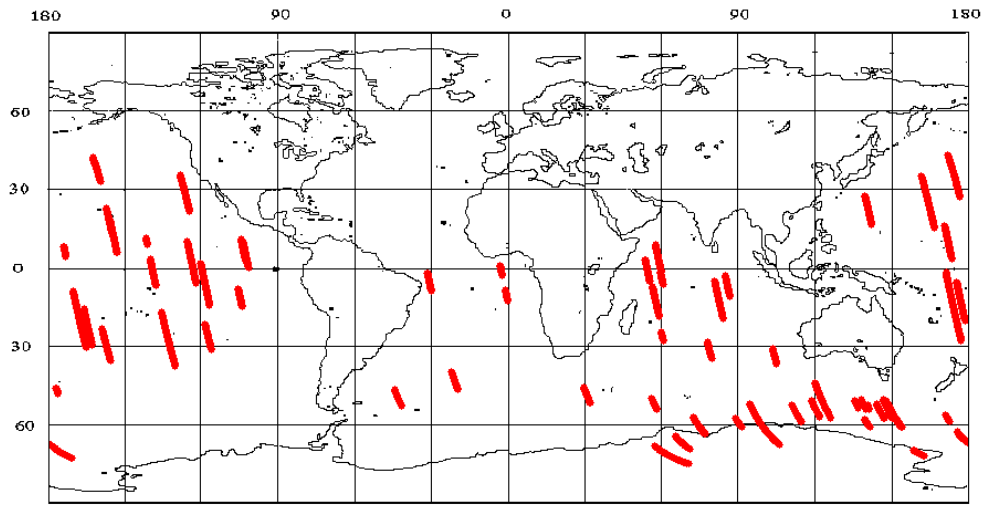


Рисунок 2.5.4 Географическое (верхнее) и геомагнитное (нижнее) распределение отобранных событий.

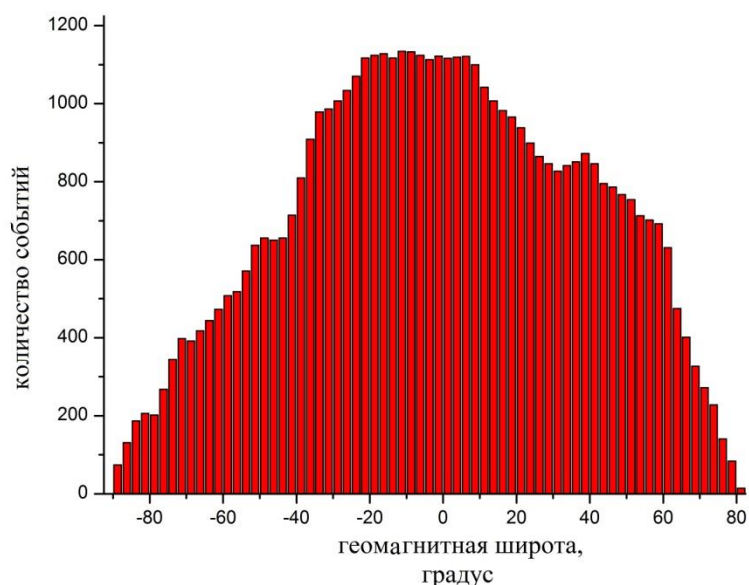


Рисунок 2.5.5 Суммарное число событий за всё время работы спутника за время малой фазы Луны.

По географическому распределению видны пролеты спутника только над водной поверхностью, т.к. предварительно были исключены пролеты над материками, чтобы убрать из анализа антропогенное свечение.

На распределении по геомагнитной широте выделяется пять пиков на  $-65^\circ$ , на  $-40^\circ$ , на  $-20^\circ$ , на  $0^\circ$  и  $15^\circ$ . Некоторые из этих пиков соответствуют районам авроры ( $-65^\circ$ ) и экваториальной аномалии ( $0^\circ$  и  $15^\circ$ ). В то время как происхождение пиков на  $-40^\circ$  и на  $-20^\circ$  остается не ясным.

Одним из результатов данной работы является распределение по L-оболочке, показанное на рисунке 2.5.6. По горизонтали отложены значения L-оболочки, по вертикали количество событий, деленное на экспозицию.

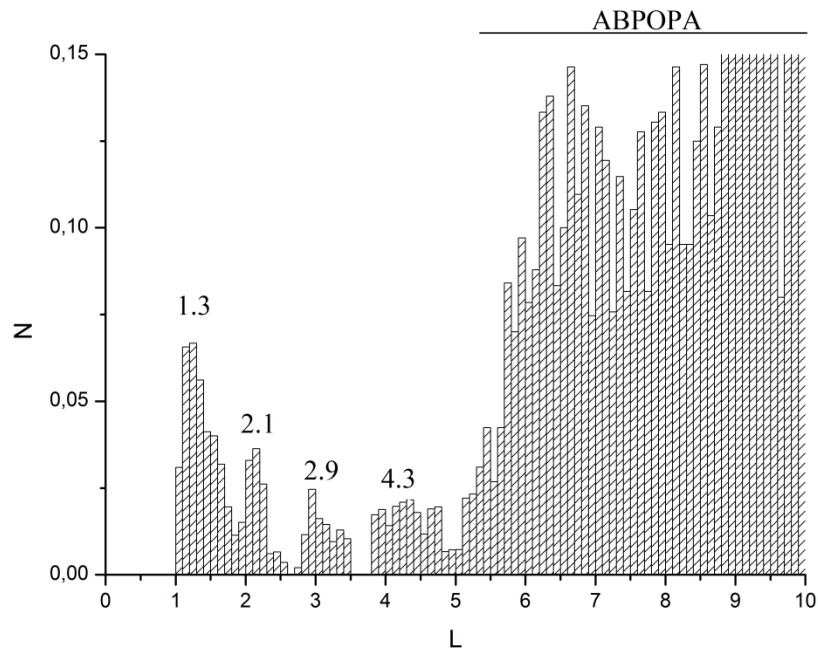


Рисунок 2.5.6 Распределение по L-оболочке

На данном графике можно различить пики на  $L=1.3$ ,  $L=2.1$ ,  $L=2.9$ ,  $L=4.3$ .

На высоких широтах ( $L > 5$ ), повышение УФ излучения лежит в авроральной области (свечение аврорального овала).

Пик УФ излучения  $L=4.3$  соответствует максимуму от взаимодействия частиц из внешнего радиационного пояса, который рассматривается как источник интенсивного выпадания энергичных электронов, и атмосферы Земли.

На низких широтах ( $L=1.3$ ), повышение интенсивности ультрафиолетового излучения совпадает с областью экваториальной аномалии.

Вид распределения и характерные пики соотносятся с данными полученными на спутнике «Татьяна-1», которые описаны выше в разделе 1.2.4, что подтверждает наблюдения областей повышенного УФ свечения, имеющего дискретную структуру по L оболочкам.

## 2.6 УФ свечение в авроральной области

Авроральный регион ( $L > 5$ ) образуется в результате бомбардировки атмосферы планеты низкоэнергичными заряженными частицами хвоста магнитосферы, ускоренными вдоль магнитных силовых линий. Находясь в постоянном взаимодействии с потоком солнечного ветра, магнитосфера изменяет свою форму и свои размеры, одновременно, меняются и характеристики крупномасштабных токовых систем, в частности хвост магнитосферы. Ее динамика проявляется в вариациях магнитного поля на поверхности Земли и в высыпаниях частиц в верхней атмосфере. При столкновении частиц хвоста магнитосферы с верхней атмосферой происходит возбуждение атомов и молекул газов, входящих в её состав. Спектры излучения авроры зависят от состава атмосферы, для Земли наиболее яркими являются линии излучения возбуждённого кислорода и азота, а для Юпитера, например, линии излучения водорода.

В данной работе проведен анализ УФ свечения аврорального региона по данным спутника «Вернов» и его динамика. На рисунке 2.5.7. показаны измерения интенсивности за четыре различных ночных витка 27.08 и 29.08 (верхняя пара), 19.09 и 21.09 (нижняя пара) 2014 года. Эти дни характеризуются разным уровнем геомагнитной активности, что сказывается на уровне интенсивности УФ свечения в авроральной области и размерах области свечения. Проанализируем данные пролеты:

- 27 августа  $A_e = 1000$  нТ и наблюдается аврора в районе от  $-60^\circ$  до  $-40^\circ$ . Для этого пика логарифма интенсивности светимости превосходит значение  $9.4$  фотонов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$ , также он имеет двугорбый вид.
- 29 августа  $A_e = 400$  нТ и наблюдается перемещение авроры на более высокие широты. Значение логарифма интенсивности

светимости становится меньше чем  $9.2$  фотонов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$ , но двугорбая структура сохраняется.

- 19 сентября  $A_e=100$  нТ, аврора в районе от  $-55^\circ$ . Значение логарифма интенсивности светимости падает до  $9.0$  фотонов/ $\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ср}$  и полностью теряется двугорбая структура.
- 21 сентября  $A_e$  индекс  $0$  нТ и аврора не наблюдается или находится за границей терминатора.

На основе этих данных можно сделать вывод, что повышение  $A_e$  индекса больше чем  $500$  нТ приводят к появлению двугорбой структуры аврорального пика. Также при увеличении этого индекса экваториальная граница авроральной области смещается на более низкие широты и происходит увеличение интенсивности свечения. Так отношение значений интенсивности для  $27.08$  (максимум  $A_e$ ) и  $19.09$  (минимум  $A_e$ ) составляет более  $1.04$ . Пик на  $-20^\circ$  на нижней паре графиков связан с деятельностью человека, так как расположен на территории Австралии. Красным отмечены события связанные с транзиентными явлениями и, как говорилось выше, они в анализе не участвуют.

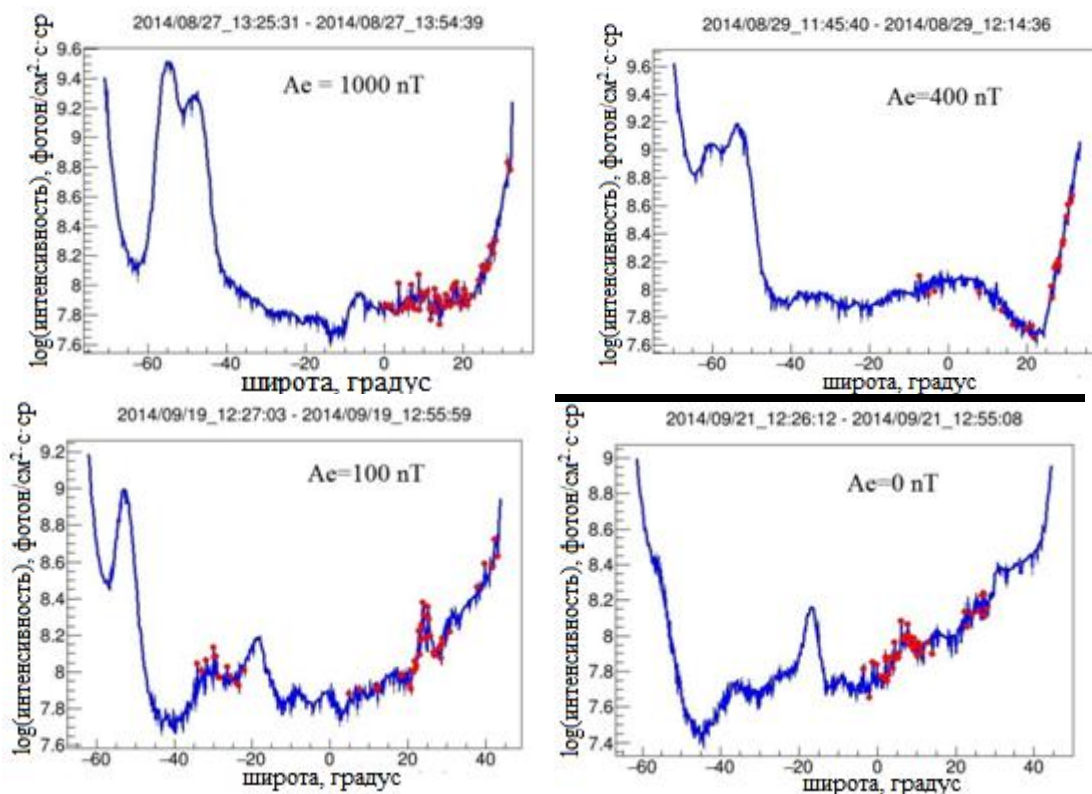


Рисунок 2.6.1 Динамика авроры (-60°).

## 2.7 УФ свечение в экваториальной области

Интересным являются наблюдения повышенного УФ свечения в приэкваториальной области (рисунок 2.7.1).

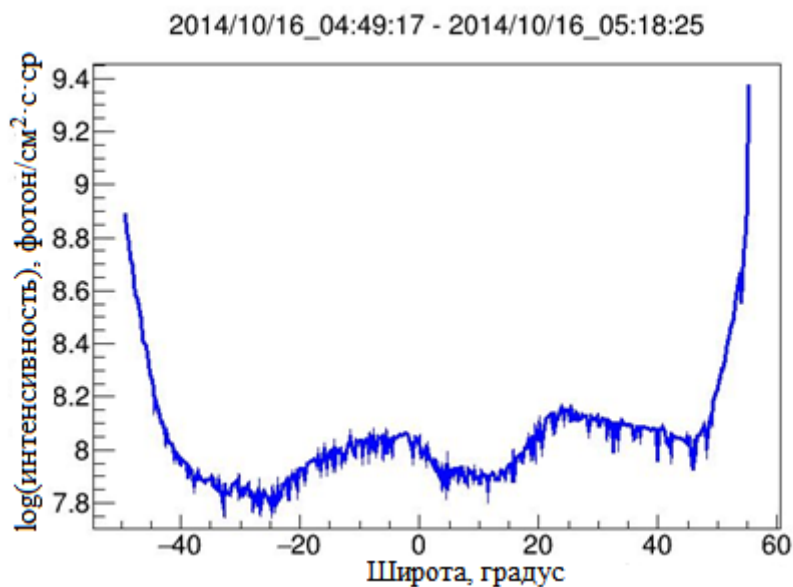


Рисунок 2.7.1 Зависимость интенсивности УФ излучения от широты

Как было сказано ранее, одним из возможных источников этого свечения являются экваториальные арки – области повышенного свечения с обеих сторон от экватора, возникающие вследствие так называемого «фонтан-эффекта», объясняющего экваториальную ионосферную аномалию. F-слой ионосферы, также известный как слой Апплетона, находится на высоте 120-400 км выше уровня моря. Это самый верхний слой ионосферы. Он состоит из одного слоя ночью, но в течение дня, он делится на два слоя (F1 и F2). F2-слой в окрестности магнитного экватора характеризуется уменьшенной плотностью ионизации и двумя горбами, по одному с каждой стороны экватора (около  $\pm 17^\circ$  магнитной широты) в течение дня и нескольких часов после заката солнца. За счет взаимодействия плазмы и магнитного поля Земли происходит вертикальное движение плазмы на большие высоты (дрейф в направлении  $E \times B$ , см. рис. 2.7.2 из работы [25]), и которая затем расходится вдоль магнитных силовых линий в стороны от экватора. Плазменный «фонтан» производит повышение концентрации в плазме на более высоких широтах и уменьшение концентрации плазмы на экваторе (рисунок 2.7.2, показана зависимость критической частоты от геомагнитной широты<sup>1</sup>).

---

<sup>1</sup>Критической частотой для данного ионосферного слоя называют ту наибольшую частоту, при которой радиоволны, направленные вертикально, еще могут быть отражены ионосферой. Критическая частота пропорциональна концентрации электронов. Критической частотой для данного ионосферного слоя называют ту наибольшую частоту, при которой радиоволны, направленные вертикально, еще могут быть отражены ионосферой. Критическая частота пропорциональна концентрации электронов.

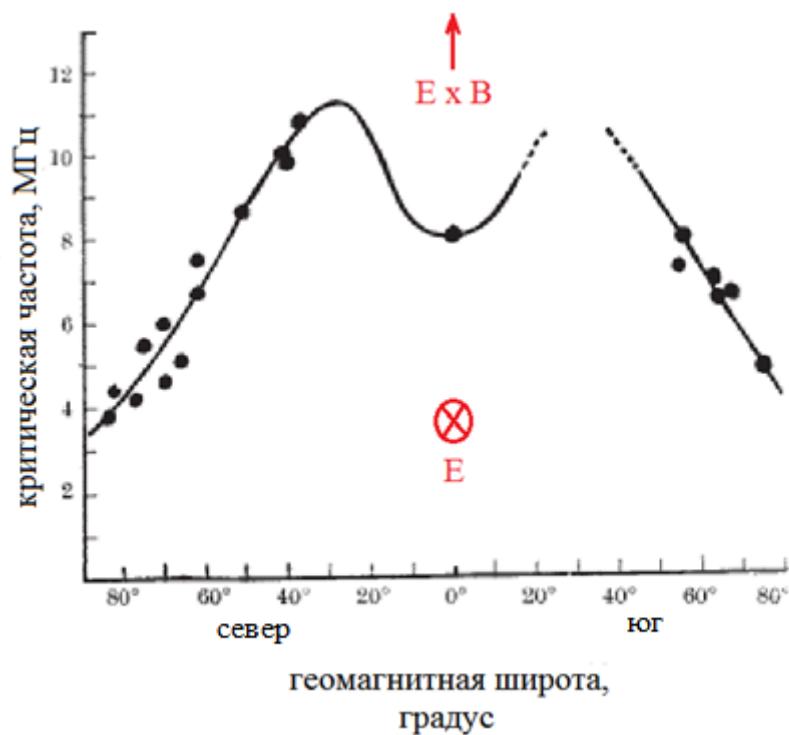


Рисунок 2.7.2 Зависимость критической частоты от геомагнитных координат[25]

Интересные возможности для исследования связи заряженной компоненты и УФ свечения предоставляют одновременные измерения потоков заряженной компоненты и УФ излучения на спутнике «Вернов». На рисунке 2.7.3 изображен интересный пример такого синхронного измерения. На рисунке видно одновременное повышение потоков электронов низких энергий и УФ свечения в районе -15 градусов южной широты. Одновременно с этим, в северном полушарии наблюдается мощный грозовой регион (резкие колебания уровня освещенности). Данные измерения проводились в области западного «хвоста» южно-атлантической магнитной аномалии, что не исключает возможность возникновения свечения в самой колбе ФЭУ за счет прямого взаимодействия стекла с заряженными частицами (черенковский и флуоресцентный свет в УФ фильтре и входном окне ФЭУ). Другая гипотеза связана с возможным высыпанием частиц из ЮАА под действием электромагнитного излучения грозы (LEP—LightningElectronPrecipitation), которая видна на том же пролете спутника в северном полушарии. Данное

событие требует дальнейшего исследования и поиска аналогичных явлений в схожих геомагнитных и метеорологических условиях.

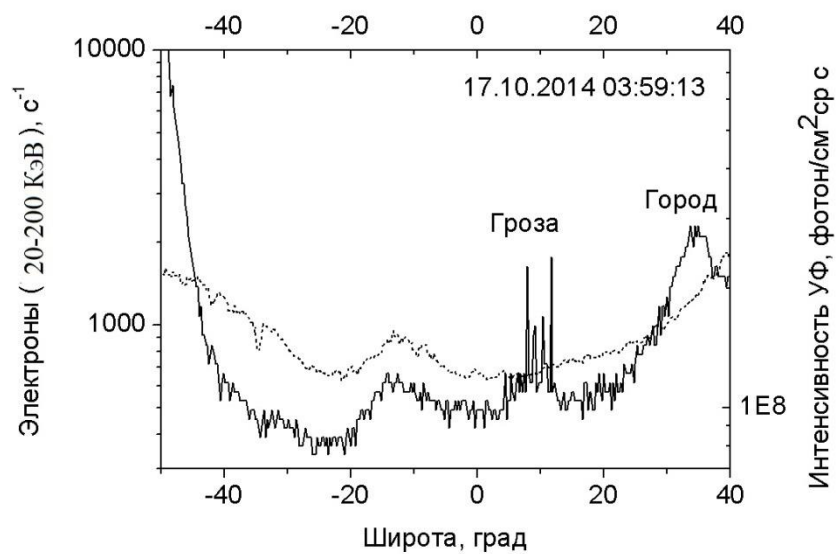


Рисунок 2.7.3 Счет электронов (левая ось) и интенсивность УФ (правая ось) в зависимости от географической широты

Глава 3. Области повышенного УФ свечения атмосферы по данным спутника «Ломоносов»

### 3.1 Детектор «ТУС» на спутнике «Ломоносов»

Спутник “Ломоносов” запущен 28 апреля 2016 года с космодрома Восточный на солнечно-синхронную орбиту высотой ~500 км. На спутнике «Ломоносов» установлено семь детекторов для изучения экстремальных физических явлений в земной атмосфере, околоземном пространстве и во Вселенной.

Один из приборов, орбитальный телескоп “ТУС”, предназначен для регистрации треков космических лучей предельно высоких энергий (больше  $7 \cdot 10^{19}$  эВ). “ТУС” представляет собой телескоп-рефлектор [26], состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади ( $2 \text{ м}^2$ ), предназначенного для сбора и фокусировки слабого сигнала флуоресценции, порождаемой в процессе развития широкого атмосферного ливня (ШАЛ), и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала. Фотоприемник представляет собой матрицу из 256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463. Использование большого зеркала-концентратора и ФЭУ позволяет достичь высокой чувствительности прибора и достаточного для регистрации ШАЛ временного разрешения (менее 1 мкс). Поле зрения одной ячейки детектора равно 0.01 рад. Телесный угол обзора ячейки составляет  $10^{-4}$  ср, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата  $5 \times 5$  км при высоте орбиты 500 км. Все поле зрения детектора составляет  $\pm 4.5$  град ( $80 \times 80$  км на поверхности Земли). Перед каждым ФЭУ матрицы фотоприемника расположены светофильтр УФС-1, который ограничивает регистрируемое излучение в диапазоне длин волн 300–400 нм. Также есть световод, который собирает свет с квадратного входного окна ячейки ( $15 \times 15$  мм) на круглый фотокатод ФЭУ (13 мм) и бленда, предназначенная для защиты от боковой засветки.

Таблица 3. Параметры прибора

Площадь зеркала, м <sup>2</sup>	2
Фокусное расстояние, см	150
Размер ячейки, мм	15×15
Число ячеек	256
Шаг измерения времени, мкс	0,8
Высота орбиты, км	500
Энергетический порог для частиц КЛПВЭ, эВ	$7 \cdot 10^{19}$
Площадь обзора атмосферы, км <sup>2</sup>	6400
Шаг измерения трека, км	5

### 3.2 Антропогенное свечение

Прибор «ТУС» также как приборы на спутнике «Вернов» и «Татьяна» регистрирует УФ излучение, в том числе и связанное с деятельностью человека. Например, на рисунке 3.2.1 изображен город с координатами 30 северной широты 82 западной долготы, что соответствует Гейнсвиллю (город в штате Флорида, США). Наибольшее число фотоэлектронов локализовано в модулях 7-14. Из-за пространственного разрешения карта довольно грубая.

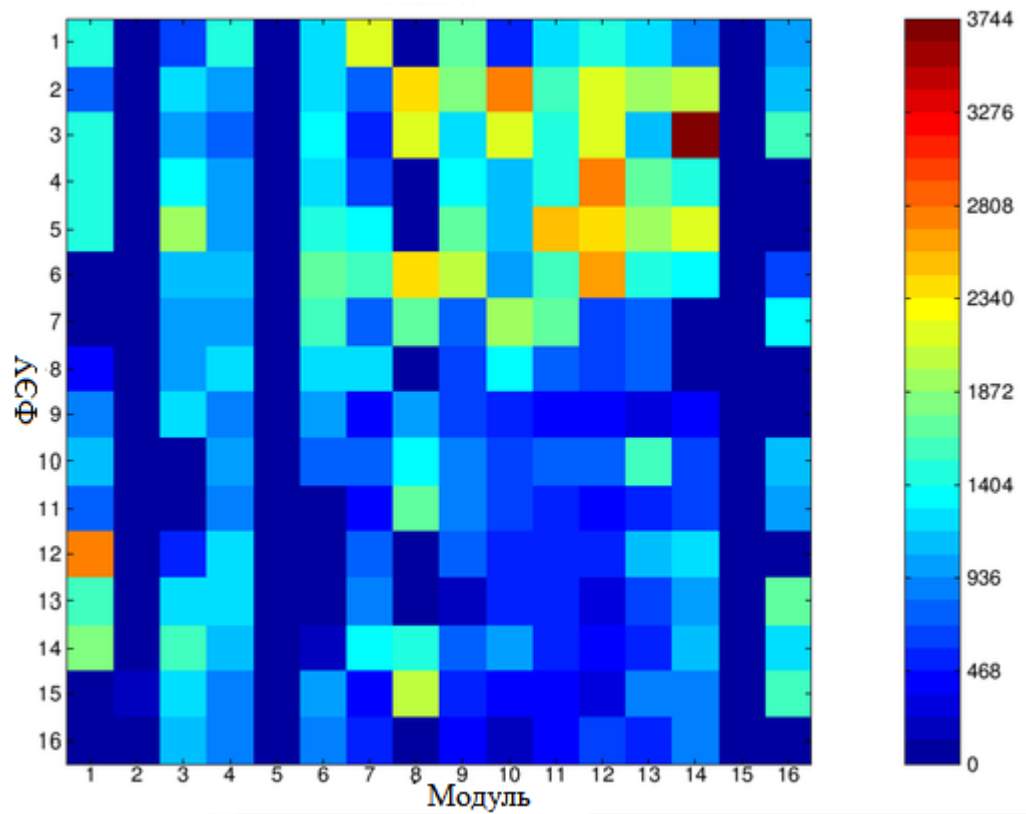


Рисунок 3.2.1 Число фотоэлектронов в модулях

При пролете над сушей, происходит модуляции сигнала (см. зависимость кода АЦП от времени на рисунке 3.2.2). Предполагается, что частоты этих модуляций связаны с антропогенными источниками на Земле.

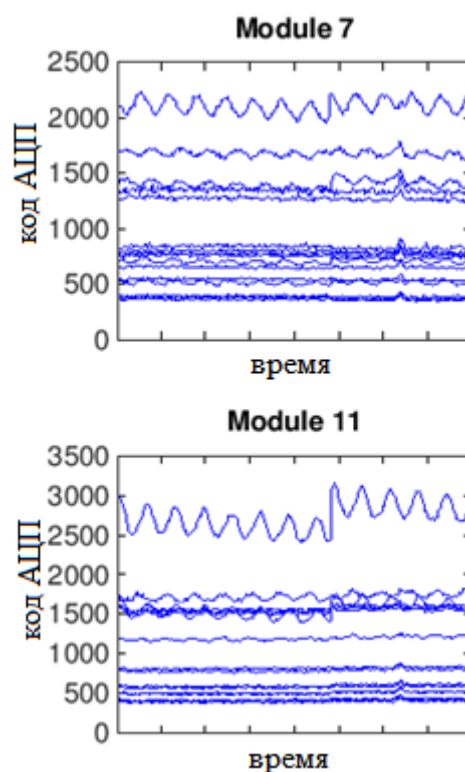


Рисунок 3.2.2 Зависимость кода АЦП от времени

Для проверки гипотезы проведен Фурье-анализ этих вариаций, и результат представлен на рисунке 3.2.3. На всех обработанных данных выделяется пик на частоте 120 Гц или 100 Гц, в зависимости от географического положения города. Если траектория спутника лежит над Европой, то наблюдаются модуляции с частотой 100 Гц, над Америкой - 120 Гц. Географическое распределение промышленных частот изображено на рисунке 3.2.4 и для Америки составляет 60 Гц, для Европы-50 Гц. Заметим, что наблюдается удвоенная частота поскольку число фотонов пропорционально энергии излучателя которая меняется с удвоенной частотой относительно напряжения в сети. Однако также наблюдаются частоты кратные 120 Гц, например 240 Гц и 360 Гц (верхний график рисунок 3.2.3).

Также составлен каталог, отображающий зависимости кода АЦП от времени (столбец 1) для разных городов и территорий (столбец 2) и анализ Фурье (столбец 3) для каждого из них соответственно (приложение 2).

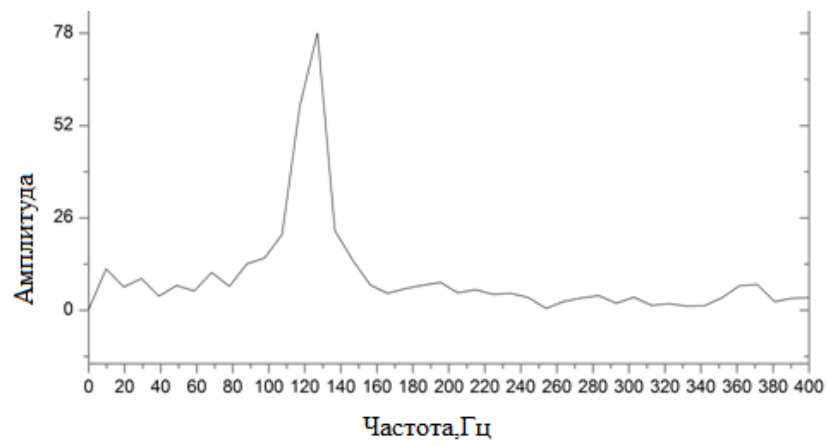
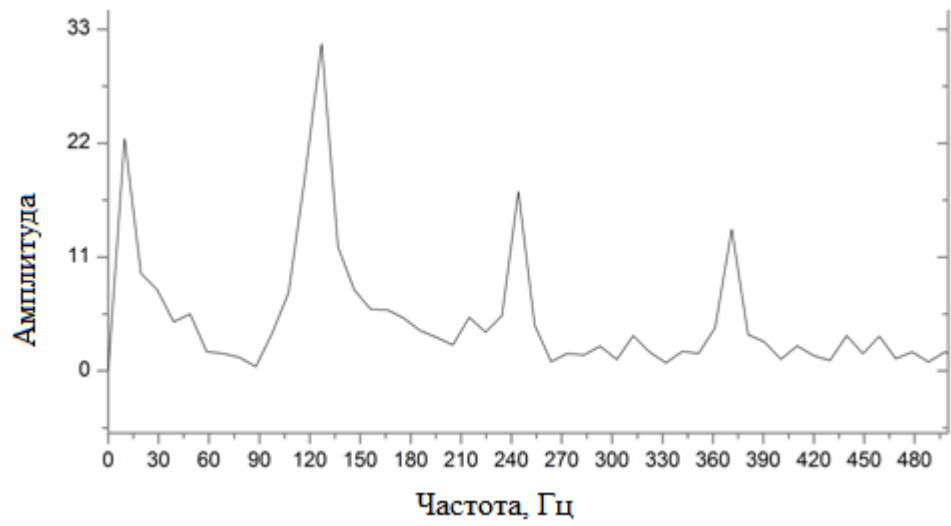


Рисунок 3.2.3 Фурье-анализ

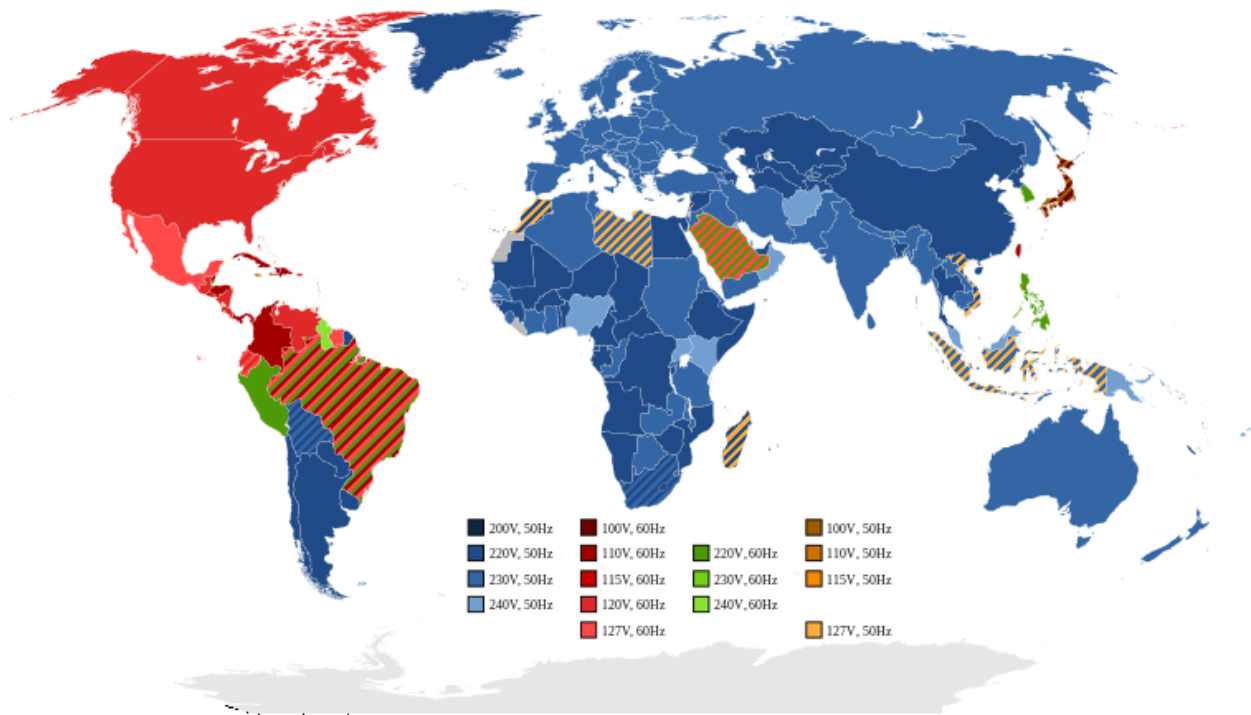


Рисунок 3.2.4 Распределение промышленных частот

Для подтверждения гипотезы регистрации антропогенного свечения, а также выяснения возможных причин присутствия более высоких частот был проведен эксперимент с макетом детектора «ТУС» в лаборатории. На блок ФЭУ аналогичный «ТУС» подавался свет от различных источников:

- Светодиод NSHU550
- Лампа накаливания
- Лампа дневного света

Снималась зависимость кода АЦП от времени. Для этих данных также проведен Фурье-анализ. Рисунки 3.2.5-3.2.7 показывают зависимость кода АЦП (N) от времени (верхний график) и данные анализа Фурье (нижний график) для трех различных источников света, а рисунок 3.2.8 показывает результаты измерения при открытых ФЭУ (фон окружающего излучения). Из данных кода АЦП вычтено среднее значение кода АЦП. Все измерения проводились ночью.

Для светодиода NSHU550 установлен режим излучения с периодом 20 мс, что соответствует частоте 50 Гц. Как видно из рисунка 3.2.5 (нижний график) максимум частоты приходится на 50 Гц, интересно, что наблюдаются и дополнительные частоты 100 и 160 Гц, но их амплитуда на порядок меньше. Лампа накаливания (рис. 3.2.6) дает пик на частоте 100 Гц и никаких дополнительных частот не наблюдается. На рисунке 3.2.7 для лампы дневного света максимум амплитуды находится на 100 Гц, а второй максимум на 200 Гц много меньше первого. Отдельно было измерено фоновое излучение уличного освещения, которое также продемонстрировало явную модуляцию на частоте 100 Гц и только.

Детектор «ТУС» хорошо воспроизводит установленную частоту тестового источника излучения (светодиод). Источники, подключенные к промышленной сети дают модуляцию сигнала на частоте 100 Гц.

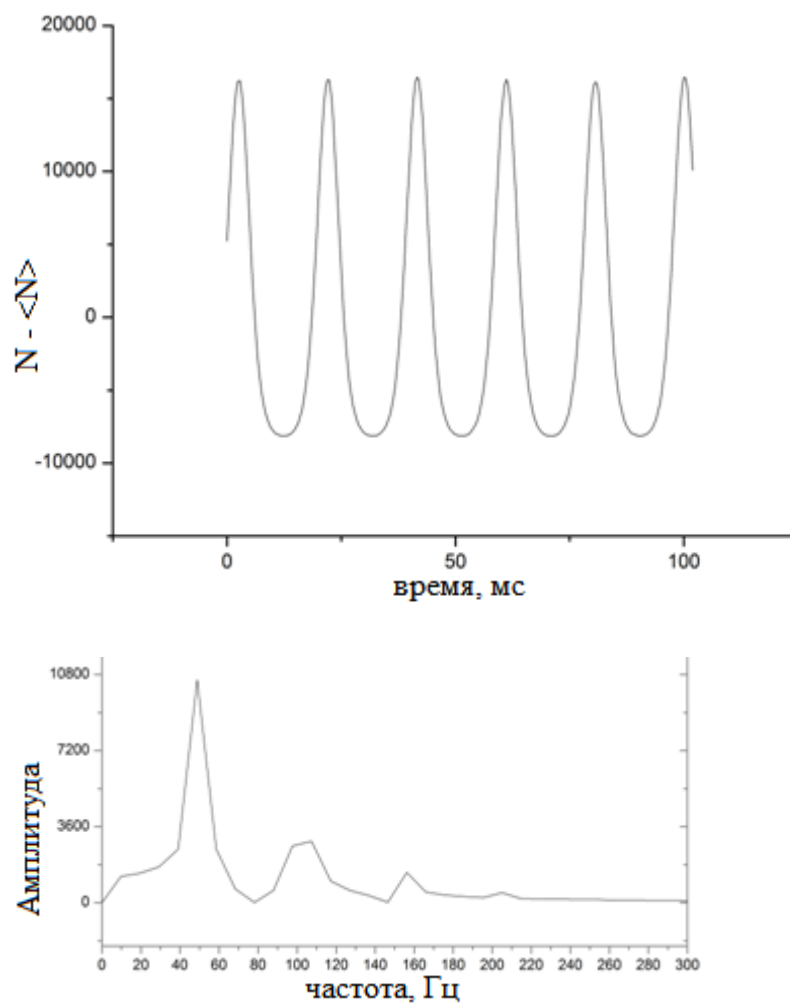


Рисунок 3.2.5 Зависимость кода АЦП от времени (верхний график) и результат Фурье анализа (нижний график) для светодиода NSHU550

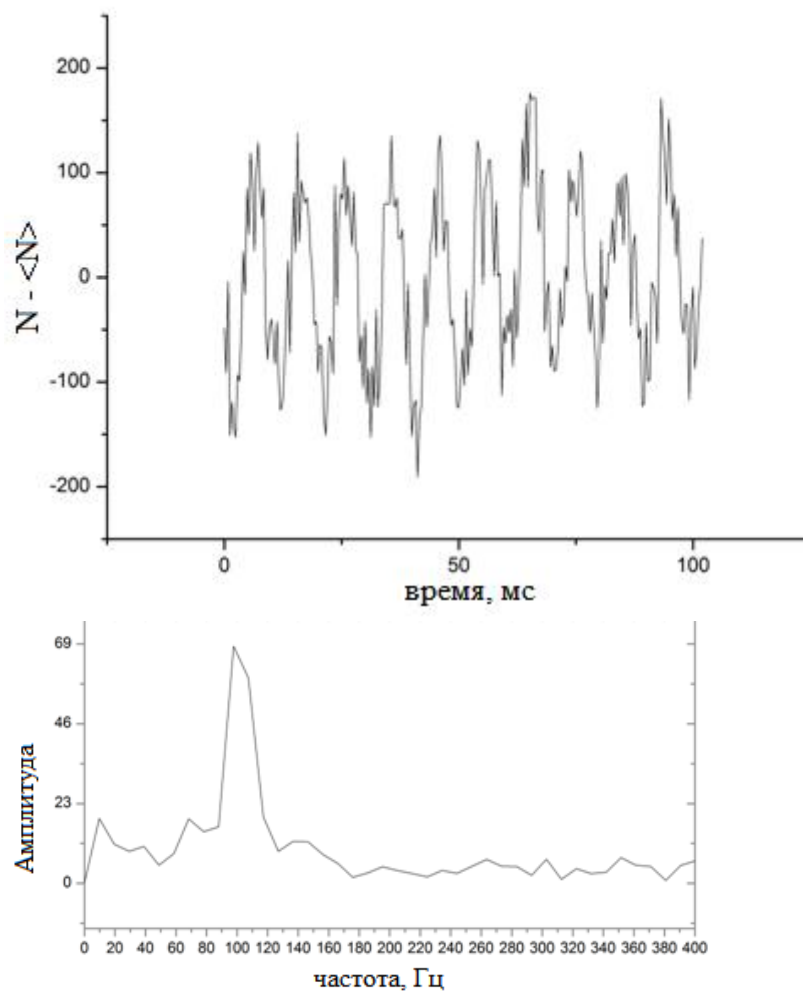


Рисунок 3.2.6 Зависимость кода АЦП от времени (верхний график) и результат Фурье анализа (нижний график) для лампы накаливания

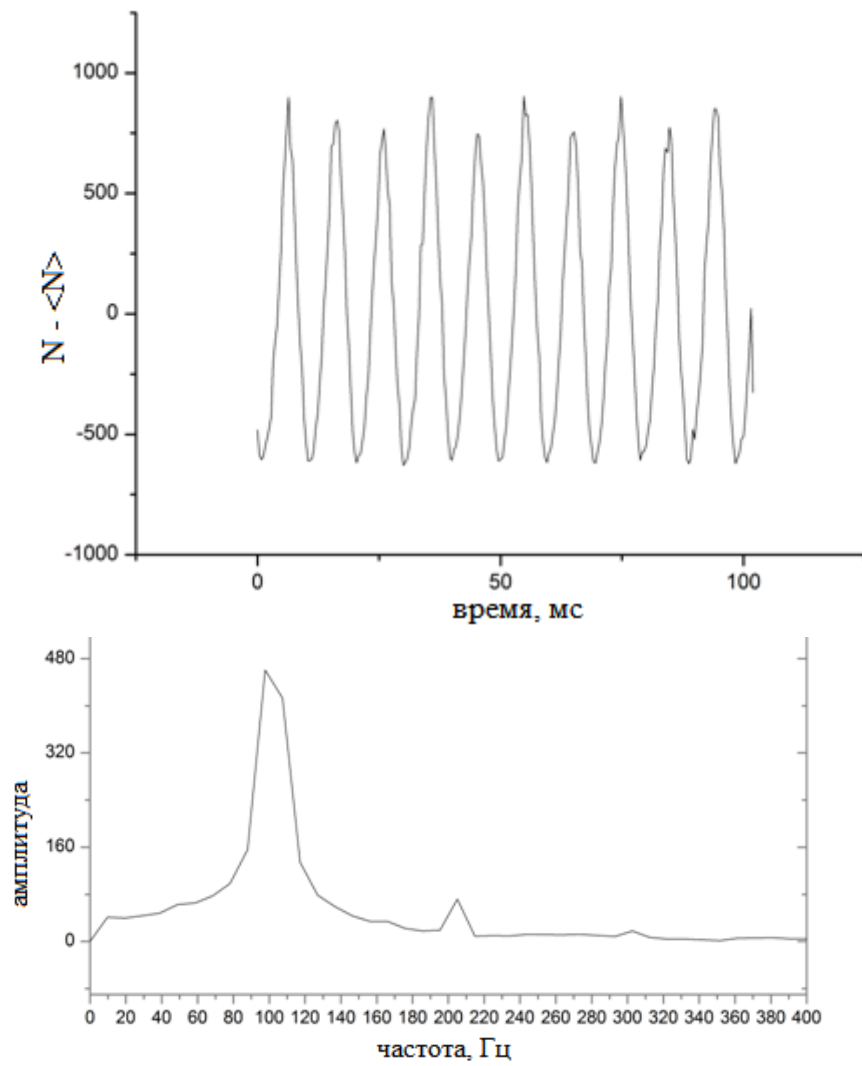
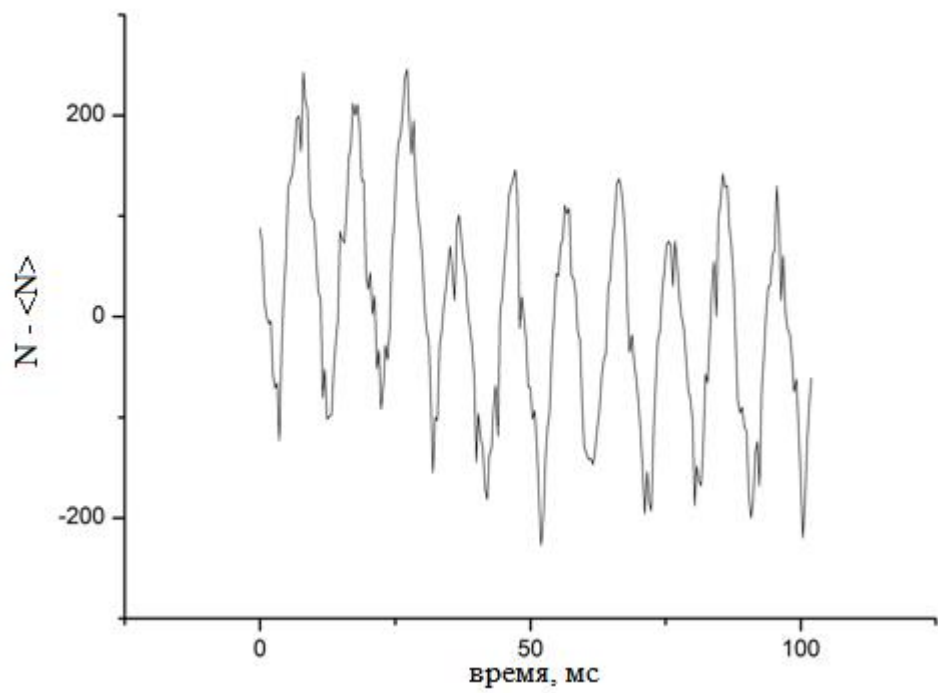


Рисунок 3.2.7 Зависимость кода АЦП от времени (верхний график) и результат Фурье анализа (нижний график) для лампы дневного



света

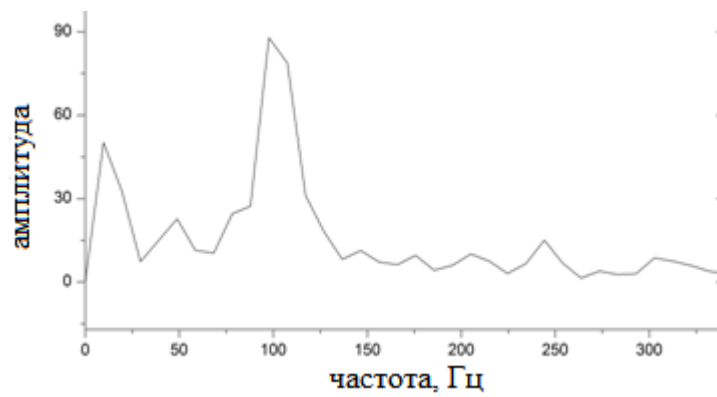


Рисунок 3.2.4 Зависимость кода АЦП от времени (верхний график) и результат Фурье анализа (нижний график) без источников света (фон)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации было проведено исследование пространственной структуры и вариаций УФ свечения ночной атмосферы Земли по данным спутников «Вернов» и «Ломоносов».

При выполнении работы проведен отбор данных из базы измерений спутника «Вернов» для анализа областей повышенного УФ свечения ночной атмосферы.

Разработано программное обеспечение для автоматического поиска и отбора максимумов свечения. Получено географическое распределение областей повышенного УФ свечения. На распределение по геомагнитной широте показано наличие максимумов в экваториальной области ( $20^\circ$ ), высокоширотной ( $50^\circ$ - $60^\circ$ ) и на средней широте ( $40^\circ$ )

Получено распределение областей повышенного УФ свечения по L-оболочке. Наблюдаются максимумы на  $L=1.3$ ,  $L=2.1$ ,  $L=2.9$ ,  $L=4.3$ . Показано соответствие полученных результатов данным эксперимента на спутнике «Татьяна-1».

Сделан анализ УФ свечения на высоких широтах (авроральный регион) и его динамики. Повышение  $A_e$  индекса больше чем 500 нТ приводят к появлению двугорбой структуры аврорального пика. При увеличении этого индекса экваториальная граница овала движется на более низкие широты и происходит увеличение интенсивности УФ свечения.

Проведен совместный анализ данных детекторов ДУФ и ДРГЭ-1. Обнаружены совпадения сигналов в экваториальной зоне для двух пролетов спутника.

Проведен отбор данных спутника «Ломоносов» для анализа областей антропогенного УФ свечения ночной атмосферы. И проведен Фурье анализ вариаций значений кода АЦП антропогенного УФ свечения, с помощью

которого показано, что сигнал модулирован на частотах 120 Гц или 100 Гц, в зависимости от географического положения места регистрации. Проведены аналогичные измерения в лабораторных условиях на макете детектора «ТУС», показан тот же эффект модуляции на частоте 100 Гц.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Pierre Auger Collaboration. The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research vol. 798p. 172–213, 2015
2. Kawai H., Yoshida S., Yoshii H. et al. Telescope Array Experiment//Nuclear and Particle Physics Proceedings vol. 175–176 p. 221-226, 2008
3. Garipov G., Khrenov B.A., Klimov P.A. et al. Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as pathfinder of JEM-EUSO//Experimental Astronomy vol. 40 p. 315-326, 2015
4. Гарипов Г.К., Зотов М.Ю., Климов П.А. и другие. Детектор космических лучей предельно высоких энергий КЛПВЭ на борту МКС// Известия Российской академии наук. Серия физическая т. 79 стр. 358-361 2015
5. Budnev N., Karpov N., Kalmykov N. et al. The Tunka detector complex: from cosmic-ray to gamma-ray astronomy// Journal of Physics: Conference Series vol. 632, 2015
6. Antonov R.A., Beschapov S.P., Bonvech E.A. et al. Status of the SPHERE experiment// Journal of Physics: Conference Series vol. 409 p. 12094-12097, 2013
7. Catalano O., Agnetta G., Biondo et al. The atmospheric nightglow in the 300–400 nm wavelength: Results by the balloon-borne experiment “BABY”// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research vol. 480 p. 547–554, 2002
8. Гарипов Г.К., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и другие. Обнаружение глобальных явлений техногенного ультрафиолетового и инфракрасного свечений ночной атмосферы на спутнике Вернов// ЖЭТФ, том 150(3)стр.470–479, 2016.

9. Lebedinsky A.I., Boldyrev V.G., Tulupov V.I. The Spectrum of the Earth's heat radiation according to the observation from the Cosmos-45, Cosmos-65 and Cosmos-92 satellites// Space Research vol. 7 p. 905-914, 1967
10. Садовничий В. А., Панасюк М. И., Бобровников С. Ю. Первые результаты исследований космической среды на спутнике «Университетский - Татьяна»// Космические исследования том 45(4) с. 291-305, 2007
11. Garipov G.K., Khrenov B.A., Klimov P.A. Program of transient UV event research at Tatiana-2 satellite//Journal of Geophysical Research vol. 115, 2010
12. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Часть 1 Описание эксперимента// Космические исследования том 54(4) стр.277-285, 2016
13. Садовничий В.А., Амелюшкин А.М., Ангелопулос В. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов»// Космические исследования том 51(6) стр.470, 2013
14. Christensen A.B. et al. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager(GUVI) in the NASA TIMED satellite mission// Journal of Geophysical Research vol. 108 p.16, 2003
15. Веденькин Н.Н. и другие. Атмосферные вспышки в ультрафиолетовом и красном-инфракрасном диапазонах по данным спутника «Университетский-Таньяна-2»// ЖЭТФ том 140 стр. 1, 2011
16. Klimov P.A. et al. The atmosphere UV background phenomena measured by detector on-board “Tatiana” satellite// ICRC, 2007
17. Garipov G.K., Khrenov B.A., Panasyuk M.I. et al. UV radiation from the atmosphere: Results of the MSU “Tatiana” satellite measurements// Astroparticle Physics vol.24 p.400–408, 2005
18. Dmitriev A.V. et al. Latitudinal profile of UV nightglow and electron precipitations // Planetary and Space Science p. 735 , 2011

19. Kakimoto F., et al. A measurement of the air fluorescence yield//Nuclear Instruments and Methods vol. 372 p.527–533, 1996.
20. Tinsley, B.A. et al. Middle- and low-latitude emissions from energetic neutral atom precipitation seen from ATLAS under quiet magnetic conditions// Journal of Geophysical Research p.19577–19584, 1994
21. Wang, D.Y., Ward, W.E., Solheim, B.H., Shepherd, G.G., Longitudinal variations of green line emission rates observed by WINDII at altitudes 90–120 km during 1991–1996//Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics vol.64 p.1273–1286, 2002.
22. Liu, G., Shepherd, G.G., Roble, R.G., 2008. Seasonal variations of the nighttime O(1S) and OH airglow emission rates at mid-to-high latitudes in the context of the large-scale circulation//Journal of Geophysical Research vol.113, 2007.
23. Hanson W.B. Radiative Recombination of Atomic Oxygen Ions in the Nighttime F Region// Journal of Geophysical Research vol. 74(14) p.3720,1969
24. Hicks G. T., and T. A. Chubb, Equatorial aurora/airglow in the far ultraviolet// JGR vol. 75 p. 6233–6248 1970
25. APPLETON V. Two Anomalies in the Ionosphere// Nature vol.157, p. 691-691, 1946
26. Климов П. А., Зотов М. Ю., Чирская Н. П. Предварительные результаты орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий “ТУС”: регистрация прохождения частиц низких энергий через фотоприемник// Известия РАН. Серия физическая том 81(4) с. 442–445, 2017

