

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Климов Павел Александрович

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ИЗЛУЧЕНИЯ
АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В БЛИЖНЕМ УФ-ДИАПАЗОНЕ ПО
ДАНЫМ ОРБИТАЛЬНЫХ И НАЗЕМНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Научная специальность

1.3.1. «Физика космоса, астрономия»

1.6.18. «Науки об атмосфере и климате»

Диссертация на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук

МОСКВА

2023

Содержание

Введение	4
1. Разработанная и используемая научная аппаратура	25
1.1. Детектор УФ-излучения (ДУФ) на спутнике «Вернов»	25
1.2. Детектор ТУС на спутнике «Ломоносов»	31
1.2.1. Описание аппаратуры	31
1.2.2. Наземная калибровка электронного блока фотоприемников детектора ТУС	37
1.3. Методика полетной калибровки по статистическим характеристикам стационарного сигнала	43
1.3.1. Методика оценки чувствительности каналов	45
1.3.2. Калибровка фотоприемника детектора ТУС	49
1.4. Научная аппаратура «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) на борту МКС	53
1.5. Проект «КЛПВЭ» (K-EUSO)	59
1.6. Приборы серии «АУРА»	71
1.7. Фотометры проекта RAIPS	78
1.8. Выводы по главе 1	83
2. Квазистационарное свечение атмосферы в ближнем УФ-диапазоне	85
2.1. Введение	85
2.2. Результаты измерения квазистационарного излучения на спутниках МГУ	89
2.3. Выводы по главе 2.	100
3. Поиск космических лучей предельно высоких энергий	102
3.1. Введение	102
3.2. Орбитальная методика регистрации КЛ ПВЭ	108

3.3.	Результаты эксперимента ТУС	113
3.3.1.	Квазистационарный УФ-фон и оценки времени экспозиции	114
3.3.2.	Транзиентный УФ-фон и анализ работы триггерной системы	120
3.3.3.	ШАЛ-подобные события	134
3.4.	Результаты проекта «УФ атмосфера» в контексте регистрации КЛ ПВЭ	146
3.5.	Выводы по главе 3.	148
4.	Транзиентное свечение атмосферы Земли	149
4.1.	Введение	149
4.2.	Транзиентные атмосферные явления типа ELVES	163
4.3.	УФ-вспышки (BLUES)	169
4.4.	Энергетическое распределение УФ вспышек	173
4.5.	Спектральная методика определения типа атмосферной вспышки. УФ-вспышки (BLUES) по данным спутника «Вернов»	182
4.5.1.	Определение высоты вспышек по данным детектора ДУФ на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов»	182
4.5.2.	О возможности различения молниевых разрядов от высокоатмосферных транзиентов по данным детектора ДУФ на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов»	184
4.5.3.	События типа BLUES	186
4.5.4.	О возможности определения типа вспышек по данным детектора «АУРА» на спутнике «ДЕКАРТ»	189
4.6.	Особенности географического распределения УФ-транзиентов	194
4.6.1.	Зависимость распределения от энергии вспышек	194
4.6.2.	Серии вспышек	195
4.7.	Внегрозовые транзиентные явления	197
4.7.1.	Обзор экспериментальных данных	198
4.7.2.	Внегрозовые вспышки по данным спутника «Вернов»	200
4.7.3.	Необычные события, наблюдаемые в эксперименте ТУС204	204
4.8.	Выводы по главе 4.	208

5. Тонкая пространственно-временная структура аврорального свечения	210
5.1. Пульсирующие полярные сияния	210
5.2. Исследования УФ-пульсаций в космическом эксперименте «ТУС»	213
5.3. Корреляция УФ-пульсаций и магнитосферных потоков электронов высокой энергии	222
5.4. Исследования пространственно-временной структуры и вариаций спектра свечения ППС в проекте RAIPS	230
5.4.1. Проект RAIPS. Постановка задачи	230
5.4.2. Аппаратура проекта RAIPS	232
5.4.3. Некоторые результаты измерения фотометра	232
5.4.4. Спектрометрические измерения. Вариации излучения пульсирующих полярных сияний в спектральных линиях азота с 337 нм и 391 нм во время геомагнитных суббурь	238
5.5. Выводы по главе 5	253
Заключение	255
Благодарности	259
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	260

Введение

Актуальность темы и степень ее разработанности

Излучение атмосферы Земли, в том числе в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм), является важным проявлением различных процессов, происходящих в атмосфере. Это процессы как внутреннего характера, связанные с перераспределением электрических зарядов (грозовые явления) или с антропогенным влиянием, так и результат воздействия на атмосферу Земли внешних, т.е. космических факторов: проникновение энергичного ионизирующего излучения, космических лучей в широком диапазоне энергий, прохождение метеоров и пр. Измерения пространственно-временной структуры свечения позволяют исследовать не только механизмы процессов в атмосфере Земли, но и источники их происхождения, включая космические. При этом атмосфера выступает в качестве источника свечения (спектры излучения зависят от состава, плотности атмосферы), естественного оптического фильтра (регистрация на определенных длинах волн поглощения позволяет определять тип разряда и его высоту), а также огромного детектора, преобразующего энергию сильно ионизирующего излучения в оптический диапазон, регистрируемый с борта космического аппарата или наземными средствами.

Еще в 1925 году были предсказаны высокоатмосферные эффекты над грозовыми областями, связанные с повышенной ионизацией, потоками энергичных частиц и оптическими явлениями [1]. Позже эти явления были зарегистрированы оптическими камерами [2–4], установлено наличие коррелированных с грозовыми областями потоков энергичного гамма-излучения [5], а также пучков электронов и позитронов [6]. Исследования этих явлений с борта искусственных спутников Земли

ведутся в МГУ им. М.В. Ломоносова, начиная с первого научно-образовательного спутника «Университетский-Татьяна», запущенного в 2005 году [7]. Сложилась классификация подобных транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ), предложены и проработаны основные механизмы возникновения [8], исследованы глобальные характеристики: частота появления и распределение по Земному шару, суммарное энерговыделение [9], влияние на химический состав атмосферы [10]. Однако остается нерешенным ряд важных вопросов: какова взаимосвязь гамма- и оптических транзиентов, какой механизм образования энергичных гамма-квантов является основным, есть ли взаимосвязь между широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) и появлением ТАЯ и пр. Особый интерес вызывают наблюдения, проводимые в синем и ближнем УФ-излучении, поскольку этот спектральный диапазон ассоциируется с внутриоблачными и надоблачными процессами, которые могут иметь важное значение в механизме зарождения и формирования молниевых разрядов. Одни из первых наблюдений и описаний таких событий были сделаны по данным спутников МГУ [11, 12].

Интересным объектом для регистрации являются события типа двойной ELVES (Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources), поскольку детальные измерения пространственно-временной структуры этих явлений позволяют точно реконструировать положение локального родительского источника электромагнитного импульса [13]. По современным представлениям, таким источником служит компактный внутриоблачный разряд (КВР). Область образования КВР и распределение по высоте внутри облака до сих пор являются малоизученными. Орбитальный телескоп с высоким временным разрешением и направлением наблюдения в надиры позволяет получить динамику развития таких явлений как ELVES и локализовать их источники [14].

Орбитальная аппаратура позволяет проводить измерения по всему Земному шару, тем самым обзревая как известные грозовые области, так и районы хорошей погоды, поверхность океана и пр. Это открывает дополнительные возможности по исследованию необычных

вспышечных явлений. Так, одной из нерешенных загадок физики атмосферы является возникновение так называемых внегрозовых оптических транзиентных явлений. Предлагаются различные механизмы их возникновения: рассеяние света от очень удаленных молний; свечение атмосферы при высыпании релятивистских электронов из радиационных поясов Земли при взаимодействии с электромагнитным импульсом далекого молниевых разряда; ускорение электронов молниевыми разрядами в сопряженной точке геомагнитного поля с их последующим проникновением в атмосферу. В авроральной и субавроральной области возможным источником оптических вспышек могут быть микровсплески высыпающихся электронов [15]. Но пока ни один из них не является доказанным [16].

Самым быстрым процессом, приводящим к свечению в ближнем УФ-диапазоне является ШАЛ от космических лучей (КЛ). Измерение параметров ШАЛ – единственная методика регистрации космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ), позволяющая получить удовлетворительную статистику событий, оценить энергетический спектр частиц, проводить исследования анизотропии. В результате работы наземных установок по регистрации ШАЛ [17] и [18]) зарегистрировано более десятка тысяч событий с энергией, превышающей предел Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК) $\sim 5 \cdot 10^{19}$ эВ. Однако целый ряд вопросов остается нерешенным ввиду недостаточной статистики наблюдений и ограниченного поля зрения наземных установок. Одним из самых ярких противоречий является различная форма спектра в области за ГЗК-пределом, полученная по данным разных экспериментов [19]. Было предложено осуществлять измерения флуоресценции ШАЛ с орбиты Земли [20], затем эта идея развивалась в ряде проектов и впервые реализована в проекте ТУС [21]. Регистрация ШАЛ с орбиты позволяет проводить измерения по всей небесной сфере с помощью одного прибора и практически с равномерной экспозицией [22]. Но существенной трудностью методики является необходимость измерений в условиях сильно переменного фона ночной атмосферы. Поэтому детальные исследования пространственно-временной структуры УФ-излучения атмосферы важны для определения времени экспозиции, порога

регистрации и моделирования работы триггерной системы орбитальных детекторов КЛ ПВЭ. Таким образом, выполненные в данной работе исследования имеют важное значение для будущих космических проектов по регистрации КЛ ПВЭ (например, [23, 24]).

Отдельного внимания заслуживает авроральная атмосфера, разнообразие форм и типов свечения, которые являются маркерами состояния магнитосферы и максимально подвержены влиянию факторов космической погоды. Среди них выделяется тип пульсирующих полярных сияний (ППС) [25]. Исследование пространственно-временных структур свечения, высоты его возникновения, могут дать дополнительную информацию о механизмах ускорения частиц в магнитосфере Земли вплоть до релятивистских энергий.

Таким образом, регистрация ближнего УФ-излучения с высоким временным разрешением является мощным инструментом геофизических, астрофизических и космофизических исследований, что определяет актуальность данной работы, вариативность объектов и задач исследования.

Регистрация транзиентного свечения атмосферы сопряжена с трудной экспериментальной задачей создания оптического прибора, который бы обладал одновременно и высоким временным разрешением, и широким полем зрения, и пространственным разрешением, и глобальным охватом наблюдениями всего Земного шара, и высокой чувствительностью. Эта задача решена в данной работе – создана серия универсальных орбитальных приборов по регистрации ближнего УФ-излучения атмосферы (от детекторов для спутников нанокласса: приборы серии АУРА, до орбитальных телескопов с площадью апертуры более 1 м²: телескоп ТУС на борту спутника «Ломоносов»).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является экспериментальное исследование пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне на разных пространственных (от 1 км до глобального распределения по Земному шару) и временных (от 1 мкс

до нескольких минут) масштабах. Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Разработан метод исследования пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне на основе наблюдений на космических аппаратах с использованием широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением (~ 1 мкс).
2. Разработана и создана аппаратура, обеспечивающая изучение пространственно-временных структур атмосферного свечения в ближнем УФ-диапазоне в орбитальных экспериментах.
3. Реализованы космические эксперименты по исследованию ближнего УФ-свечения атмосферы Земли с использованием высокочувствительной, широкоугольной аппаратуры высокого временного разрешения.
4. Проведен анализ экспериментальных данных, полученных в космических экспериментах, с целью отбора и классификации типов источников квазистационарного и транзиентного УФ-излучения атмосферы различной природы.
5. Определены условия регистрации КЛ ПВЭ по флуоресцентному излучению ШАЛ с околоземной орбиты на основе анализа вариаций фонового излучения и транзиентных событий, имитирующих ШАЛ.
6. Осуществлен поиск внегрозовых транзиентных атмосферных явлений и проведен анализ их пространственно-временной структуры.
7. Проведен анализ ближнего УФ-свечения в авроральной и субавроральной зонах совместно с данными спутниковых экспериментов по регистрации заряженных частиц.
8. Предложена и разработана система наземных широкоугольных фотометров для стереометрических наблюдений пространственно-временной структуры пульсирующих полярных сияний.

Объект и предмет исследования

Объектом изучения является свечение атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне на различных пространственно-временных масштабах. В качестве предмета исследования рассмотрены: глобальная пространственная структура свечения, спектральные особенности транзиентного свечения как основа метода определения типа события и его высоты в атмосфере Земли, интенсивность и кривая свечения транзиентных событий различного типа, механизмы их образования.

Методология исследования

Основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены экспериментально с помощью научной аппаратуры, разработанной в НИИЯФ МГУ при непосредственном участии соискателя либо в качестве ответственного исполнителя, либо руководителя проекта: детекторы УФ-излучения на борту спутников «Вернов», «Ломоносов», наноспутников формата кубсат «ДЕКАРТ», «ВДНХ-80», а также Международной космической станции. Наблюдения за излучением атмосферы с орбиты Земли имеет ряд важных преимуществ. Во-первых, они позволяют получить глобальное распределение излучения по всей Земле (как стационарного, так и транзиентного), исследовать области недоступные для наблюдения с поверхности Земли (например, над океанами, в Арктике и Антарктике). Во-вторых, верхняя часть атмосферы существенно более прозрачная в ближнем УФ-диапазоне, что позволяет регистрировать излучение от высокоатмосферных транзиентных явлений без искажения (измерения спектрального состава). В-третьих, при сочетании высокого временного разрешения, высокой чувствительности и большого поля зрения орбитальный детектор становится многофункциональной астрофизической, космофизической и геофизической обсерваторией.

Научная новизна

1. Впервые разработан метод исследования пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне на основе наблюдений на космических аппаратах, с использованием

широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением (~ 1 мкс).

2. Впервые проведены глобальные (от при-экваториальных до полярных областей) измерения УФ-свечения Земли на разных временных масштабах – от миллисекунд до суток, получено географическое распределение транзиентных атмосферных явлений в УФ-диапазоне.
3. Впервые разработан, испытан и запущен на орбиту высокочувствительный детектор (телескоп) УФ-излучения атмосферы, в том числе широких атмосферных ливней, ТУС. Проведен анализ данных первого в мире орбитального телескопа ближнего УФ-излучения с высоким временным разрешением и площадью апертуры 2 м^2 , проведена оценка работы системы отбора данных, исследованы квазипостоянный и транзиентный фон для регистрации КЛ ПВЭ.
4. Получены уникальные данные о пространственно-временной структуре излучения атмосферы Земли под воздействием различных факторов. По данным наблюдений на спутниках «Вернов» и «Ломоносов» впервые обнаружены транзиентные события в УФ-диапазоне, не связанные с грозовой активностью (внегрозовые транзиенты).
5. Впервые проведены наблюдения пульсирующих полярных сияний в ближнем УФ-диапазоне с орбиты Земли одновременно с потоками энергичных электронов. Разработана и реализована система широкоугольных фотометров для стереометрических и спектрометрических наблюдений пульсирующих полярных сияний.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданный метод регистрации свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) на основе мониторинга на космических аппаратах, с использованием разработанной многофункциональной научной аппаратуры с высоким временным разрешением (~ 1 мкс), позволяет исследовать пространственно-временную структуру

транзиентных атмосферных явлений геофизической, космофизической и астрофизической природы.

2. Методика полетной калибровки матрицы фотоэлектронных умножителей, основанная на вычислении статистических характеристик цифровых осциллограмм событий со стационарным уровнем сигнала, позволяет проводить контроль чувствительности и калибровку многоканального фотоприемника в отсутствие калибровочного сигнала непосредственно в ходе эксперимента.
3. Структура фонового излучения атмосферы Земли и вариации его интенсивности, в зависимости от фазы Луны, облачного покрова, антропогенной деятельности и пр., определяет общую долю времени регистрации частиц КЛ ПВЭ на уровне 8,5 %, что обеспечивает экспозицию детектора с полем зрения 0,3 ср порядка 18000 км²ср год при энергии регистрируемых событий более 100 ЭэВ.
4. Транзиентные атмосферные явления в ближнем УФ-диапазоне обладают следующими характеристиками: энергия, выделяемая в ближнем УФ-диапазоне от 10²⁰ до 10²⁶ фотон/событие, географическое распределение событий с большой энергией соответствует грозovým областям и регистрируются длительными сериями вдоль траектории космического аппарата, события с меньшей энергией имеют относительно равномерное географическое распределение и не связаны с молниевой активностью.
5. Новый класс УФ-транзиентных явлений внегрозовой природы характеризуется следующими параметрами: длительность вспышки порядка 30 мс, отсутствует излучение в красном диапазоне спектра (более 600 нм), энергия излучения не более 3 кДж. Эти события не связаны с грозовой активностью как в месте регистрации, так и в сопряженной точке магнитного поля Земли.
6. Транзиентные световые явления типа ELVES образуются при максимальном токе обратного удара родительской молнии менее 30 кА.
7. Слабые УФ-пульсации в субавроральной зоне коррелируют с

повышенными потоками высокоэнергичных электронов (более 100 кэВ), образующихся в результате интенсивной и продолжительной геомагнитной активности.

8. Интенсивность излучения двух линий молекулярного азота 391 нм ($N_2\ 2P$) и 337 нм ($N_2^+\ 1N$) во время пульсирующих полярных сияний коррелирует с авроральной геомагнитной активностью, отражающей интегральный поток заряженных частиц в атмосферу. Отношение интенсивности свечения этих линий ($R_{391/337}$) ниже модельных расчетов для высыпающихся электронов в диапазоне энергий от 0,1 до 16 кэВ.

Теоретическая и практическая значимость

Исследование вариации интенсивности и временных структур свечения атмосферы в ближнем УФ-диапазоне имеет важное значение для планирования космических экспериментов и проектирования научной аппаратуры для исследования космических лучей предельно высоких энергий. Структура фонового излучения определяет как пороги регистрации КЛ ПВЭ, экспозицию орбитальной обсерватории, так и условия работы триггерной системы. Разработанные методы и экспериментальные результаты уже используются для дальнейших измерений КЛ ПВЭ с борта космических аппаратов, в том числе в международных проектах JEM-EUSO и РОЕММА, а также, в предлагаемом в федеральную космическую программу, проекте ZeVS.

Детекторы «КЛПВЭ» и «УФ атмосфера» предназначены для наблюдения релятивистских треков КЛ и транзиентных атмосферных явлений. По данным измерений возможно рассчитать скорость движущегося объекта и его положение, что позволяет наблюдать небольшие по размеру осколки космического мусора, а детекторы могут быть использованы как элементы системы уничтожения низковысотного космического мусора в части его обнаружения, определения параметров и сопровождения. Эти же приборы могут эффективно использоваться для регистрации метеоров и микрометеоров в ближнем УФ-диапазоне.

Транзиентные УФ-вспышки являются индикатором процессов в

атмосфере Земли с участием высокоэнергичных потоков заряженных частиц, вызывающих ионизацию азота. Примером таких процессов являются земные гамма-вспышки. По соотношению интенсивности излучения различных линий молекулярного азота можно судить об основном процессе ускорения электронов до релятивистских энергий: лавины релятивистских убегающих электронов в крупномасштабном, но относительно слабом электрическом поле грозовой области, либо ускорение в сильном локальном поле стримера.

Анализ пространственно-временной структуры транзиентных явлений типа ELVES может служить эффективным инструментом локализации и исследования внутриоблачных процессов, играющих важную роль в формировании молниевых разрядов.

Стереометрические наблюдения высотной структуры свечения в ближнем УФ-диапазоне позволяют проводить прямые измерения глубины максимума ионизации, возникающей за счет потоков высокоэнергичных электронов в авроральной области, и, как следствие, восстанавливать максимальные энергии частиц, ускоренных в магнитосфере Земли. Это важно для изучения предельных возможностей магнитосферных ускорителей и построения их моделей. Эти исследования позволяют определить интегральное влияние высокоэнергичных частиц на авроральную атмосферу Земли и их роль в динамике и состоянии озонового слоя в условиях полярной ночи.

Степень достоверности результатов

Степень достоверности результатов обеспечивается строгостью используемых экспериментальных методов, применением современных методов моделирования (например, программный пакет ESAF) и анализа данных (например, Signal Processing Toolbox – MATLAB), сравнением полученных в разных экспериментах результатов (интенсивности УФ-свечения получены по данным спутников «Татьяна-2», «Вернов», «УФ атмосфера», потоки заряженных частиц исследовались по двум детекторам на разных космических аппаратах: «Ломоносов» и «Метеор-М2»), а также с известными результатами других экспериментов как по исследованию

транзиентных явлений (ISUAL, ASIM, и др), так и полярных сияний (результаты измерений камерами всего неба и на спутниках).

Публикации автора по теме диссертации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 50 печатных работах, в том числе в 47 статьях в рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science, Scopus и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а также в главе коллективной монографии.

Публикации, индексируемые Web of Science, Scopus

- A1 Гарипов Г. К., Климов П. А., Морозенко В. С. и др. Временные и энергетические характеристики УФ вспышек в атмосфере по данным спутника Университетский-Татьяна // Космические исследования. — 2011. — Т. 49, № 5. — С. 403–410. Garipov G. K., Klimov P. A., Morozenko V. S. et al. Time and energy characteristics of UV flashes in the atmosphere: Data of the Universitetsky-Tatiana satellite // Cosmic Research. — 2011. — Vol. 49, No. 5. — P. 391–398. Импакт-фактор журнала 0.6 (Web of Science, 2022).
- A2 Веденькин Н. Н., Гарипов Г. К., Климов П. А. и др. Атмосферные вспышки в ультрафиолетовом и красном диапазонах по данным спутника Университетский-Татьяна // Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 2011. — Т. 140, № 5. — С. 900–910. Vedenkin N. N., Garipov G. K., Klimov P. A. et al. Atmospheric ultraviolet and red-infrared flashes from Universitetsky-Tatiana-2 satellite data // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2011. — Vol. 113, No. 5. — P. 781–790. Импакт-фактор журнала 1.29 (Web of Science, 2022).
- A3 Садовничий В. А., ..., Климов П. А. и др. Исследования космической среды на микроспутниках Университетский-Татьяна и Университетский-Татьяна-2 // Астрономический вестник. Исследования солнечной системы. — 2011. — Т. 45, № 1. — С. 5–31. Sadovnichy V. A., Panasyuk M. I., Yashin I. V. et al. Investigations of the space environment aboard the Universitetsky-Tat'yana and Universitetsky-Tat'yana-2 microsatellites // Solar System Research. —

2011. — Vol. 45, No. 1. — P. 3–29. Импакт-фактор журнала 0.706 (Web of Science, 2022).
- A4 Dmitriev A. V., Klimov P. A. et al. Latitudinal profile of UV nightglow and electron precipitations // *Planetary and Space Science*. — 2011. — Vol. 59, No. 8. — P. 733–740. Импакт-фактор журнала 2.03 (Web of Science, 2022).
- A5 Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A. et al. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite // *Journal of Geophysical Research*. — 2013. — Vol. 118, No. 2. — P. 370–379. Импакт-фактор журнала 5.013 (Scopus, 2022).
- A6 Grinyuk A. A., Klimov P. A. et al. The method and results of measurement of the optical parameters of the UHECR detector for the TUS space experiment // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. — 2014. — Vol. 763. — P. 604–609. Импакт-фактор журнала 1.455 (Web of Science, 2022).
- A7 Гарипов Г. К., Зотов М. Ю., Климов П. А. и др. Детектор космических лучей предельно высоких энергий КЛПВЭ на борту МКС // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2015. — Т. 79, № 3. — С. 358–361. Garipov G. K., Zotov M. Yu., Klimov P. A. et al. The KLYPVE ultrahigh energy cosmic ray detector on board the ISS // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2015. — Vol. 79, No. 3. — P. 326–328. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A8 Adams, J. H., ..., Klimov P. A. et al. [the JEM-EUSO Collaboration] Science of atmospheric phenomena with JEM-EUSO // *Experimental Astronomy*. — 2015. — Vol. 40. — P. 239–251. Импакт-фактор журнала 2.012 (Web of Science, 2022).
- A9 Adams, J. H., ..., Klimov P. A. et al. [the JEM-EUSO Collaboration] Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as pathfinder of JEM-EUSO // *Experimental Astronomy*. — 2015. — Vol. 40. — P. 315–326. Импакт-фактор журнала 2.012 (Web of Science, 2022).

- A10 Панасюк М. И., ..., Климов П. А. и др. Эксперимент на спутнике Вернов: транзиентные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. I. Описание эксперимента // Космические исследования. — 2016. — Т. 54. — №. 4. — С. 277–285. Panasyuk M. I., ..., Klimov P. A. et al. Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part I: Description of the experiment // Cosmic Research. — 2016. — Vol. 54, No. 4. — P. 261–269. Импакт-фактор журнала 0.6 (Web of Science, 2022).
- A11 Панасюк М. И., ..., Климов П. А. и др. Эксперимент на спутнике Вернов: транзиентные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. II. Первые результаты // Космические исследования. — 2016. — Т. 54. — №. 5. — С. 369–376. Panasyuk, M. I. ..., Klimov P. A., et al. Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part II. First results // Cosmic Research. — 2016. — Vol. 54, No. 5. — P. 343–350. Импакт-фактор журнала 0.656 (Web of Science, 2022).
- A12 Panasyuk M. I., ..., Klimov P. A. et al. RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft // Advances in Space Research. — 2016. — Vol. 57, No. 3. — P. 835–849. Импакт-фактор журнала 2.152 (Web of Science, 2022).
- A13 Климов П. А., Гарипов Г. К., Хренов Б. А. и др. Транзиентные атмосферные явления по результатам измерений на спутнике «Вернов» // Исследование Земли из космоса. — 2017. — № 3. — С. 65–75. P. A. Klimov, G. K. Garipov, B. A. Khrenov et al. Transient atmospheric events measured by detectors on the Vernov satellite // Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics. — 2017. — Vol. 53, No. 9. — P. 924–933. Импакт-фактор журнала 0.814 (Scopus, 2022).
- A14 Климов П. А., Зотов М. Ю., Чирская Н. П. и др. Предварительные результаты орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий «ТУС»: регистрация эффекта прохождения частиц низких энергий через фотоприемник // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2017 — Т. 81. — №. 4. — С. 442–445. Klimov P. A., Zotov M. Y., Chirskaya N. P. et al. Preliminary results

- from the TUS ultra-high energy cosmic ray orbital telescope: Registration of low-energy particles passing through the photodetector // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2017. — Vol. 81, No. 4. — P. 407–409. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A15 Casolino M., Klimov P., Piotrowski L. Observation of ultra high energy cosmic rays from space: Status and perspectives // Progress of Theoretical and Experimental Physics. — 2017. — Vol. 2017. — No. 12. — P. 12A107. Импакт-фактор журнала 2.572 (Web of Science, 2022).
- A16 Khrenov B. A., Klimov P. A., Panasyuk M. I. et al. First results from the TUS orbital detector in the extensive air shower mode // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2017. — Vol. 2017. — No. 09. — P. 006. Импакт-фактор журнала 5.839 (Web of Science, 2022).
- A17 Klimov P. A., Garipov G. K, Khrenov B. A. et al. Vernov satellite data of transient atmospheric events // Journal of Applied Meteorology and Climatology. — 2017. — Vol. 56, No. 8. — P. 2189–2201. Импакт-фактор журнала 2.923 (Web of Science, 2022).
- A18 Klimov P. A., Panasyuk M. I., Khrenov B. A., et al. The TUS detector of extreme energy cosmic rays on board the Lomonosov satellite // Space science reviews. — 2017. — Vol. 212. — P. 1687–1703. Импакт-фактор журнала 8.017 (Web of Science, 2022).
- A19 Sadovnichii V. A., ..., Klimov P. A. et al. Lomonosov satellite—space observatory to study extreme phenomena in space // Space Science Reviews. — 2017. — Vol. 212, No. 3-4. — P. 1705–1738. Импакт-фактор журнала 8.017 (Web of Science, 2022).
- A20 Capel F., Belov A., Casolino M., Klimov P. et al. Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UV emission from the International Space Station // Advances in Space Research. — 2018. — Vol. 62. — No. 10. — P. 2954-2965. Импакт-фактор журнала 2.152 (Web of Science, 2022).
- A21 Belov A., ..., Klimov P. A. et al. The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system // Advances in Space Research. — 2018.

— Vol. 62. — No. 10. — P. 2966–2976. Импакт-фактор журнала 2.152 (Web of Science, 2022).

- A22 Klimov P. A., Kaznacheeva M. A., Khrenov B. A. et al. UV transient atmospheric events observed far from thunderstorms by the Vernov satellite // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2018. — Vol. 15. — No. 8. — P. 1139–1143. Импакт-фактор журнала 3.966 (Web of Science, 2022).
- A23 Казначеева М. А., Климов П. А., Хренов Б. А. Транзиентный УФ фон при регистрации ШАЛ орбитальным детектором «ТУС» // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2019. — Т. 83. — №. 8. — С. 1125–1128. Kaznacheeva M. A., Klimov P. A., Khrenov B. A. Transient UV background when registering EASes with the TUS orbital detector // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2019. — Vol. 83. — No. 8. — P. 1024–1027. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A24 Klimov P. A., Khrenov, B. A., Kaznacheeva, M. A. et al. Remote sensing of the atmosphere by the ultraviolet detector TUS onboard the Lomonosov satellite // Remote Sensing. — 2019. — Vol. 11. — No. 20. — P. 2449. Импакт-фактор журнала 4.848 (Web of Science, 2022).
- A25 Panasyuk M., Klimov P., Svertilov S. et al. Universat-SOCRAT multi-satellite project to study TLEs and TGFs // Progress in Earth and Planetary Science. — 2019. — Vol. 6. — No. 1. — P. 1–19. Импакт-фактор журнала 3.604 (Web of Science, 2022).
- A26 Хренов Б. А., Гарипов Г. К., Зотов М. Ю., Климов П. А. и др. Исследование вспышек излучения атмосферы в области ближнего ультрафиолета с помощью детектора ТУС на борту спутника Ломоносов // Космические исследования. — 2020. — Т. 58. — №. 5. — С. 355–368. Khrenov B. A., Garipov G. K., Zotov M. Y., Klimov P. A. et al. A study of atmospheric radiation flashes in the near-ultraviolet region using the TUS detector aboard the Lomonosov satellite // Cosmic Research. — 2020. — Vol. 58. — P. 317–329. Импакт-фактор журнала 0.6 (Web of science, 2022).

- A27 Chernov D. V., Glinkin E. V., Klimov P. A., Murashov A. S. et al. First results of UV radiation measurements made by AURA detector onboard VDNH-80 cubesat // *Advances in the Astronautical Sciences*. — 2020. — Vol. 173. — P. 529–536. Импакт-фактор журнала 0.256 (Scopus, 2022).
- A28 Khrenov B. A., Garipov G. K., Kaznacheeva M. A., Klimov P. A., et al. An extensive-air-shower-like event registered with the TUS orbital detector // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. — 2020. — Vol. 2020. — No. 03. — P. 033. Импакт-фактор журнала 5.839 (Web of Science, 2022).
- A29 Глинкин Е. В., Климов П. А., Мурашов А. С., Чернов Д. В. Детектор излучения атмосферы АУРА на основе кремниевых фотоумножителей для малых космических аппаратов типа кубсат // *Приборы и техника эксперимента*. — 2021. — Т. 2. — С. 121–127. Glinkin E. V., Klimov P. A., Murashov A. S., Chernov D. V. The AURA atmosphere radiation detector based on silicon photomultipliers for small spacecraft of the cubesat type // *Instruments and Experimental Techniques*. — 2021. — Vol. 64, No. 2. — P. 291–296. Импакт-фактор журнала 0.573 (Web of Science, 2022).
- A30 Климов П. А. Эксперимент «УФ атмосфера» (mini-EUSO) — широкоугольный линзовый телескоп на борту МКС // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85. — №. 4. — С. 519-521. Klimov P. A. The UV Atmosphere (Mini-EUSO) Experiment: A Wide-Field-of-View Lens Telescope on Board the ISS // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2021. — Vol. 85. — No. 4. — P. 389–391. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A31 Климов П. А., Панасюк М. И. Измерения космических лучей предельно высоких энергий с орбиты земли: от проекта «ТУС» к К-EUSO и далее // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2021. — Т. 85, № 4. — С. 522–524. Klimov P. A., Panasyuk M. I. Measuring ultra-high-energy cosmic rays from earth orbit: From the TUS project to K-EUSO and beyond // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2021. — Vol. 85, No. 4. — P. 392–394. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A32 Климов П. А., Сигаева К. Ф., Шаракин С. А. Полетная калибровка

- фотоприемника детектора ТУС // Приборы и техника эксперимента. — 2021. — Т. 3. — С. 112–118. Klimov P. A., Sigaeva K. F., Sharakin S. A. Flight calibration of the photodetector in the TUS detector // Instruments and Experimental Techniques. — 2021. — Vol. 64, No. 3. — P. 450–455. Импакт-фактор журнала 0.573 (Web of Science, 2022).
- A33 Климов П. А., Сигаева К. Ф., Шаракин С. А. Метод полетной калибровки орбитального телескопа космических лучей ТУС // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — Т. 85, № 8. — С. 1165–1168. Klimov P. A., Sigaeva K. F., Sharakin S. A. In-flight calibration of the TUS orbital cosmic-ray telescope // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. — 2021. — Vol. 85, No. 8. — P. 898–900. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A34 Bacholle S., . . . , Klimov P. A. et al. Mini-EUSO mission to study earth UV emissions on board the ISS // Astrophysical Journal, Supplement Series. — 2021. — Vol. 253, No. 2. — P. 36. Импакт-фактор журнала 8.136 (Web of Science, 2022). A35 Klimov P. A., Sigaeva K. F. Fast near-UV radiation pulsations measured by the space telescope TUS in the auroral region // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2021. — Vol. 220. — P. 105672. Импакт-фактор журнала 1.735 (Web of Science, 2022).
- A36 Barghini D., . . . , Klimov P. A. et al. UV telescope TUS on board Lomonosov satellite: Selected results of the mission // Advances in Space Research. — 2022. — Vol. 70, No. 9. — P. 2734–2749. Импакт-фактор журнала 2.152 (Web of Science, 2022). A37 Battisti M., . . . , Klimov P. A. et al. Onboard performance of the level 1 trigger of the Mini-EUSO telescope // Advances in Space Research. — 2022. — Vol. 70. — No. 9. — P. 2750–2766. Импакт-фактор журнала 2.152 (Web of Science, 2022).
- A38 Belov A. A., Klimov P. A., Kozelov B. V. et al. Optical complex for the study of pulsating aurora with sub-millisecond time resolution on the basis of the Verkhnetulomsky observatory // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2022. — Vol. 235. — P. 105905. Импакт-фактор журнала 1.735 (Web of Science, 2022).
- A39 Bisconti F., . . . , Klimov P. A. et al. Pre-flight qualification tests of the

- Mini-EUSO telescope engineering model // *Experimental Astronomy*. — 2022. — Vol. 53. — P. 133–158. Импакт-фактор журнала 2.012 (Web of Science, 2022).
- A40 Klimov P. A., Battisti M., Belov A. A. et al. Status of the K-EUSO orbital detector of ultra-high energy cosmic rays // *Universe*. — 2022. — Vol. 8. — No. 2. — P. 88. Импакт-фактор журнала 2.278 (Web of Science, 2022).
- A41 Klimov P. A., Kalegaev V. V., Sigaeva K. F. et al. Near-UV Pulsations in the aurora region measured by orbital telescope TUS during high-intensity and long-duration continuous AE activity // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 15. — No. 1. — P. 147. Импакт-фактор журнала 4.848 (Web of Science, 2022).
- A42 Klimov P. A., Sharakin S. A., Belov A. A. et al. System of imaging photometers for upper atmospheric phenomena study in the Arctic region // *Atmosphere*. — 2022. — Vol. 13. — No. 10. — P. 1572. Импакт-фактор журнала 2.686 (Web of Science, 2022).
- A43 Белов А. А., Климов П. А., Козелов Б. В. и др. Модернизированный оптический комплекс на полигоне «Верхнегуломский»: научная аппаратура и первые результаты // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2023. — Т. 87, № 2. — С. 241–247. Belov A. A., Klimov P. A., Kozelov B. V. et al. The upgraded optical complex in the Verkhnetulomsky observatory: Equipment and first results // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2023. — Vol. 87. — No. 2. — P. 207–213. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A44 Белов А. А., Климов П. А., Шаракин С. А., Зотов М. Ю. Орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий: статус и перспективы проекта КЛПВЭ // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. — 2023. — Т. 87, № 7. — С. 923–926. Belov A. A., Klimov P. A., Sharakin S. A., Zotov M. Yu. An orbital detector of ultra-high-energy cosmic rays: Status and prospects of the KLYPVE project // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. — 2023. — Vol. 87. — No. 7. — P. 867–869. Импакт-фактор журнала 0.455 (Scopus, 2022).
- A45 Casolino M., . . . , Klimov P. A. et al. Observation of night-time emissions

of the Earth in the near UV range from the international space station with the mini-EUSO detector // Remote Sensing of Environment. — 2023. — Vol. 284. — P. 113336. Импакт-фактор журнала 10.164 (Web of Science, 2022).

A46 Coleman A., ..., Klimov P. A. et al. Ultra high energy cosmic rays the intersection of the cosmic and energy frontiers // Astroparticle Physics. — 2023. — Vol. 147. — P. 102794. Импакт-фактор журнала 2.724 (Web of Science, 2022).

A47 Klimov P.A., Nikolaeva V.D., Belov A.A. et al. Variations of Pulsating Aurora Emission in 337 nm and 391 nm Nitrogen Spectral Lines During Geomagnetic Substorms // Universe. — 2023. — Vol. 9. — No. 441. Импакт-фактор журнала 2.278 (Web of Science, 2022).

Иные публикации

A48 Garipov G., Grigoriev A., Khrenov B., Klimov P., Panasyuk M. High energy transient luminous atmospheric phenomena: the potential danger for suborbital flights // Extreme Events in Geospace: Origins, Predictability, and Consequences. — 525 B STREET, STE 1900, SAN DIEGO, USA, CA,92101-4495: ELSEVIER INC. 2017. — P. 473–490.

A49 Klimov P. et al. Status of the KLYPVE-EUSO detector for EECR study on board the ISS //35th International Cosmic Ray Conference. — Sissa Medialab. — 2018. — Vol. 301. — P. 412.

A50 Klimov P. A., Sharakin S. A., Kaznacheeva M. A. Double ELVES measured by the TUS space detector //Atmosphere, Ionosphere, Safety. — 2020. — C. 137–140.

A51 Khrenov B. A., Kalmykov N. N., Klimov P. A. et al. Relativistic dust grains: a new subject of research with orbital fluorescence detectors // Proceedings of Science. — 2021. — Vol. 395. — P. 315.

Личный вклад автора

Все представленные результаты были получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в постановке и проведении описанных космических экспериментов,

разработке научной аппаратуры (телескоп ТУС на спутнике «Ломоносов», научная аппаратура «УФ атмосфера» и комплекс «КЛПВЭ» для МКС, приборы серии «АУРА» для малых космических аппаратов, система стереометрических фотометров для исследования пульсирующих полярных сияний RAIPS), ее моделировании и обработке экспериментальных данных. Автор диссертации является руководителем работы по проектам ТУС, «УФ атмосфера», «КЛПВЭ», RAIPS. Подготовка публикаций и докладов выполнена лично автором или при его активном участии.

В статьях А1, А2, А4, А5, А13, А17, А48 автором проведен анализ данных (вклад 40 %). В работе А22 автор диссертации является первым и основным автором, вклад 60 %. В статьях по проектам «Татьяна-2», «Вернов» и «Ломоносов» (А3, А10-А12, А19) автором написаны разделы, посвященные исследованиям транзиентных световых явлений на этих космических аппаратах, общий вклад автора в работу можно оценить как 10 %. В работах по проекту ТУС (А14, А16, А18, А23, А24, А26, А28, А36, А50, А51) автор является одним из основных (лично участвовал в разработке, моделировании, изготовлении аппаратуры, анализе данных и получении результатов) и вклад в публикации – не менее 40 %. В работах А32 и А33 автором предложен и апробирован метод полетной калибровки многоканального фотоприемника на основе ФЭУ, вклад не менее 50 %. Проект RAIPS разработан под руководством автора, вклад автора в соответствующие публикации по проекту и исследованиям пульсирующих полярных сияний (А35, А38, А41–А43, А47) является определяющим. Публикации по проекту «УФ атмосфера» (А30, А34, А37, А39, А45) выполнены совместно с коллаборацией JEM-EUSO, автор принимал участие в написании текста, получении основных результатов и их обсуждении (вклад автора 15 %), при этом автор принимал активное участие в создании и тестировании аппаратуры, что отражено в работах (А20, А21), вклад автора 20 %. В статьях коллаборации JEM-EUSO, посвященных проекту ТУС и исследованию атмосферных транзиентов (А8, А9) вклад автора определяющий, т.к. сами исследования и тексты статей написаны им лично. В работах по аппаратуре и результатам серии фотометров «АУРА» (А25, А27, А29) вклад автора

определяющий, не менее 60 %. Работа по оптическим измерениям зеркала-концентратора (А6) выполнена совместно с ОИЯИ и вклад автора 20 %. В работах по проекту «КЛПВЭ» (А7, А15, А31, А40, А44, А49) автор является руководителем, лично автором выполнены оценки пороговой энергии, экспозиции, предложены варианты структуры аппаратуры и ее проработка, вклад автора 30 %. В статье А46 раздел про авроральное свечение написан целиком автором лично, автор принимал участие в обсуждении и редактировании остального текста (вклад автора 5 %).

Апробация результатов

Основные результаты исследований были представлены более чем на 20 различных международных конференциях, включая International cosmic rays conference (Рио-де-Жанейро, Бразилия, 2013; Пусан, Корея, 2017; Берлин, Германия, 2021), Всероссийская конференция по космическим лучам (Дубна, Россия, 2016; Барнаул, Россия, 2018; Москва, Россия 2020, Москва, Россия 2022), Апатитский семинар «Физика авроральных явлений» (Апатиты, Россия, 2020, 2021, 2022, 2023), 8-я международная конференция VERSIM (Апатиты, Россия, 2018), The 45th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods (Кируна, Швеция, 2018), Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» (Борок, Россия, 2015, 2017, 2021), Vulcano Workshop 2018 - Frontier Objects in Astrophysics and Particle Physics (Италия, 2018), Проблемы космофизики, Дубна, Россия, 10-13 июля 2023, COSPAR Scientific Assembly (Афины, Греция, 2022; Москва, Россия, 2014), 5th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop (Рим, Италия, 2020), а также регулярно (два раза в год) докладывались на совещаниях международной коллаборации JEM-EUSO.

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы. Изложена на 288 страницах и содержит 138 рисунков, 12 таблиц и 253 библиографических ссылки.

Глава 1. Разработанная и используемая научная аппаратура¹

В диссертационной работе приводятся результаты, полученные в ходе орбитальных экспериментов по исследованию свечения атмосферы в ближнем УФ-диапазоне на борту следующих космических аппаратов: «Вернов», «Ломоносов», Международная космическая станция (МКС), наноспутники «ВДНХ-80» и «ДЕКАРТ», а также изображающих фотометров на полигонах Полярного геофизического института в авроральной зоне в проекте RAIPS.

Ключевые характеристики детекторов для орбитальных экспериментов перечислены в таблице 1.1 и кратко описаны в этом разделе. Соискатель принимал участие в анализе данных детектора на спутнике «Вернов», в остальных проектах соискатель является руководителем работ, принимал участие в постановке задач проекта, разработке, изготовлении, испытаниях аппаратуры, проведении эксперимента, обработке и анализе данных и получении научных результатов.

1.1. Детектор УФ-излучения (ДУФ) на спутнике «Вернов»

Начиная с 2005 года, НИИЯФ МГУ проводит исследования УФ-свечения атмосферы Земли с высоким временным разрешением. Исследования проводились с помощью приборов ДУФ и ДУФиК на спутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» (кратко «Татьяна», Татьяна-2») [26–29] и спутнике «Вернов» [30–32]. Главной особенностью этих экспериментов является измерение в надир

¹Глава 1 написана на основе следующих работ из списка публикаций автора по теме диссертации: А6, А7, А9–А13, А15, А18–А21, А27, А29–А33, А37–А40, А42, А44, А49.

Таблица 1.1: Спутниковая научная аппаратура, используемая в диссертации

	«ДУФ»	ТУС	«УФ атмосфера»	«АУРА»	«КЛПВЭ»
Космический аппарат	«Вернов»	«Ломоносов»	МКС	ВДНХ-80; ДЕКАРТ	МКС*
Временное разрешение	0,5 мс	0,8 мкс	2,5 мкс	1 с; 10 мс	2,5 мкс
Пространственное разрешение	—	5 км	5 км	—	0,6 км
Диапазон длин волн, нм	240–400, 600–800	240–400	240–400	240–800	240–400
Апертура	0,4 см ²	2 м ²	490 см ²	0,25 см ²	3 м ²
Число каналов	2	256	2304	4	105
Поле зрения	16°	9°	40°	45°	20°×15°
* – эксперимент находится в стадии наземной подготовки.					

временного профиля транзиентного события с помощью фотоэлектронных умножителей, чувствительность которых много выше чувствительности видеокамеры.

Все вышеперечисленные спутниковые эксперименты проводились на солнечно-синхронных низких полярных орбитах. На спутнике «Татьяна» детектор имел один спектральный канал в УФ-диапазоне, а на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов» измерения велись как в ультрафиолетовом (УФ: 270–380 нм), так и в инфракрасном (ИК: 610–800 нм) диапазоне длин волн. Детекторы излучения (ДУФ) состоят из фотоэлектронных умножителей Hamamatsu R1463 и блока электроники (рис. 1.1). Полоса пропускания каждого из детекторов ограничена соответствующими фильтрами (УФС2 и КС11) толщиной 2 мм. При наблюдении с орбиты спутника пропускная способность атмосферы для длин волн менее 320 нм существенно зависит от соотношения между высотой озонового слоя атмосферы и высотой УФ-излучения ТАЯ. Для ТАЯ, находящихся над озоновым слоем,

пропускная способность атмосферы в широком диапазоне длин волн близка к 1, а для ТАЯ под озоновым слоем она резко обрывается при длинах волн менее 320 нм. При переходе от числа регистрируемых фотоэлектронов ФЭУ к числу фотонов ТАЯ важно также учитывать зависимость квантовой эффективности катода ФЭУ от длины волны. В УФ-диапазоне эффективность катода около 20 %, а для длин волн красного-инфракрасного (КИК) диапазона она на порядок меньше, 2 %. Чувствительная площадь катодов ФЭУ и поле зрения каждого детектора определено коллиматором, стоящим перед фильтром детектора. Он выполнен как набор отверстий в твердом непрозрачном диске диаметром 0,8 мм при толщине диска 2,2 мм так, что при вертикальном падении луча площадь приема излучения равна $0,4 \text{ см}^2$, и она падает до нуля при зенитном угле около 20° . Телесный угол поля зрения $0,06 \text{ ср}$, геометрический фактор каждого из детекторов $0,024 \text{ см}^2 \text{ ср}$.



Рис. 1.1: Схема детекторов УФ и ИК излучения, установленных на борту спутников «Татьяна-2» и «Вернов».

Фотография и блок-схема прибора приведены на рис. 1.2.

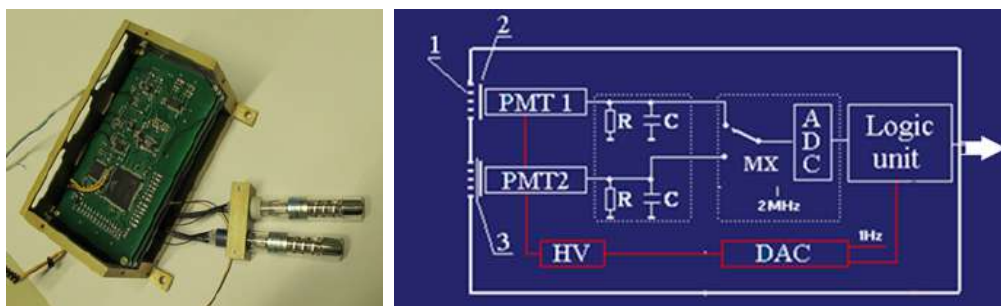


Рис. 1.2: Слева: фотография ДУФ в процессе сборки). Справа: блок-схема ДУФ.

Детекторы позволили отобразить транзиентные события в атмосфере Земли, изучить их временную структуру с разрешением 16 мкс

(для детектора на спутнике «Татьяна-1»), 1 мс (для детектора на спутнике «Татьяна-2») и 0,5 мс (для детектора на спутнике «Вернов»), географическое распределение, распределение по энергии и отношению сигналов в разных спектральных каналах.

Электронный триггер выбирает самый большой УФ-сигнал в шаге, постоянно действующего, цифрового осциллографа за интервал времени T . По команде триггера осциллограмма выбранного события переводится в главную память детектора, и затем все данные, накопленные в этой памяти, передаются на Землю. Отбор полезных событий производился по данным УФ-канала.

Информация о временном профиле сигнала от события в каждом из каналов УФ и ИК записывается в оперативную память в виде двух кодов: N – код АЦП и M – код высокого напряжения на обоих ФЭУ. По значениям кодов можно рассчитать число фотонов, прошедших через входные отверстия детектора за время t : $q(N, M) = \frac{\alpha N C t}{e p G(M) \tau}$, где α – коэффициент перехода от напряжения на конденсаторе анодной цепи в код АЦП N (разрешение АЦП), C – емкость анодной цепи, e – элементарный заряд, p – квантовая эффективность фотокатода, τ – постоянная времени анодной RC-цепи, G – коэффициент усиления ФЭУ. $G(M) \sim M^B$, B – калибровочный коэффициент.

Подробно алгоритм расчета, с учетом параметров детектора, описан в работе [28] на примере детектора ДУФИК на спутнике «Татьяна-2».

Во всех 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» $N_{mean} = 36 \pm 5$, пример распределения кода АЦП N в ходе измерений фонового УФ-излучения на спутнике «Вернов» приведен на рис. 1.3). АРУ позволяет измерять интенсивность фонового УФ и КИК излучения в широком диапазоне интенсивности (от $3 \cdot 10^7$ фотон/см²ср с, в безлунные ночи над океаном, до $3 \cdot 10^9$ фотон/см²ср с, в полнолуние и в области аврорального

овала). Постоянная времени АРУ существенно больше длительности осциллограммы, что позволяет считать, что за время записи события коэффициент усиления ФЭУ не меняется.

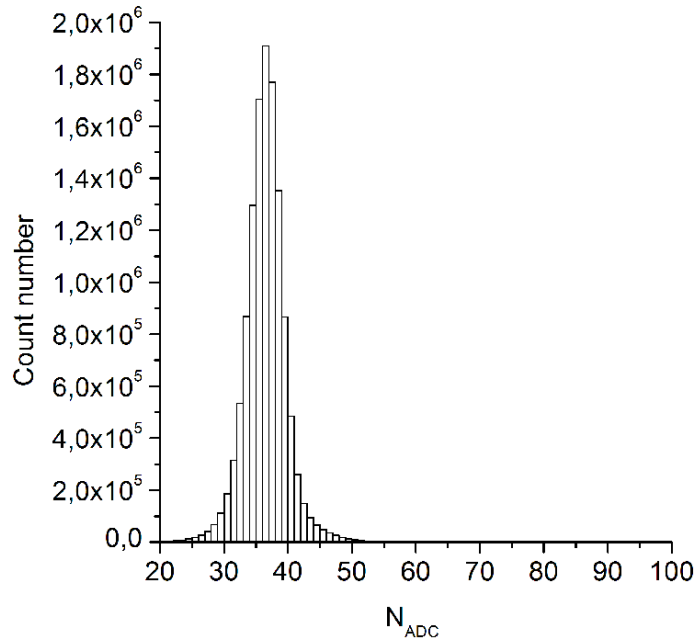


Рис. 1.3: Распределение кода АЦП N в ходе измерений фонового УФ-излучения на спутнике «Вернов».

Регистрация УФ-излучения происходила как на ночной, так и на дневной стороне орбиты спутника благодаря работе системы АРУ. Однако измерения вспышек возможно только на ночной стороне, ввиду слишком высокого порога днем. Важным недостатком этого прибора является отсутствие пространственного разрешения. Это обстоятельство не позволяет однозначно идентифицировать тип ТАЯ (что достаточно просто по геометрической форме явления) и вносит существенную неопределенность в оценку энергии каждого события. Последнее связано с тем, что чувствительность детектора сильно зависит от угла падения УФ-излучения на поверхность коллиматора, поэтому отсутствие информации о положении события в поле зрения приводит к недооценке числа фотонов в событии. Все расчеты для детекторов ДУФ осуществлялись в предположении, что вспышка произошла строго в направлении в надир, чтобы получить минимальную оценку для энергии события.

УФ-вспышки очень разнообразны по временному профилю и

энергии (числу фотонов). Примеры характерных осциллограмм событий, зарегистрированных на спутнике «Вернов» приведены на рисунке 1.4.

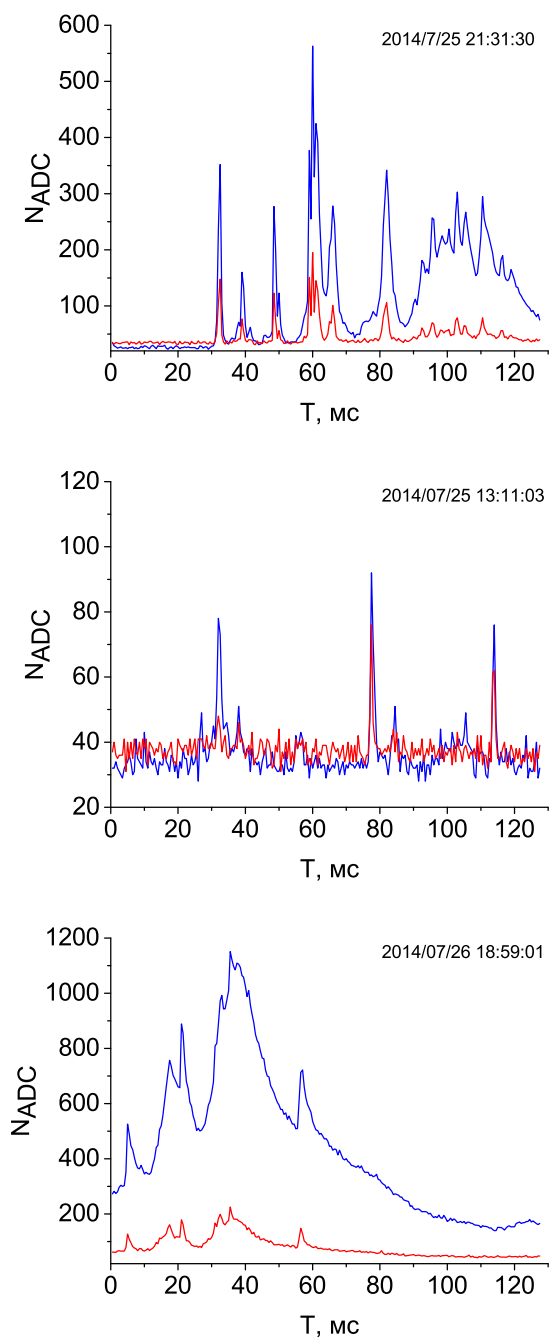


Рис. 1.4: Пример временных профилей событий, зарегистрированных детектором ДУФ на спутнике «Вернов», в УФ (синяя кривая) и ИК (красная кривая) диапазонах длин волн.

1.2. Детектор ТУС на спутнике «Ломоносов»

1.2.1. Описание аппаратуры

Детектор Трековая УСтановка (ТУС) [21] был размещён на спутнике «Ломоносов» [33] (международное обозначение MVL300 или 2016-026A), который был выведен 28 апреля 2016 г. на полярную солнечно-синхронную орбиту с наклоном $97,3^\circ$, периодом 94 мин и высотой около 500 км. Мгновенное поле зрения инструмента на уровне моря составляло 80×80 км. Спутник проработал полтора года до декабря 2017 г. Как показано на рис. 1.5, детектор (телескоп) состоит из двух основных частей: зеркала-концентратора и фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости.

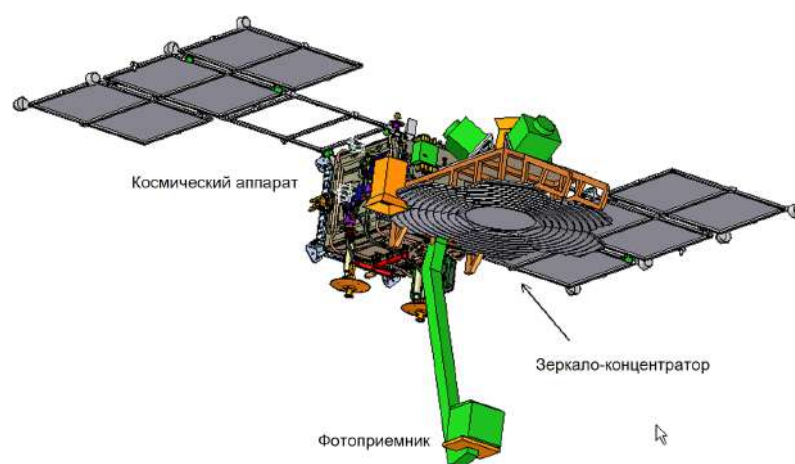


Рис. 1.5: 3D модель детектора ТУС в составе космического аппарата «Ломоносов».

Зеркало-концентратор, показанное на рис. 1.6, имеет площадь 2 м^2 и представляет собой зеркало френелевского типа, состоящее из центрального параболического зеркала и 11 кольцевых секций (параболических в сечении). Эти секции распределены по 6 шестиугольным сегментам, равным по размеру и окружающим центральный сегмент, фокусируют параллельный пучок на фокальную плоскость. Таким образом, зеркало с фокусным расстоянием 1,5 м состоит из 7 шестиугольных сегментов, каждый с диагональю 63 см (рис. 1.7, слева). Эти сегменты состоят из углепластика, усиленного сотовой алюминиевой пластиной (рис. 1.7, справа). Конструкция зеркала остается стабильной в широком диапазоне температур. В такой конструкции толщина сегментов невелика (1 см), что важно для использования зеркала в космическом

эксперименте. Сегменты были изготовлены в виде копий алюминиевой пресс-формы (одна для центрального сегмента и одна для каждого из 6 боковых сегментов). Поверхность пластикового зеркала покрыта алюминиевой пленкой и защищена слоем MgF_2 , нанесенным методом вакуумного напыления. Его коэффициент отражения на длине волны 350 нм (середина диапазона атмосферной флуоресценции) составляет 85 %.

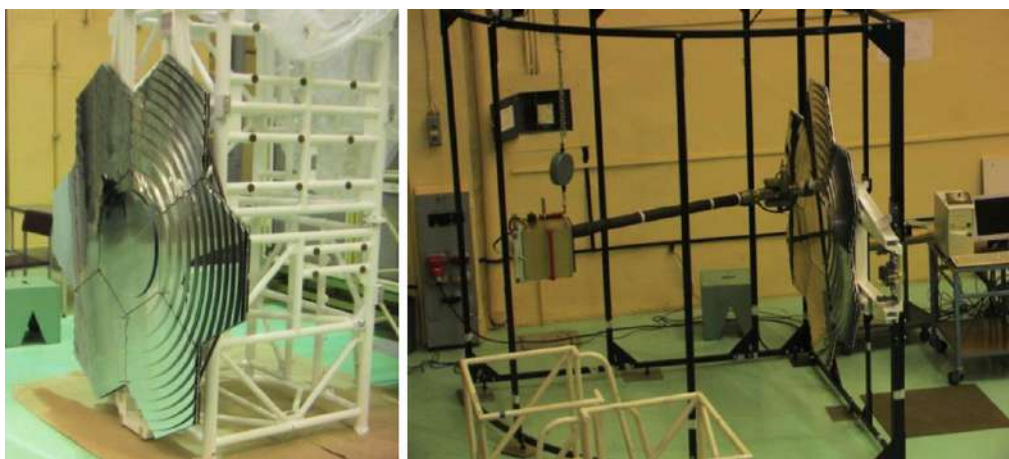


Рис. 1.6: Сегментированное зеркало-концентратор ТУС на раме научной полезной нагрузки «Ломоносов» (слева) и детектор ТУС во время предполетных испытаний в АО НИИЭМ, г. Истра (справа).



Рис. 1.7: Боковой сегмент зеркала-концентратора (слева) и его трехслойная структура (справа).

Фокусное расстояние зеркала-концентратора (150 см) определяет угловой размер поля зрения отдельного канала (10 мрад), что, при высоте орбиты спутника 500 км, соответствует размеру ячейки обзора атмосферы 5×5 км. В контрольных предполетных испытаниях было установлено, что локализованное изображение удаленного источника на фокальной плоскости зеркала сопровождается диффузным освещением,

причем при расположении источника вне поле зрения доля диффузного света, попадающего на фотоприемник, может достигать 40 % от всего света, попадающего на зеркало (результаты предполетных измерений оптической эффективности прибора описаны в [34, 35]).

Отдельный канал фотоприемника представляет собой ФЭУ Hamamatsu R1463. Непосредственно на фотокатоде ФЭУ размещен УФ-фильтр толщиной 2 мм. Полоса чувствительности канала со стороны малых длин волн определяется резким уменьшением квантовой чувствительности фотокатода при длинах волн < 300 нм, и со стороны больших длин волн – обрезанием прозрачности фильтра на длине волны 400 нм, так, что квантовая чувствительность ячейки равна примерно 20 % в диапазоне 300–400 нм. Кроме того, УФ-излучение с длинами волн менее 315 нм эффективно поглощается озоновым слоем атмосферы (если источник УФ находится ниже 40 км). На входе канала размещен зеркальный световод, имеющий квадратное входное окно («ячейку») 15×15 мм и круглое выходное окно, концентрирующее свет на катод диаметром 13 мм. Использование световодов этого типа позволяет повысить однородность сбора света в прямоугольной матрице ячеек детектора.

Фотоприемник состоит из 16-ти одинаковых модулей по 16 ячеек в каждом (см. рис. 1.8). Каждый модуль имеет свою плату электроники с аналогово-цифровыми преобразователями (АЦП), системой низковольтного и высоковольтного (для ФЭУ) питания и ПЛИС XILINX, на которой был реализован алгоритм триггерной системы первого уровня для отбора «сработавших» ячеек. Информация о триггере первого уровня поступает в центральное процессорное устройство детектора, где, по длительности срабатываний смежных ячеек фотоприемника, принимается решение о записи полезного события и дальнейшей передаче его на Землю.

Электроника фотоприемника была разработана с учетом многоцелевого использования ТУС: для изучения ТАЯ необходимо обеспечить широкий диапазон измерения яркости и длительности полезного сигнала, а саму регистрацию сигнала производить при различных интенсивностях УФ-фона, появляющихся вследствие

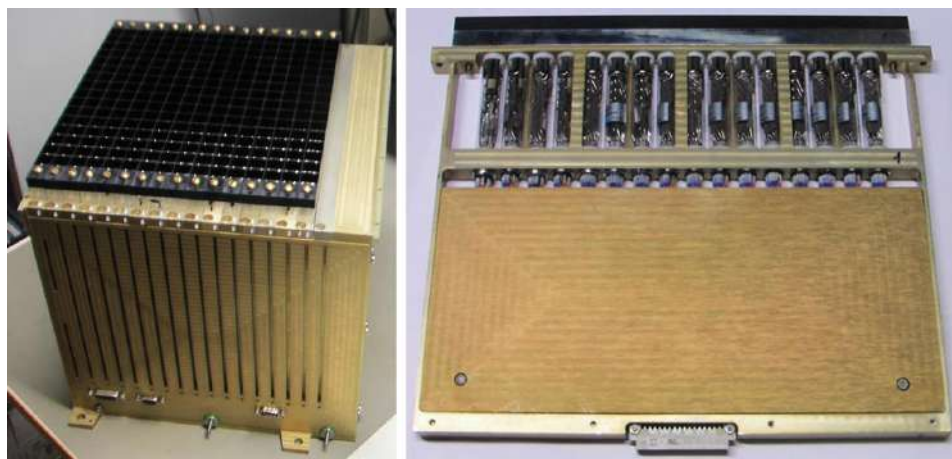


Рис. 1.8: Фотоприемник детектора ТУС (слева) и один модуль фотоприемника из 16-ти каналов (справа).

географических и сезонных вариаций излучения атмосферы, а также изменениях уровня освещения в зависимости от фазы Луны. Интенсивность фона ночной атмосферы в том диапазоне длин волн, в котором работал ТУС, была измерена ранее на спутниках МГУ, упомянутых выше, и приведена в работах [36] [28, 37]. Как и ожидалось, основной вклад в УФ-фон ночной атмосферы вносит рассеянное излучение от Луны. Кроме того, важным фактором, определяющим интенсивность фона в случае орбитального детектирования, является облачность, которая при полной Луне увеличивает рассеянную от атмосферы интенсивность излучения в 2 раза. В новолуние, в отсутствие облачности, интенсивность фона над океаном остается постоянной в течение тысяч км, с нарушением этого постоянства лишь над зонами полярных сияний и другими особенными районами, включающими и районы человеческой деятельности.

Регистрация сигнала в новолуние в районах с малым средним фоном играет важную роль в оценках вероятности имитации конкретных типов ТАЯ за счет статистических отклонений от средних значений фона. Измерения в условиях низкого фона УФ-излучения особенно важны для оценки относительно малых по яркости событий ШАЛ с числом фотонов $Q=10^{15} - 10^{16}$.

Для регистрации сигнала с различными диапазонами длительности была разработана и создана специальная электроника детектора,

формирующая развертки длительностью 256 тактов с четырьмя различными временными разрешениями (длительностями такта). Для регистрации событий ШАЛ было выбрано высокое разрешение во времени $\Delta T=0,8$ мкс [38]. В этом режиме осуществлялась также регистрация самых коротких событий TLE – эльфов. Следующие два режима, с длительностью такта $\Delta T=25,6$ мкс и $\Delta T=0,4$ мс, предназначены для измерений более длительных событий – спрайтов, гигантских и голубых струй. Наконец, четвертый режим работы с $\Delta T=6,6$ мс применялся для изучения метеоров, нуклеаритов, космического мусора и свечения из районов грозовой активности. В этом случае общая длительность развертки составляла 1,66 с.

Для регистрации явлений различной длительности в модуле фотоприемника реализована система последовательных интеграторов и цифровых осциллографов (см. рис. 1.9), обеспечивающих последовательное суммирование сигналов в заданный промежуток времени, его хранение для выдачи на материнскую плату прибора.

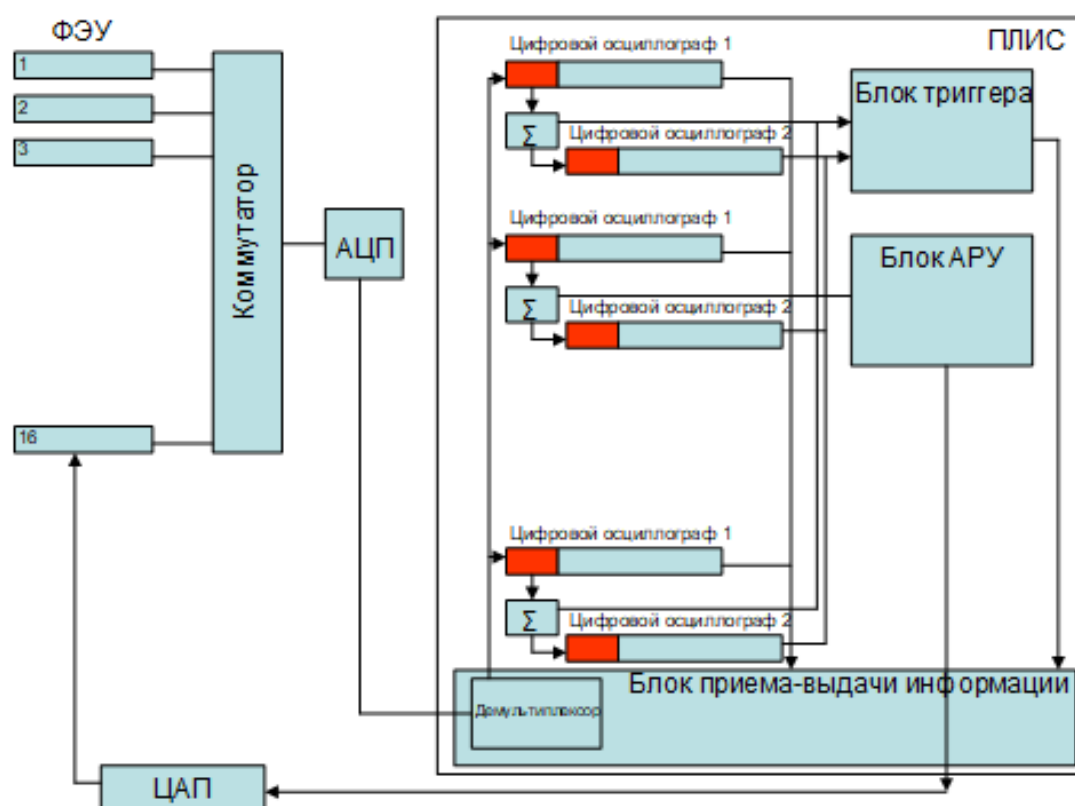


Рис. 1.9: Блок-схема электроники модуля фотоприемника детектора ТУС.
 Σ – цифровые интеграторы.

По команде от триггерной системы вся цифровая информация от ячеек фотоприемника, записанная в оперативной памяти модулей, передается на материнскую плату фотоприемника. Запись осуществляется так, чтобы момент триггера приходился на 50-й такт развертки. Это позволяет записывать уровень фонового сигнала непосредственно перед появлением события.

Таблица 1.2: Длительность наблюдения и число зарегистрированных событий в четырех режимах работы детектора ТУС

Тип триггера	Временное разрешение	Длительность наблюдения в ночное время	Число событий
ШАЛ	0,8 мкс	286 суток	78131
TLE-1	25,6 мкс	3 суток	185
TLE-2	0,4 мс	19 суток	1708
МЕТЕОР	6,6 мс	37 суток	11149

В Таблице 1.2 приведено полное время работы прибора в каждом режиме, без учета наличия дневной стороны орбиты, когда фон УФ-излучения слишком велик для регистрации слабых сигналов транзиентных вспышек, и мертвого времени прибора при регистрации. Время наступления местной ночи определялось по коду высокого напряжения на ФЭУ, которое подстраивается под уровень освещенности и отражает, таким образом, среднюю интенсивность излучения из атмосферы во время регистрации. На терминаторе происходит резкое увеличение интенсивности, которое приводит к резкому падению кода высокого напряжения. Из таблицы видно, что большая часть времени работы детектора ТУС была посвящена поиску событий ШАЛ. Совсем мало времени (около трех суток) производились измерения в режиме TLE-1. В режиме TLE-2 работа продолжалась дольше: было отобрано несколько сотен событий этого типа. В режиме регистрации МЕТЕОР детектор проработал в общей сложности 37 суток.

Измерения УФ-излучения выполняются в режиме постоянного тока, а сигнал интегрируется в анодной RC-цепочке каждого ФЭУ с постоянной времени 600 нс. Измерения интенсивности УФ-излучения позволяют

регулировать усиление ФЭУ с помощью системы АРУ, аналогично детектору ДУФ на спутниках «Татьяна» и «Вернов». Это позволяет избежать насыщения ФЭУ в условиях повышенной интенсивности УФ-излучения, например, в лунные ночи или при пролете над регионами с более интенсивным УФ-излучением (авроральные области, большие города и др.). Высокое напряжение на ФЭУ регулируется в зависимости от УФ-фона, таким образом, чтобы средний сигнал АЦП оставался на постоянном уровне. Таким образом, при повышении фона, высокое напряжение уменьшается. На дневной стороне Земли высокое напряжение минимально, при переходе спутника на ночную сторону высокое напряжение постепенно возрастает и устанавливается в соответствии с уровнем освещённости, и каждую секунду поправляется при изменении УФ-фона атмосферы в области обзора детектора. Канал АЦП, соответствующий среднему значению сигнала, задаётся из центра управления полётом спутника.

Высокое напряжение регулируется уровнем выходного напряжения специального ЦАП (см. рис. 1.9). Коррекция высокого напряжения выполняется каждые 100 мс, для обеспечения постоянного напряжения во время записи осциллограмм ШАЛ и TLE. Во время записи осциллограмм режима МЕТЕОР высокое напряжение может меняться до 16 раз, т.к. длительность записи составляет 1,6 с, а напряжение устанавливается каждые 100 мс.

Исходя из проведенных перед запуском научной аппаратуры оценок пороговой энергии детектора и времени экспозиции, а также структуры УФ-фона атмосферы, основной задачей прибора являлась проверка работы детектора КЛ ПВЭ на орбите Земли, исследование фоновых условий [39].

1.2.2. Наземная калибровка электронного блока фотоприемников детектора ТУС

На этапе предполетной подготовки была проведена калибровка фотоприемника детектора. Причем, с учетом АРУ важно было измерить отклик детектора при разных значениях высокого напряжения на ФЭУ.

Относительная калибровка. Зависимость коэффициента усиления ФЭУ от высокого напряжения

Как было сказано выше, напряжение питания последних диодов ФЭУ регулируется с помощью обратной связи, организованной с помощью ЦАП. ЦАП управляется цифровыми сигналами ПЛИС, задающими необходимый уровень высокого напряжения с помощью двоичного кода (M), лежащего в диапазоне 0–255. Максимальное (основное рабочее) напряжение соответствует коду 255, минимальное – 0. На ночной стороне витка минимальный код высокого напряжения около 150. Это означает, что для расчета интенсивности свечения, по данным прибора, необходимо иметь зависимость коэффициента усиления ФЭУ, как минимум в диапазоне 150–255.

Для получения зависимости коэффициента усиления ФЭУ (в относительных единицах, в виде кода АЦП) от кода высокого напряжения был произведен следующий калибровочный эксперимент: на расстоянии 1,5 м от модуля ФЭУ расположен УФ-светодиод, равномерно освещающий все ФЭУ модуля. Светодиод управляется генератором электрических импульсов прямоугольной формы, задающим форму световых импульсов. Световые импульсы, прошедшие через входное окно, световод, УФ-фильтр и ФЭУ дают импульс тока в анодной цепи каждого ФЭУ, поступают на АЦП, находящийся на плате модуля ФЭУ, оцифровываются, записываются в промежуточную память ПЛИС и затем сохраняются на персональный компьютер.

Амплитуда импульса рассчитывается как среднее арифметическое всех значений внутри пика (за исключением области возрастания и убывания импульса, т.е. крайних значений импульса). Так же из анализа удаляются большие одиночные выбросы, связанные с ошибками при передаче данных. Аналогично для каждого ФЭУ рассчитывается набор средних значений амплитуды сигнала соответствующих различным кодам напряжения. Далее для каждого ФЭУ строится зависимость амплитуды сигнала (A) от кода высокого напряжения на последних диодах (M). На рисунке 1.10, для примера, представлены зависимости $A(M)$ шестнадцати ФЭУ одного из модулей (№ 9).

Форма кривых показывает относительную «сонастроенность» ФЭУ. Из рисунка 1.10 видно, что характеристики ФЭУ в одном модуле имеют

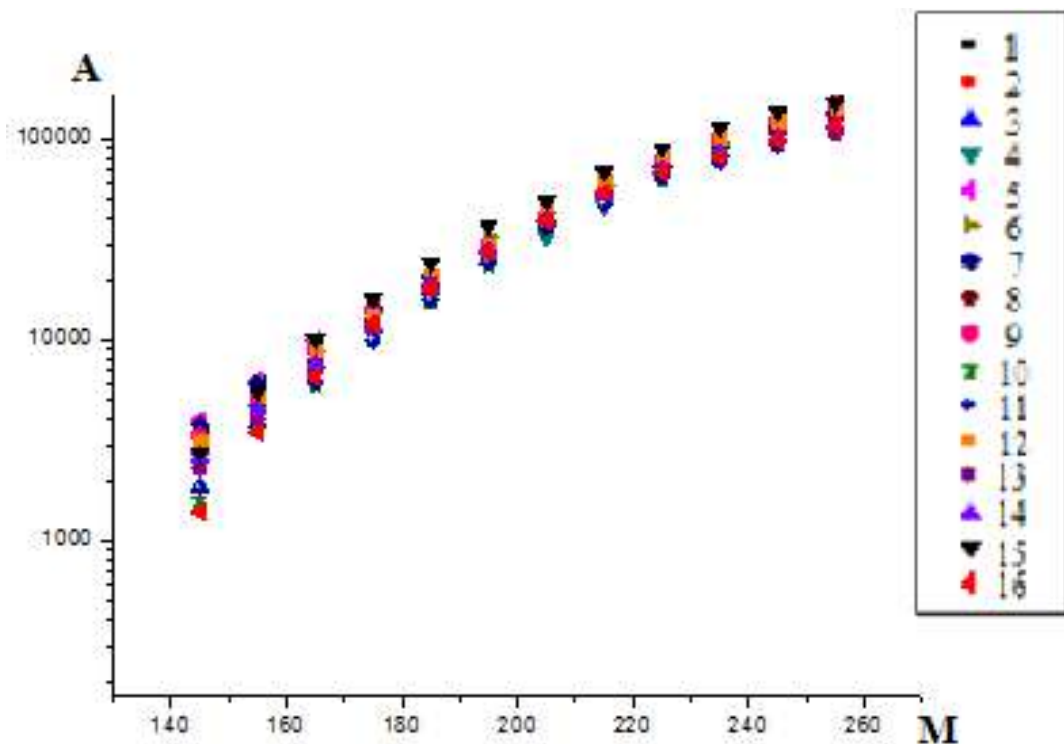


Рис. 1.10: Зависимость $A(M)$ для модуля №9, цветом показаны различные ФЭУ модуля.

одинаковый наклон и практически схожие друг с другом значения во всем диапазоне изменения кода высокого напряжения. Это было достигнуто подбором индивидуальных сопротивлений в диодной системе каждого ФЭУ. Ни один из ФЭУ в этом случае не будет давать заведомо больший сигнал, чем остальные, а значит, влиять на работу триггерной системы прибора.

После относительной калибровки следующая задача – провести абсолютную калибровку ФЭУ, т.е. перейти от относительных амплитуд к расчету коэффициента усиления ФЭУ. Это достаточно сделать при одном значении кода высокого напряжения и отнормировать полученные относительные кривые $A(M)$.

Абсолютная калибровка ФЭУ с помощью эталонного импульсного источника УФ-излучения

Для абсолютной калибровки каждого ФЭУ был использован импульсный источник УФ-света с известным количеством фотонов ($N_{ph} \sim 200$) на выходе. С помощью гибкого световода УФ-импульс от источника

подавался непосредственно на фотокатод каждого ФЭУ (количество фотонов известно на выходе световода).

В описанном эксперименте измеряется амплитуда импульса, которая позволяет восстановить для каждого ФЭУ произведение квантовой эффективности и коэффициента усиления ФЭУ (pG). Для дальнейшего анализа данных прибора и вычисления потоков УФ-свечения от атмосферы и ШАЛ данной величины достаточно, нет необходимости определять их отдельно.

Количество фотоэлектронов, выбиваемых с фотокатода ФЭУ заданным числом фотонов, определяется квантовой эффективностью фотокатода

$$N_{pe} = pN_{ph} \quad (1.1)$$

При этом, амплитуда напряжения в анодной цепи связана с зарядом и емкостью конденсатора:

$$U = q/C = N_e e/C \quad (1.2)$$

А коэффициент усиления ФЭУ по определению – $G = N_e/N_{pe}$

В формулах, приведенных выше: p – квантовая эффективность, G – коэффициент усиления ФЭУ, N_{pe} – число фотоэлектронов, N_{ph} – число фотонов, N_e – число электронов на аноде ФЭУ, C – емкость анодной цепи, e – элементарный заряд, q – заряд на конденсаторе анодной цепи, U – амплитуда напряжения на конденсаторе анодной цепи.

Таким образом, pG рассчитывается по следующей формуле:

$$pG = N_e/N_{ph} = UC/eN_{ph} \quad (1.3)$$

Амплитуда импульса измеряется экспериментально, емкость конденсатора в анодной цепи равна 30 пФ (определена также экспериментально по времени экспоненциального спада сигнала от короткого импульса), заряд электрона – известная величина, число фотонов также известно. По формуле 1.3 рассчитываем для каждого ФЭУ

значение pG , соответствующее максимальному коду напряжения 255. Зная значение напряжения, pG для кода напряжения 255 и полученные при относительной калибровке зависимости $A(M)$, вычисляем следующие значения pG для остальных кодов, т.е. получаем зависимость $pG(M)$. Пример зависимости $pG(M)$ для модуля № 9 приведен на рисунке 1.11.

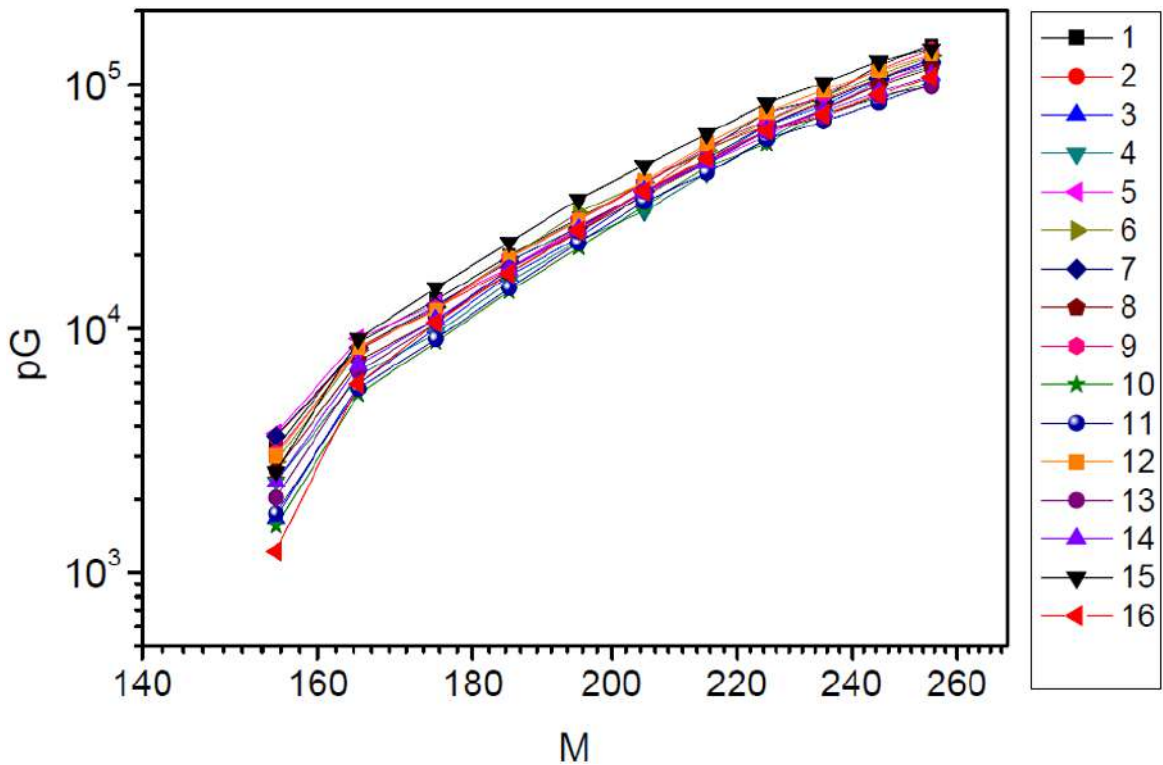


Рис. 1.11: График зависимости $pG(M)$ для модуля №9.

Аппроксимация полученных данных, калибровочные кривые

Поиск функции для аппроксимации экспериментально измеренных зависимостей $pG(M)$.

Если регулировать напряжение на всем ФЭУ, то зависимость $pG(M)$ можно описать степенной зависимостью. Действительно, коэффициент усиления на каждом каскаде ФЭУ (δ) определяется разностью потенциалов между соседними диодами (U_0), т.е. приближенно $\delta \sim U_0$, если количество диодов n , тогда коэффициент умножения всего ФЭУ: $G \sim U_0^n$.

Рассмотрим устройство ФЭУ и его работу в случае фотоприемника ТУС подробнее (см. рис. 1.12).

Напряжение регулируется не на всем ФЭУ, а только на последних четырех диодах. Коэффициент усиления ФЭУ можно вычислить как

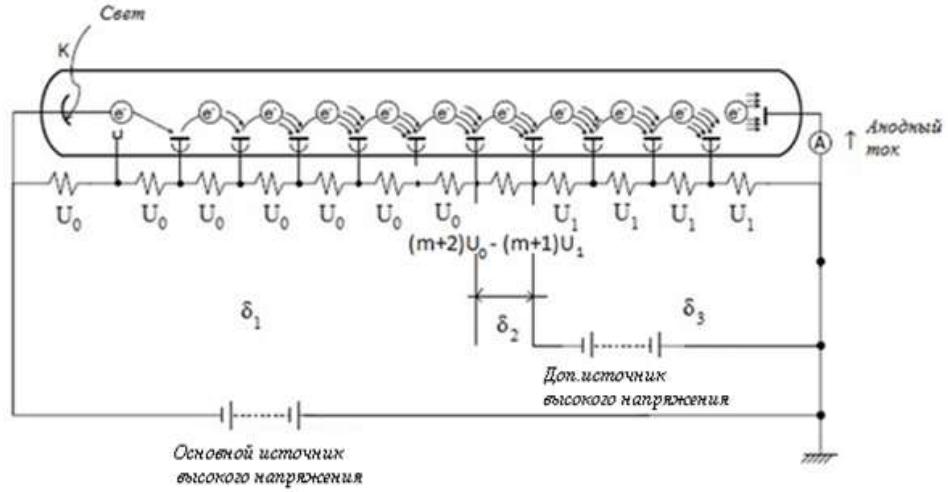


Рис. 1.12: Устройство системы питания ФЭУ в модуле фотоприемника детектора ТУС.

произведение трех множителей: $G = \delta_1 \delta_2 \delta_3$, где $\delta_1 \sim U_0^n$, $\delta_2 \sim (m + 2)U_0 - (m + 1)U_1$, n – число динодов в первой части ФЭУ (δ_1), а m – в третьей (δ_2).

Из этого соотношения можно показать, что зависимость коэффициента усиления ФЭУ от напряжения на последних динодах выглядит следующим образом:

$$G \sim aU_1^\alpha + bU_1^{\alpha-1} \quad (1.4)$$

где a , b и α – коэффициенты, подбираемые в ходе аппроксимации, U_1 – напряжение на последних динодах.

Если предположить, что напряжение на ФЭУ пропорционально коду: $U_1 \sim M$, то экспериментально полученная зависимость $pG(M)$ может быть аппроксимирована уравнением вида:

$$y = ax^\alpha + bx^{\alpha-1}, \quad (1.5)$$

где $y = pG$, $x = M$.

Коэффициенты (a, b, α) находятся путем минимизации функционала

$$\chi^2(a, b, \alpha) = \sum_{(i=1)}^n \left(\frac{y_i - ax_i^\alpha - bx_i^{\alpha-1}}{y_i} \right)^2 \quad (1.6)$$

Для примера в таблице 1.3 приведены коэффициенты для модуля №9. А на рисунке 1.14 показаны значения pG для всех модулей при коде высокого напряжение $M = 255$. На рис. 1.13 показана зависимость $pG(M)$ ФЭУ №10 модуля 9 и полученная аппроксимация.

Таблица 1.3: Результаты аппроксимации для 16-ти ФЭУ девятого модуля. $R = 1 - \chi^2(a, b, \alpha)$, показывает на сколько хорошо минимизирован функционал и теоретическая кривая удовлетворяет экспериментальным точкам.

№ ФЭУ	a	b	α	R
1	$2,53 \cdot 10^{-8}$	$-2,62 \cdot 10^{-6}$	5,35	0,92
2	$3,36 \cdot 10^{-8}$	$-3,42 \cdot 10^{-6}$	5,26	0,95
3	$4,16 \cdot 10^{-8}$	$-5,23 \cdot 10^{-6}$	5,34	0,97
4	$5,92 \cdot 10^{-8}$	$-7,08 \cdot 10^{-6}$	5,25	0,97
5	$4,06 \cdot 10^{-8}$	$-3,73 \cdot 10^{-6}$	5,29	0,99
6	$4,18 \cdot 10^{-8}$	$-4,65 \cdot 10^{-6}$	5,33	0,95
7	$2,78 \cdot 10^{-8}$	$-2,65 \cdot 10^{-6}$	5,37	0,97
8	$7,65 \cdot 10^{-8}$	$-8,69 \cdot 10^{-6}$	5,20	0,97
9	$4,07 \cdot 10^{-8}$	$-4,53 \cdot 10^{-6}$	5,34	0,95
10	$5,61 \cdot 10^{-8}$	$-7,02 \cdot 10^{-6}$	5,26	0,91
11	$1,55 \cdot 10^{-8}$	$-1,83 \cdot 10^{-6}$	5,48	0,89
12	$4,89 \cdot 10^{-8}$	$-5,53 \cdot 10^{-6}$	5,31	0,94
13	$8,33 \cdot 10^{-8}$	$-9,75 \cdot 10^{-6}$	5,46	0,82
14	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$-1,99 \cdot 10^{-5}$	5,06	0,93
15	$2,44 \cdot 10^{-7}$	$-3,01 \cdot 10^{-5}$	5,05	0,90
16	$7,10 \cdot 10^{-7}$	$-9,42 \cdot 10^{-5}$	4,82	0,89

1.3. Методика полетной калибровки по статистическим характеристикам стационарного сигнала

Во время первых включений прибора ТУС на орбите произошел сбой в работе системы АРУ, связанный с тем, что алгоритм понижения

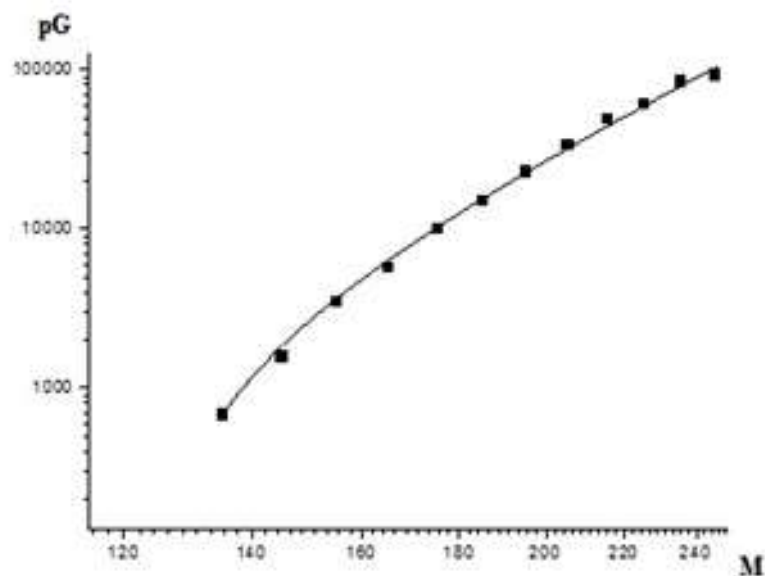


Рис. 1.13: Зависимость $pG(M)$ ФЭУ №10 модуля 9, и аппроксимация зависимостью $y = ax^\alpha + bx^{\alpha-1}$.

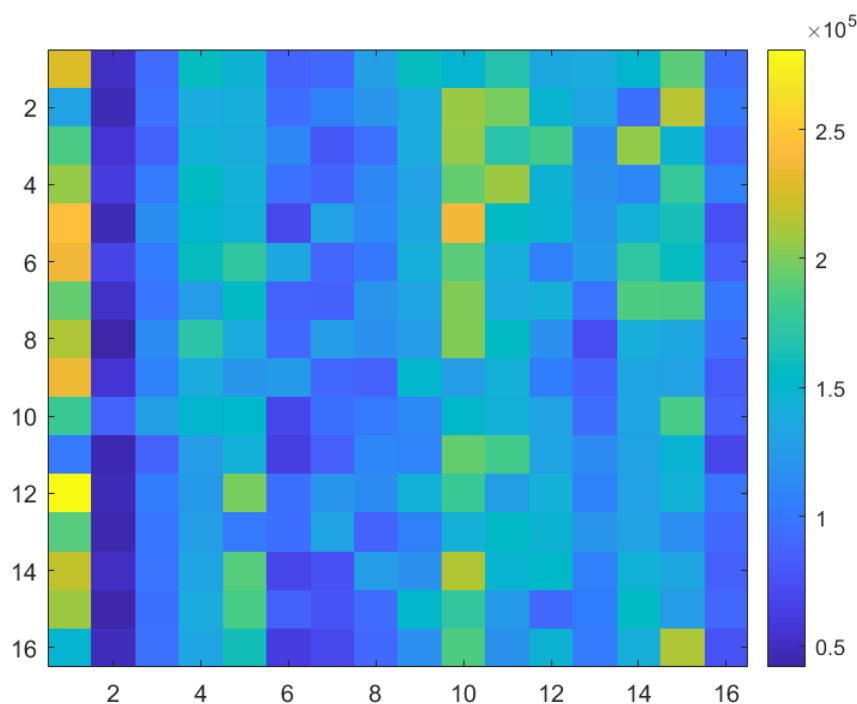


Рис. 1.14: pG ФЭУ при максимальном коде высокого напряжения $M = 255$.

напряжения не срабатывал при частичной мощной засветке модуля фотоприемника. В этом случае в нескольких ФЭУ протекает большой ток, шунтируя делитель высокого напряжения и, тем самым, понижая сигнал во всех остальных каналах. Таким образом, до исправления алгоритма работы АРУ прибор провел некоторое время на дневной

стороне орбиты с максимальным усилением. В результате этого часть ФЭУ вышла из строя, оказались полностью нерабочими два модуля и несколько каналов в других модулях, а все остальные каналы изменили свою чувствительность. Как следствие, использование калибровок, проведенных до полета космического аппарата, оказалось невозможным, и возникла необходимость в разработке и проверке методики полетной калибровки детектора, т.е. определения коэффициентов усиления ФЭУ и чувствительности каналов регистрации на основе данных самого прибора.

Была разработана методика определения коэффициентов усиления ФЭУ фотоприемника на основе статистических флуктуаций сигнала, и проведена ее проверка в лабораторном эксперименте на макете детектора [40, 41]. На основе этой методики были вычислены чувствительности каналов фотоприемника детектора ТУС.

1.3.1. Методика оценки чувствительности каналов

В данном случае под калибровкой ФЭУ понимается определение коэффициента усиления для каждого канала фотоприемника, позволяющего ставить в соответствие записанный в кодах АЦП сигнал и количество фотонов, попавших на фотокатод. Квантовая эффективность фотокатода мало меняется от одного ФЭУ к другому и считается известной.

Каждое событие, зарегистрированное детектором ТУС, представляет собой набор из 256 цифровых сигналов – кодов 10-ти битного АЦП. Стационарный поток фотонов на входе фотоприемника преобразуется в канале в цифровой сигнал, флуктуирующий вокруг определенного среднего значения – базового уровня кода АЦП, рис. 1.15. Базовый уровень определяется интенсивностью входного потока, а размер флуктуаций, в основном, – случайным процессом образования фотоэлектронов на фотокатод ФЭУ.

Традиционным способом калибровки ФЭУ в режиме постоянного тока является расчет коэффициента усиления G по базовому уровню A

стационарного потока света:

$$G = \frac{A}{\alpha q_e R \cdot p I}, \quad (1.7)$$

где I – интенсивность потока фотонов на фотокатоде ФЭУ (количество фотонов в единицу времени), p – квантовая эффективность, α – коэффициент трансформации аналогового сигнала в цифровой, $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – фундаментальный заряд, R – сопротивление нагрузки анодной цепи.

Существенным для реализации данного метода является наличие калибровочного сигнала с известной интенсивностью. Если же такого калибровочного сигнала нет, то можно воспользоваться тем, что в простейшем случае «нешумящего» усилителя дисперсия кода АЦП, σ_A^2 , линейным образом связана с базовым уровнем. Точнее,

$$\sigma_A^2 = \frac{pI}{2RC} (\alpha q_e R \cdot G)^2 \quad (1.8)$$

C – сопротивление и емкость анодной нагрузки.

В этом приближении σ_A^2 прямо пропорциональна A , а угловой коэффициент p_0 позволяет однозначно определить усиление² ФЭУ:

$$G_f = p_0 \frac{2C}{\alpha q_e}. \quad (1.9)$$

По сути, калибровочным сигналом для данной методики является любой стационарный сигнал – знание его интенсивности не предполагается.

Пример зависимости $\sigma_A^2(A)$ для одного из каналов детектора приведен на рис. 1.16. Качество линейной аппроксимации характеризует близость коэффициента R^2 к 1.

Для проверки методики был проведен лабораторный эксперимент на макете фотоприемника, представляющего собой один модуль и материнскую плату обработки сигнала. Вся электроника, ФЭУ, цифровая

²Чтобы отличить, полученный таким образом коэффициент усиления от прямой калибровки (1.7), будем использовать индекс f (от англ. fluctuation).

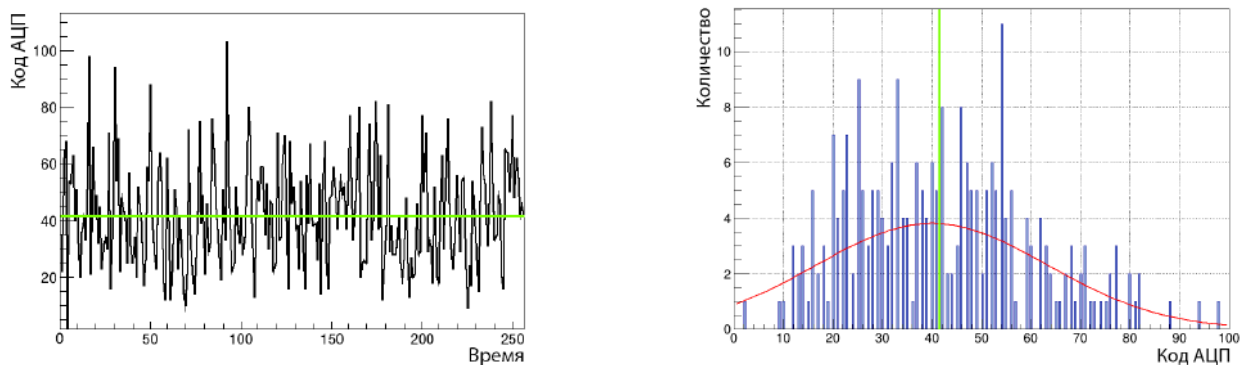


Рис. 1.15: Временная форма стационарного цифрового сигнала (в кодах АЦП), полученного при постоянном освещении фотокатода ФЭУ. Время выражено в тактах электроники, длительностью 800 нс. Зеленой линией обозначено среднее значение. Справа – гистограмма распределения кодов АЦП и ее гауссова аппроксимация.

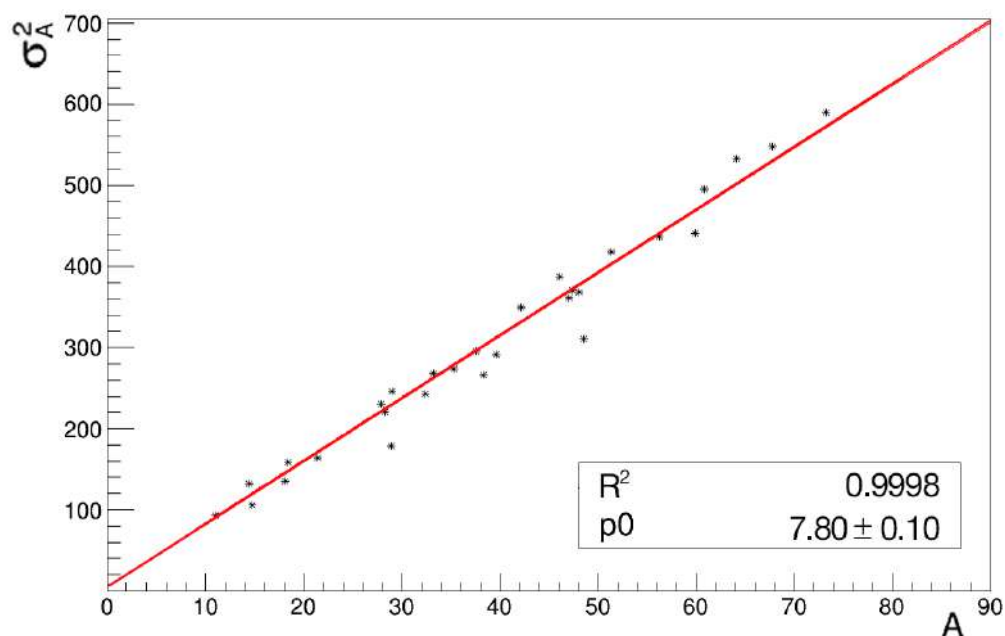


Рис. 1.16: Прямая пропорциональность зависимости дисперсии стационарного сигнала в канале № 211 от его базового уровня.

часть обработки сигнала и формат выходного файла данных идентичны используемым в детекторе ТУС непосредственно на борту космического аппарата.

В ходе лабораторного эксперимента макет располагался в черном непроницаемом для света боксе и освещался квази-монохроматическим источником света (УФ-светодиод NSHU550A, $\lambda = 375$ нм). Через коллиматор диаметром 1 мм излучение подавалось непосредственно

на фотокатод ФЭУ. Контроль постоянства мощности излучения осуществлялся с помощью калиброванного измерителя мощности LaserStar и фотодиодов Ophir (PD300-UV-193).

В измерениях при фиксированной мощности определялся базовый уровень и дисперсия сигнала. Варьируя интенсивность излучения источника, получали набор точек на плоскости «Базовый уровень–Дисперсия», позволяющий оценить угловой коэффициент p_0 и коэффициент усиления в соответствии с формулой (1.9).

Пример применения данной процедуры для одного из ФЭУ макета приведен на рис. 1.17. Основным отличием от теоретической модели является замена прямой пропорциональности линейной зависимостью, $\sigma_A^2(A) = p_0A + p_1$. Присутствие отличного от нуля свободного члена p_1 объясняется наличием в канале дополнительного аддитивного шума (например, шума АЦП).

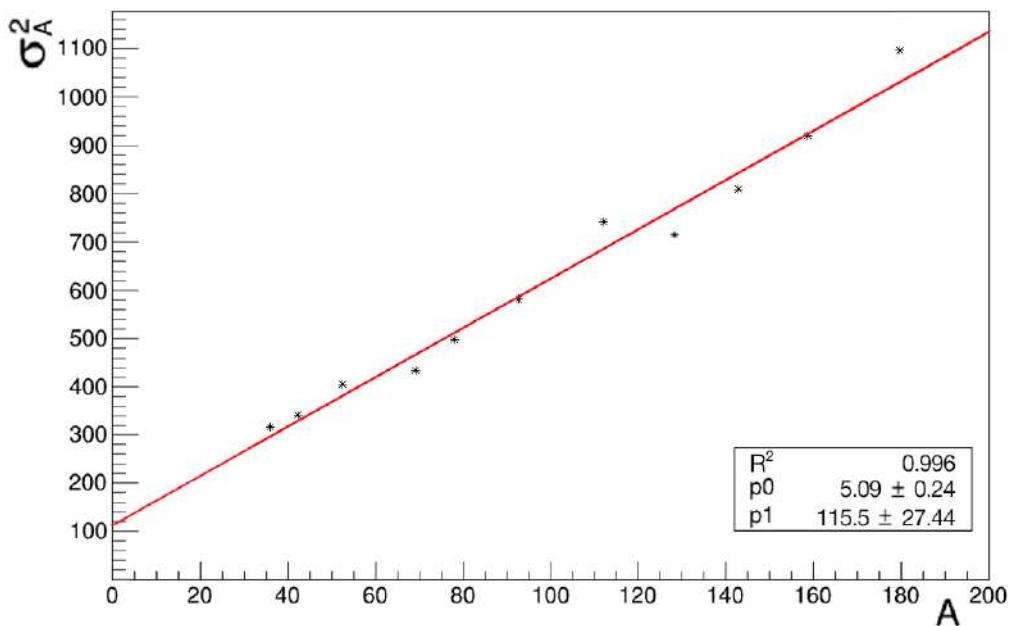


Рис. 1.17: Зависимость дисперсии от базового уровня для ФЭУ VE0689 (по результатам лабораторных измерений при 12 уровнях освещенности фотокатода).

Одновременно с этим, на специально собранном стенде, производились измерения интенсивности излучения непосредственно на входе ФЭУ. Это позволяло провести прямое измерение коэффициента усиления (1.7) с $I = W_{in}\lambda/(hc)$, где W_{in} – мощность входного потока, λ –

длина волны тестового излучения (h – постоянная Планка, c – скорость света).

Таким образом, в рамках лабораторного эксперимента для каждого из 25 каналов макета были получены две оценки коэффициента усиления (при заданном напряжении) G_f – по статистическим флуктуациям и по калибровочному источнику G . Оказалось, что оценка усиления по флуктуациям кода АЦП почти в три раза превышает значение, полученное в ходе прямого измерения. Точнее, для распределения поправочных коэффициентов $K = G_f/G$ измеренных ФЭУ было получено:

$$K = 2,7 \pm 0,9. \quad (1.10)$$

Отличие K от единицы вызвано наличием дополнительных шумов в электронике, которые существенно увеличивают флуктуации сигнала, не изменяя его среднего значения. В частности, дополнительный шум вносит импульсный источник высокого напряжения, что подтверждается уменьшением значения σ_A^2 при добавлении дополнительных емкостей на выходе источника.

Большой разброс значений K связан с тем, что коэффициент усиления зависит как от самого ФЭУ, так и от его положения в модуле (т.е. от распределения напряжения питания по диодной системе). Для контроля повторяемости и исследования зависимости от положения в модуле для нескольких ФЭУ измерения проводились несколько раз, оценка (1.10) получена по 46 измерениям 25 ФЭУ.

Таким образом, полетную калибровку можно проводить по флуктуациям стационарного сигнала как $G = G_f/K$ с поправочным коэффициентом (1.10). Величина стандартного отклонения K говорит о том, что данная методика обладает достаточно большой погрешностью, более 30 %.

1.3.2. Калибровка фотоприемника детектора ТУС

Для осуществления калибровки фотоприемника детектора ТУС предварительно из базы данных, зарегистрированных в режиме

ШАЛ, были отобраны события со стационарным сигналом. При этом использовались только те события, код высокого напряжения которых равнялся 255, что соответствовало максимально возможной чувствительности фотоприемника.

Ввиду приближенной гауссовости распределения, флуктуация цифрового сигнала (см. рис. 1.15 справа), его стационарность проверялась по критериям Фишера (тест постоянства математического ожидания) и Кокрена (тест постоянства дисперсии) при разбиении всего временного интервала длительностью 256 тактов на $n = 8$ равных подинтервалов. В качестве дополнительного критерия отбора требовалось, чтобы базовый уровень превышал значение 10 – в этом случае можно пренебречь ошибкой, связанной с дискретностью оцифровки слабых сигналов.

Из 256 каналов фотоприемника ТУС 51 вышел из строя, еще 9 имели настолько низкую чувствительность, что стационарные сигналы, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям, либо не были обнаружены, либо их количество не позволяло надежно провести калибровку. Для оставшихся 196 каналов всего было отобрано 50343 стационарных сигнала, причем количество таких сигналов от канала к каналу сильно варьируется (максимальное – 1534, минимальное – 11). Для каждого канала по стационарному сигналу определялись значения базового уровня A и дисперсии σ_A^2 , точка с этими координатами наносилась на диаграмму «Базовый уровень–Дисперсия» для последующей линейной аппроксимации. Оценка углового коэффициента p_0 и расчет³ по (1.9) G_f и $G = G_f/2, 7$ завершал процедуру калибровки.

Медианное значение 196 коэффициентов усиления G , полученных в результате полетной калибровки, составило $0,51 \cdot 10^6$ (межквартильное расстояние – $0,39 \cdot 10^6$).

С целью анализа изменения чувствительности ФЭУ после воздействия прямого солнечного излучения, было проведено сравнение полученного распределения коэффициентов усиления с измеренным в рамках предполетной калибровки прибора, рис. 1.18. Распределение стало

³Анодная емкость всех модулей фотоприемника ТУС составляет 30 пкФ, а коэффициент трансформации $\alpha = 512 \text{ В}^{-1}$. Поэтому $G_f \approx 0,73p_0 \cdot 10^6$, $G \approx 0,27p_0 \cdot 10^6$.

заметно шире: стандартное отклонение G увеличилось от $0,21 \cdot 10^6$ до $0,38 \cdot 10^6$. При этом у нескольких ФЭУ чувствительность понизилась до $G < 10^5$, а для некоторых – наоборот увеличилась (скорее всего, это следствие большой ошибки метода).

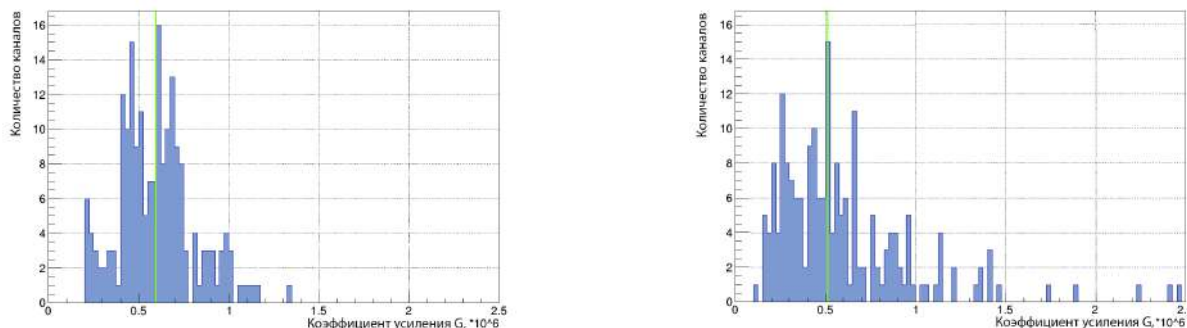


Рис. 1.18: Распределения коэффициентов усиления G детектора фотоприемника ТУС: слева – предполетная калибровка; справа – полетная калибровка. Зеленой линией обозначено медианное значение.

Кроме, упомянутой выше, невозможности откалибровать слабочувствительные каналы, в ряде случаев возникали проблемы другого характера. На рис. 1.19 слева изображена диаграмма «Базовый уровень–Дисперсия» для «сильношумящего» канала № 125, для которого значительный разброс дисперсий при фиксированном значении базового уровня не позволяет надежно установить линейную функцию $\sigma_A^2(A)$. По всей видимости это связано с тем, что данный ФЭУ был сильно поврежден во время освещения солнечным светом на дневной стороне, что и привело к появлению дополнительных шумов самого ФЭУ, не связанных с сигналом. Отметим также, что данный ФЭУ расположен в модуле с максимальным числом неработающих каналов.

На диаграмме канала № 241, рис. 1.19 справа, в области $A \sim 50$ наблюдается излом, свидетельствующий об изменении чувствительности данного канала уже в процессе работы прибора. В январе 2017 года детектор сначала был на месяц переведен в режим регистрации медленных событий, затем выключен, и включен в режим ШАЛ только с апреля 2017 г. На рисунке показаны линейные аппроксимации, построенные по стационарным сигналам отдельно для 2016 и 2017 гг. Они соответствуют изменению G от $1,2 \cdot 10^5$ до $0,9 \cdot 10^5$, т.е. примерно на 30 %.

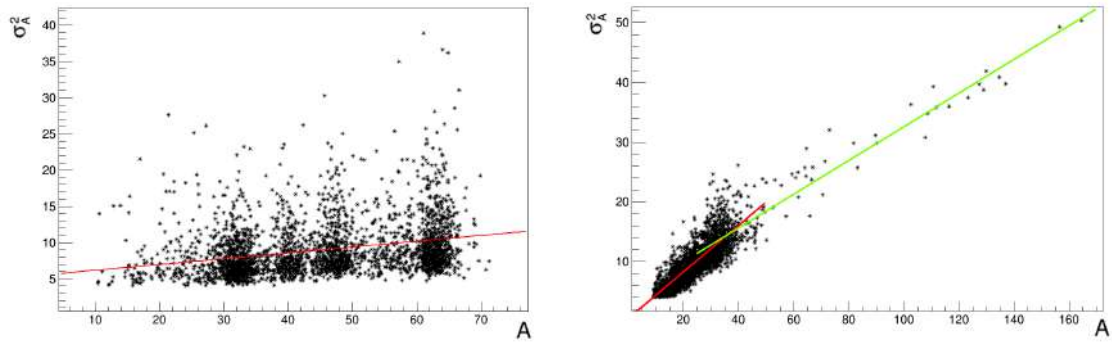


Рис. 1.19: Диаграмма «Базовый уровень–Дисперсия» для каналов с нелинейной зависимостью. Слева – «шумящий» канал № 125, справа – канал № 241 с резким изменением чувствительности.

Кроме резкого изменения может наблюдаться постепенное уменьшение чувствительности канала, вызванное, в частности, действием мощного излучения на солнечной стороне орбиты. Для анализа такого «эффекта старения» для ряда каналов, с большой статистикой стационарных сигналов, было проведено отдельное исследование зависимости G от времени функционирования на орбите. В качестве примера на рис. 1.20 изображены вариации чувствительности канала № 241 (выраженные в единицах G_f), построенные по ежемесячным данным в течение года. Видно, что в 2016 году происходило постепенное снижение чувствительности канала, а в 2017 году – ее стабилизация.

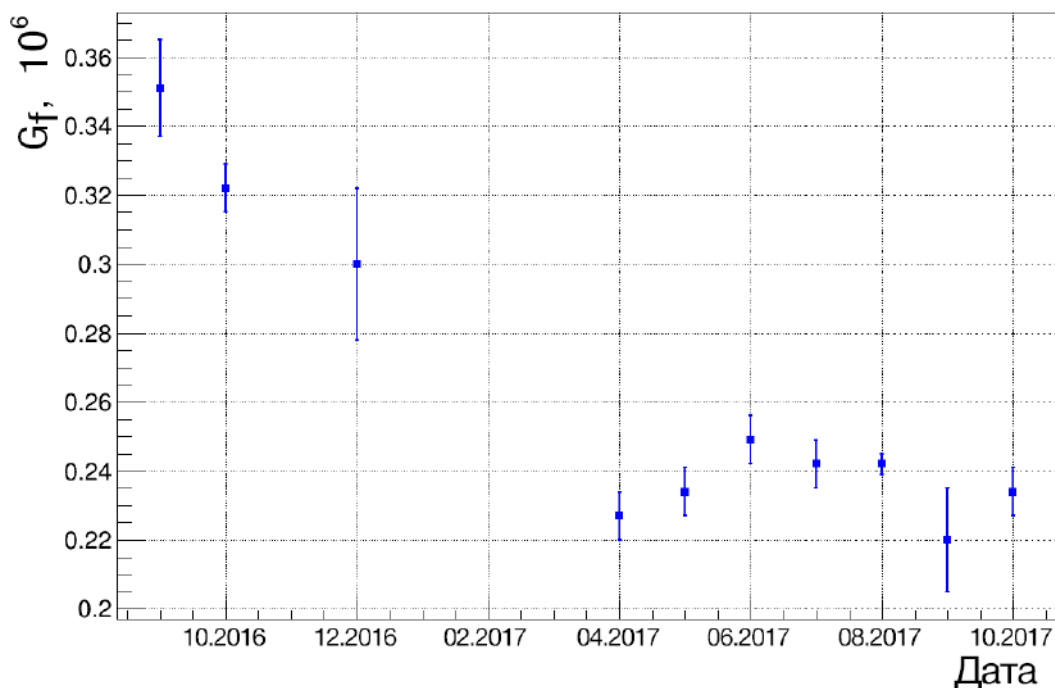


Рис. 1.20: Вариации оценки коэффициента усиления G_f канала № 241 с сентября 2016 по октябрь 2017 года.

1.4. Научная аппаратура «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) на борту МКС

Дальнейшее развитие методики экспериментального исследования УФ-излучения атмосферы и тестирование прототипов орбитальных миссий по регистрации КЛ ПВЭ продолжилось в проекте «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) [42, 43]. Это совместный эксперимент ГК «Роскосмос» и Итальянского космического агентства. Эксперимент проводится с помощью широкоугольного детектора (телескопа), установленного через переходное кольцо (адаптер) на иллюминатор № 9 служебного модуля российского сегмента МКС. Данный иллюминатор прозрачен в ближнем УФ-диапазоне и позволяет проводить наблюдения в надир.

Телескоп «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) был задуман как прототип линзового детектора КЛ ПВЭ JEM-EUSO для отработки всех критических элементов научной аппаратуры при работе в космическом пространстве. Для простоты разработки этот прибор было предложено разместить внутри станции. Поле зрения пикселя и площадь входного окна

подбирались таким образом, чтобы фоновый сигнал в приборе «УФ атмосфера» был таким же, как и в будущей миссии JEM-EUSO.

Детектор представляет собой линзовый телескоп. Оптическая система представлена двумя линзами Френеля диаметром по 25 см каждая. Линзы выполнены из ПММА (полиметилметакрилат). Этот материал позволяет создать легкую (толщина 11 мм, вес 0,87 кг/линзу), прочную и компактную конструкцию, хорошо подходящую для космического применения. Эффективное фокусное расстояние системы составляет 205 мм (фокусное расстояние 300 мм), размер изображения (функция рассеяния точки, ФРТ) составляет 1,2 пикселя фотоприемника.

Фокальная поверхность представляет собой один модуль фотоприемника детектора JEM-EUSO (или «КЛПВЭ») и состоит из матрицы 36 многоанодных фотоумножителей (МАФЭУ, Hamamatsu Photonics R11265-M64), расположенных в виде массива из 6×6 элементов. Каждый МАФЭУ состоит из 8×8 пикселей. Таким образом, получается всего 2304 канала. МАФЭУ сгруппированы в элементарные ячейки по 2×2 МАФЭУ. Каждая ячейка имеет независимый источник питания высокого напряжения и плату, соединяющую диоды и аноды четырех фотоумножителей.

Полосовые УФ-фильтры (BG3 толщиной 2 мм) с антибликовым покрытием приклеены перед МАФЭУ для ограничения длин волн в диапазоне от 290 до 430 нм. На рисунке 1.21 показаны различные вклады в общую эффективность детектора. Эффективность регистрации МАФЭУ была получена путем масштабирования кривой квантовой эффективности, предоставленной Hamamatsu, на типичную эффективность сбора 80 %. Результат хорошо согласуется с эффективностью, измеренной в лаборатории, при длине волны 398 нм.

Считывание сигнала с МАФЭУ осуществляется ASIC Spaciroc-3 [44]. Каждая ASIC имеет 64 канала и подсчитывает количество сигналов одиночных фотоэлектронов, поступающих в одно окно GTU длительностью 2,5 мкс. Реакция ASIC на одиночный фотоэлектрон приводит к мертвому времени $\tau_0 = 5$ нс, и поэтому, если два или более фотона попадают в этот интервал, засчитывается только один.

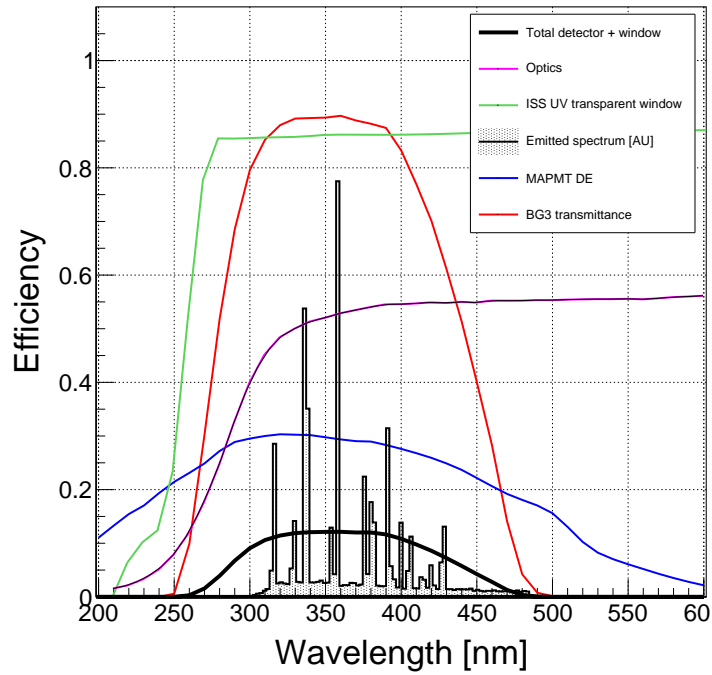


Рис. 1.21: Суммарная эффективность регистрации детектора «УФ атмосфера» (черная кривая) в зависимости от длины волны. Результат пропускания прозрачного УФ-окна МКС – зеленая кривая, оптической системы – фиолетовая кривая, полосового фильтра BG3 – красная кривая и эффективности обнаружения фотонов МАФЭУ – синяя кривая. Система была оптимизирована для наблюдения за флуоресцентным светом, излучаемым молекулами азота при прохождении ШАЛ КЛ ПВЭ (серая гистограмма). Суммарная эффективность – более 50 % в диапазоне длин волн 290–430 нм.

Предполагая, что распределение времени прихода фотонов подчиняется статистике Пуассона, соотношение между предполагаемым количеством фотоэлектронов, попадающих в пиксель, n_{pe} , за такт измерения (GTU – gate time unit) и обнаруженными фотоэлектронами, n , следующее:

$$n = n_{pe} \exp\left(-n_{pe} \cdot \frac{\tau_0}{\tau_{GTU}}\right) \quad (1.11)$$

Разница между n и n_{pe} незначительна при малом темпе счета, но увеличивается с ростом интенсивности сигнала (см. рисунок 1.22). Максимальное значение n составляет $\sim 180/GTU$, что соответствует $n_{pe,PMT} \sim 500/GTU$ фотоэлектронов, создаваемых катодом МАФЭУ. При более высоких значениях обнаруженный сигнал уменьшается, и,

следовательно, истинное значение n_{pe} определить затруднительно. В любом случае, в большинстве случаев, сигналы значительно ниже этой величины и достигают насыщения только в случае очень ярких вспышек, например, молнии.

Учет эффекта наложения импульсов и коррекция измеряемых интенсивностей происходит не в приборе, а при обработке данных.

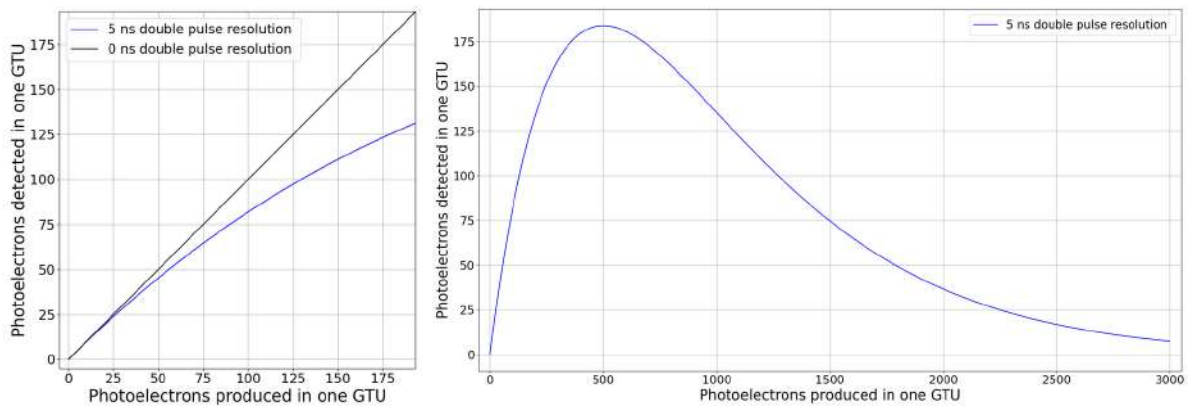


Рис. 1.22: Зависимость числа регистрируемых фотоэлектронов от числа фотоэлектронов, выбиваемых из фотокатода. Слева: более подробно показана начальная часть кривой при малой интенсивности сигнала.

В приборе реализована трехуровневая триггерная система, позволяющая параллельно записывать в течение каждых 5 с наблюдений до 4-х событий с временным разрешением 2,5 мкс и 4-х событий с разрешением 320 мкс, а также вести непрерывную запись в режиме мониторинга с разрешением 40 мс [45]. Первые два режима позволяют отбирать события разной длительности, а третий – регистрировать относительно медленные вариации УФ-свечения на протяжении всей траектории движения МКС. «УФ атмосфера» сохраняет поток данных с временным разрешением 2,5 мкс (D1) в буфере. Триггерный алгоритм ищет в буфере превышение сигнала на 16 стандартных отклонений в любом пикселе фотоприемника. И среднеквадратичное отклонение, и среднее значение рассчитываются в реальном времени, т.е. учитывают вариации условий освещения. При срабатывании триггера в памяти сохраняется 128-кадровый буфер (64 кадра до триггера и 64 кадра после него). Независимо от триггера, суммы из 128 кадров (320 мкс, D2) непрерывно вычисляются и временно сохраняются в другом буфере, где выполняется аналогичный алгоритм триггера (в этой шкале времени). Точно так же

суммы по 128 кадрам D2 (40,96 мс, D3) сохраняются в реальном времени. Таким образом, каждые 5,24 с записываются 128 пакетов данных D3, до четырех пакетов D2, и до четырех пакетов D1. Работоспособность триггерной системы в разных условиях была протестирована в ходе наземных испытаний аппаратуры на специальном лабораторном стенде и в измерениях свечения звезд, антропогенных источников (уличного освещения), треков самолетов и метеоров [46].

Помимо основного телескопа в составе аппаратуры присутствуют две видеокамеры (обычная и инфракрасная) [47]. Важным элементом детектора является источник высоковольтного питания (ИВП), выполненный по схеме Кокрофта-Уолтона [48], который обеспечивает стабильность напряжения на диодной системе МАФЭУ (до 1 кВ), а также выполняет защитную функцию. При резком возрастании интенсивности свечения и, как следствие, тока, через диодную систему МАФЭУ, ИВП снимает напряжение в течение 1 мкс. Это позволяет сохранить работоспособность высокочувствительных фотоэлементов (МАФЭУ) и считывающей электроники. Управление прибором, сбор данных и их хранение на Flash-картах, переключение между режимами работы и сбор данных с дополнительных камер осуществляется центральным процессорным устройством СМХ34ВТ [49].

Фото аппаратуры перед запуском показано на рис. 1.23, а на борту МКС – на рис. 1.24.



Рис. 1.23: «УФ атмосфера» в ходе предполетных испытаний на космодроме «Байконур».



Рис. 1.24: «УФ атмосфера» внутри МКС на УФ-прозрачном окне модуля «Звезда». Направление обзора – в надир; нижняя центральная часть (обозначенная «1») ориентирована по направлению вектора скорости станции.

1.5. Проект «КЛПВЭ» (K-EUSO)

«КЛПВЭ» (K-EUSO) — планируемая орбитальная миссия, направленная на изучение космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) путем регистрации флуоресценции и черенковского света, излучаемого широкими атмосферными ливнями (ШАЛ) в ночной атмосфере Земли в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне. Обсерватория разрабатывается при участии коллаборации JEM-EUSO, и ее планируется развернуть на Международной космической станции (или Российской орбитальной служебной станции) и эксплуатировать не менее двух лет. Телескоп, состоящий из примерно 10^5 независимых каналов, при высоте орбиты 400 км обеспечит пространственное разрешение около 0,6 км на поверхности Земли, а также большую и равномерную экспозицию всего неба в области энергетического спектра за пределом Грейзена-Зацепина-Кузьмина (ГЗК).

Концепция научной аппаратуры основана на детекторе зеркального типа, предложенном в НИИЯФ МГУ им. Скобелева еще в 2001 году [50]. За время работы над проектом она прошла несколько этапов усовершенствования, чтобы соответствовать как современным и меняющимся научным требованиям, так и технической реализуемости. В 2012 г. на этапе аванпроекта был разработан большой зеркальный телескоп площадью 10 м^2 с фокусным расстоянием 3 м и полем зрения около $7,5^\circ$ [51, 52]. Однако уже на этапе предварительного проектирования стало ясно, что параметры прибора (площадь обзора и качество изображения) не позволяют решить актуальные проблемы в области КЛ ПВЭ из-за слишком малого поля зрения данного варианта. Эти соображения инициировали разработку новой оптической системы для детектора «КЛПВЭ» с целью увеличения поля зрения, улучшения пространственного и углового разрешения и эффективности прибора. Для устранения внеосевой аберрации перед фотоприемником была введена дополнительная корректирующая линза Френеля. Были разработаны две версии детектора: Baseline и Multi-Eye Telescope System (METS) [53, 54]. Позднее эти конфигурации были преобразованы в конструкцию с еще

более высокими техническими характеристиками, получаемыми за счет использования оптической системой Шмидта [55].

Дальнейшие технико-экономические проработки показали трудности с доставкой и установкой прибора за пределами МКС в таком варианте (доставка и сборка более 30 отдельных компонент в условиях внекорабельной деятельности). Было принято решение вернуться к варианту линзовой оптики на основе наработок проекта JEM-EUSO [56], так как это позволяло обеспечить оптимальные массогабаритные характеристики оборудования при сохранении научного потенциала (поля зрения, экспозиции, достаточной статистики событий за пределом ГЗК).

В данной конфигурации детектор состоит из рефракторной оптической системы с прямоугольной апертурой 1400×2400 мм² (см. рисунок 1.25) [23]. Такой размер обусловлен тем, что каждая отдельная рама в сложенном состоянии должна быть меньше $1200 \times 700 \times 350$ мм и свободно проходить через грузовой люк ТГК «Прогресс». Оптическая системы состоит из двух элементов (линз), фокусирующих свет на фокальную поверхность размером 1300×1000 мм. Структура фокальной поверхности состоит из 44 фотодетекторных модулей (PDM, от англ. Photo Detector Module), аналогичных другим проектам JEM-EUSO, с общим количеством каналов около 10^5 . Основные параметры детектора приведены в таблице 1.4.

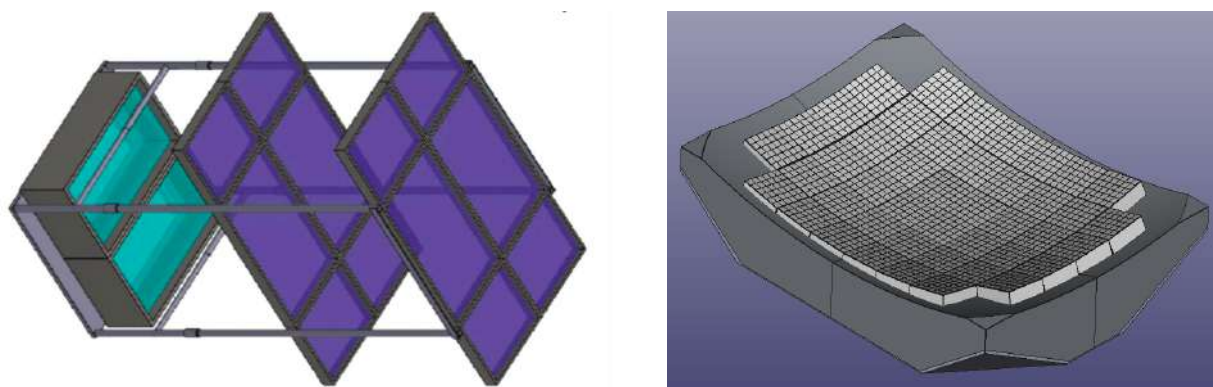


Рис. 1.25: Слева: Схема детектора «КЛПВЭ» с сегментированной преломляющей оптикой и прямоугольной апертурой. Справа: 3D-модель фокальной поверхности, построенная из 44 фотодетекторных модулей. Фотоприемник размещен в двух зеленых блоках, показанных на левой панели.

Таблица 1.4: Технические характеристики «КЛПВЭ»

Параметр	Значение
Высота	400 км
Поле зрения	0,3 ср (48000 км ²)
Размер пикселя фотоприемника	3 мм × 3 мм
Площадь входного окна	3 м ²
Пространственное разрешение	0,6 км (пиксель)
Временное разрешение	2,5 мкс (GTU)
Число модулей/пикселей	44/101376
Размеры в рабочем положении	125×250×400 см

Оптическая система

Оба оптических элемента телескопа выполнены в виде сферических линз Френеля, изготовленных из специального материала полиметилметакрилата (ПММА), прозрачного в ближнем УФ-диапазоне. Значительная оптическая сила таких линз создается специальными кольцевыми зонами поверхности Френеля, при этом даже при больших габаритах толщина линз оказывается небольшой, а масса всей системы умеренной. Материал ПММА-000 (продукт Mitsubishi Chemical Corporation) был выбран по нескольким причинам. Наряду с низкой плотностью (около 1,2 г/см³), обеспечивающей малый вес линзы, этот материал обладает рядом важных оптических свойств, в том числе слабой температурной зависимостью показателя преломления. Прозрачность ПММА-000 практически не изменяется при длительном воздействии атомарного кислорода (основного элемента остаточной атмосферы на высоте МКС) и протонов с энергией около 70 МэВ. В то же время ПММА-000 достаточно тверд (по сравнению, например, с мягким и пластичным СУТОР, также рассматриваемым в рамках проектов JEM-EUSO) и может использоваться для высокоточного фрезерования. На сегодняшний день несколько таких линз были изготовлены для проектов JEM-EUSO: балонных экспериментов EUSO-Balloon [57] и EUSO-SPB1 [58] и космического эксперимента «УФ атмосфера» (Mini-EUSO) [59].

Форма передней линзы выпукло-вогнутая, задней – вогнуто-выпуклая. Радиусы кривизны всех четырех оптических поверхностей S1, S2, S3, S4 равны, что значительно упрощает их изготовление. Оптическая сила линз создается радиальными структурами Френеля, которые расположены на обеих поверхностях передней линзы (S1 и S2) и на передней поверхности задней (S3). Расчет показал, что, для обеспечения качества фокусировки сигнала в широком спектральном диапазоне (от 300 до 400 нм), оставшаяся поверхность (S4) должна представлять собой дифракционный оптический элемент (ДОЭ).

Подбор оптимальных значений параметров всех четырех поверхностей и расстояний между элементами (линзы и фокальная поверхность) осуществлялся в рамках численного моделирования в пакете Zemax OpticStudio. На этапе предварительного моделирования значения радиусов кривизны всех оптических поверхностей, а также вогнутой сферической фокальной поверхности были зафиксированы: $R1 = R2 = R3 = R4 = 5500$ мм, $RFS = 2000$ мм. Толщина обеих линз была выбрана равной 10 мм.

В качестве критерия оптимизации выбран среднеквадратический радиус полихромного изображения (с одинаковыми весами для трех основных длин волн 337, 357 и 391 нм), усредненный по полю зрения от 0° до 20° . Оптическая схема и точечные диаграммы полученной системы показаны на рис. 1.26. В качестве критерия оптимизации выбран среднеквадратический радиус полихромного изображения (с одинаковыми весами для трех основных длин волн 337, 357 и 391 нм), усредненный по полю зрения от 0° до 20° . Оптическая схема и точечные диаграммы полученной системы показаны на рис. 1.26.

Система имеет прямоугольную апертуру 1400×2400 мм и следующие осевые расстояния: расстояние между линзами $S2-S3 = 2102$ мм, расстояние между задней линзой и фокальной поверхностью $S4-FS = 1466$ мм, общая осевая длина системы $S1-FS = 3588$ мм. Таким образом, продольный размер всего телескопа, включая конструкцию фокальной поверхности, не превышает 4 м. Характерный период дифракционной

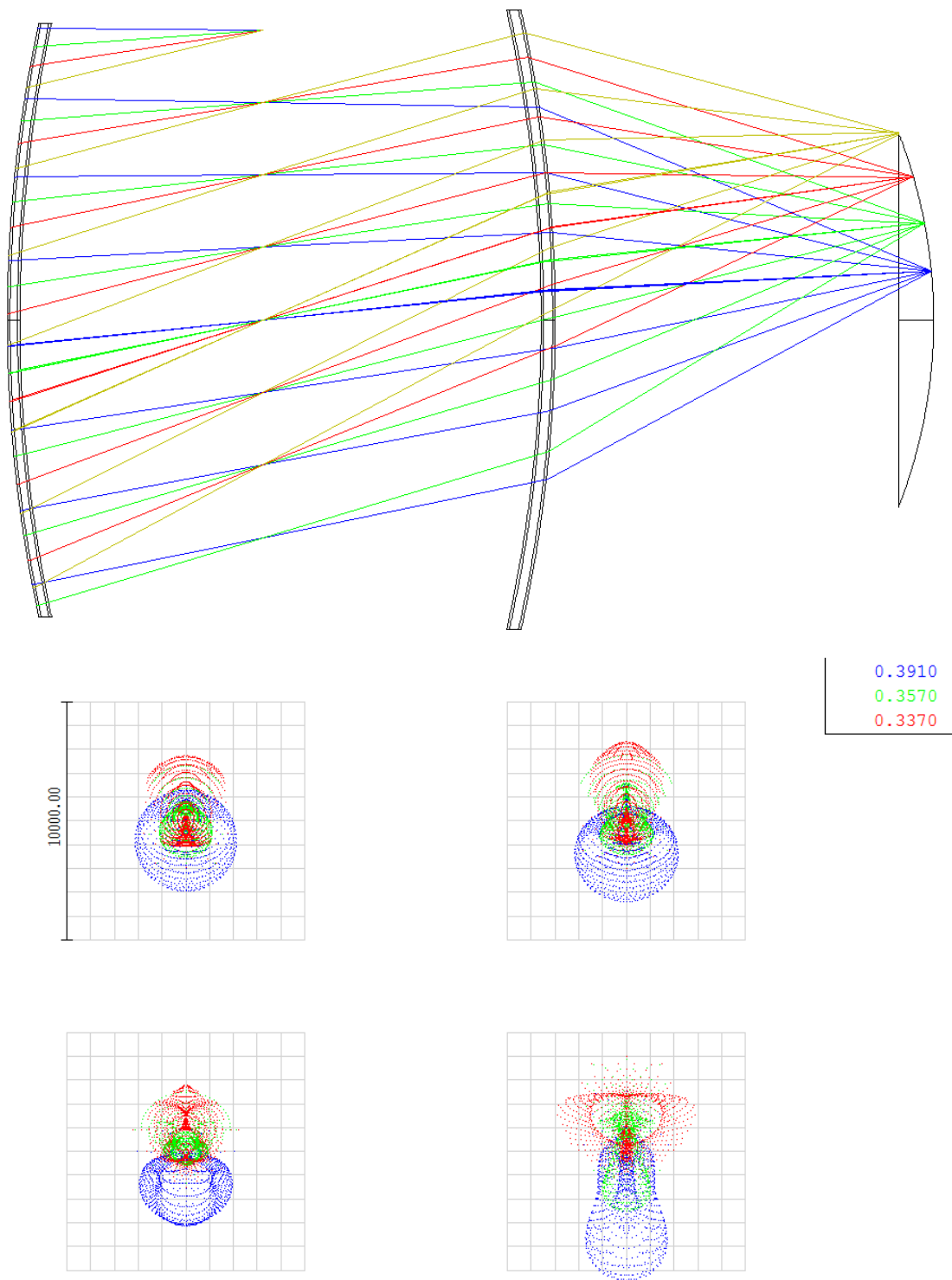


Рис. 1.26: Сверху: оптическая схема K-EUSO как модель последовательной трассировки лучей в Zemax. Снизу: точечные диаграммы для $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Ячейка сетки имеет размер 1×1 мм.

решетки на расстоянии 1000 мм от оси составляет 6 мкм и является приемлемым с точки зрения технологии изготовления.

Характерной особенностью оптики Френеля является то, что часть

световой энергии рассеивается под большими углами относительно центра изображения. Модель последовательной трассировки лучей (SRT) Zemax дает приблизительную оценку работы оптической системы. Для более точного анализа, учитывающего как рассеяние френелевскими структурами оптических поверхностей, так и виньетирование прямоугольными апертурами элементов, необходима так называемая непоследовательная (NRST) модель оптики. Точечные диаграммы, полученные в рамках NRST, представлены на рисунке 1.27 для разных полевых углов γ . Количественная зависимость размера изображения (среднеквадратичного диаметра пятна) во всем поле зрения представлена в третьей строке таблицы 1.5 (здесь ϕ — азимутальный угол, $\phi = 0^\circ$ и 90° по малой и большой сторонам входного окна соответственно). Видно, что оптическая система согласована с размером пикселя $a = 3$ мм вплоть до $\gamma = 15^\circ$. При больших углах становится значительной асимметрия изображения, что приводит к снижению эффективности светосбора.

Таблица 1.5: Характеристики оптической системы «КЛПВЭ»: размер изображения d_{RMS} , эффективная площадь S_{eff} , энергия в одном пикселе (ЕЕ, от англ. Ensquared Energy) как функция углов γ , ϕ .

γ	5°		10°		15°		20°	
ϕ	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°
d_{RMS} , мм	2,61	2,68	2,84	2,95	3,11	3,10	3,86	3,32
S_{eff} , м ²	1,53	1,49	1,30	1,34	0,98	1,22	0,56	0,94
ЕЕ	0,79	0,78	0,76	0,74	0,71	0,71	0,47	0,65

Эффективность оптической системы оценивалась как ее эффективная площадь S_{eff} , т.е. отношение энергии излучения в изображении к освещенности входного зрачка, а также энергия в пикселе (ЕЕ) — отношение энергии в пикселе к энергии во всем изображении. При их расчете учитывались эффекты поглощения в материале линз, отражения от четырех оптических поверхностей (включая полное внутреннее отражение) и рассеяния лучей за счет попадания в боковые (цилиндрические) участки канавок Френеля, дифракционная эффективность ДОЭ выбиралась равной 80 %. Результаты представлены в последних двух строках таблицы 1.5.

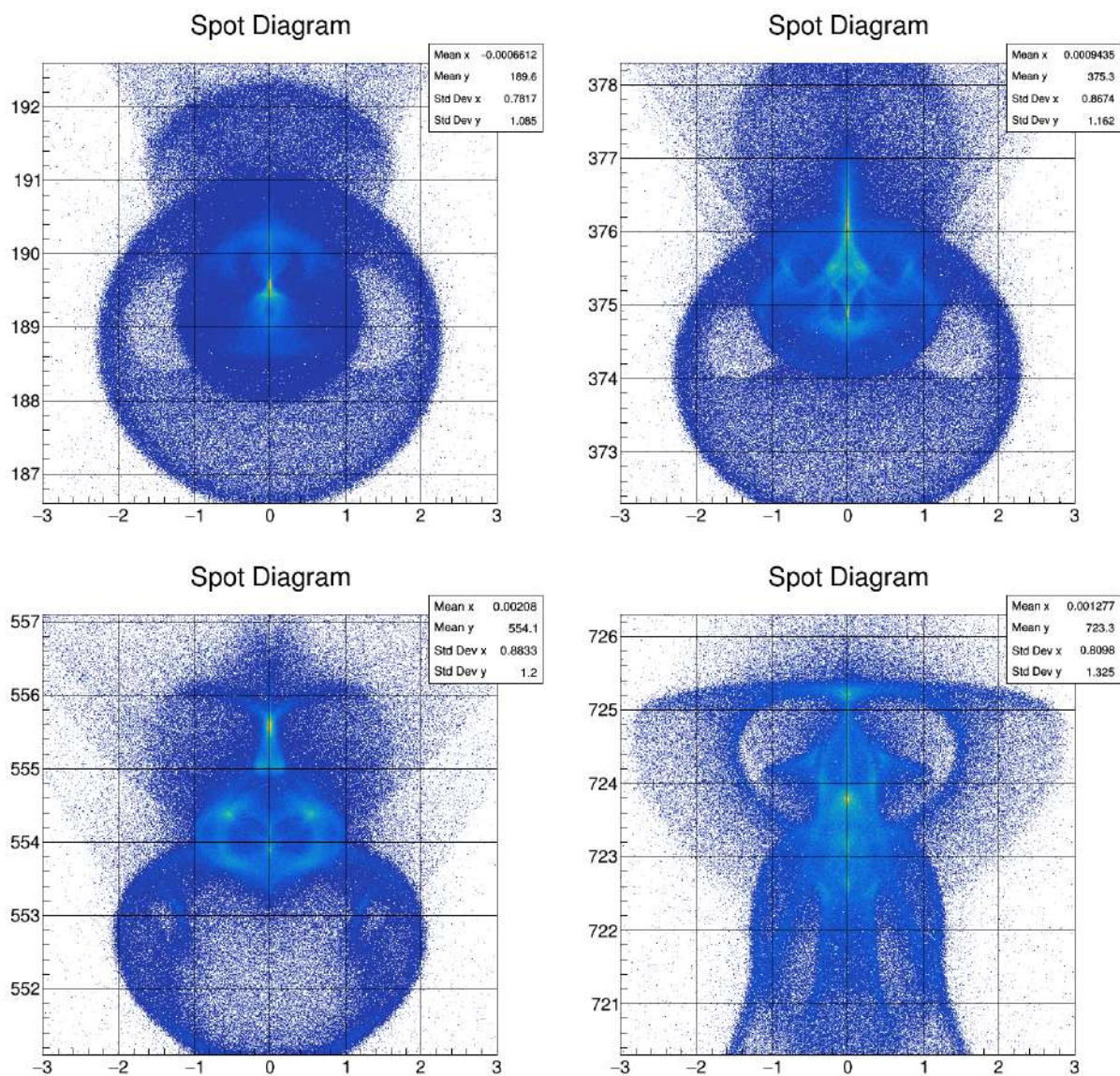


Рис. 1.27: Точечные диаграммы модели NSRT для $\gamma = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$. Ячейка сетки имеет размер 1×1 мм.

Таким образом, данная оптическая система телескопа имеет следующие характеристики:

1. Поле зрения: асимметричное с максимальным углом поля зрения $\gamma_{max} = 18^\circ - 20^\circ$ при $\phi = 90^\circ$, $\gamma_{max} = 15^\circ - 16^\circ$ при $\phi = 0^\circ$, общее поле зрения составляет $\sim 0,3$ ср;
2. Разрешение: угловое $\Delta\gamma = a/F = 1,5$ мрад $\approx 0,1^\circ$, пространственное $\Delta L = R\Delta\gamma = 0,6$ км (при высоте орбиты $R = 400$ км);
3. Площадь светосбора: геометрическая (у входного зрачка) $S_{geom} = 3$ м², эффективное $S_{eff} = 1,0 - 1,5$ м².

Процесс изготовления и тестирования линзы Френеля для «КЛПВЭ» показан на рис. 1.28



Рис. 1.28: Слева: процесс формирования линзы. Справа: тестирование качества френелевской структуры линзы.

Фотоприемник, состоит из 44 модулей, аналогичных используемым в проекте «УФ атмосфера» (см. предыдущий раздел). Все модули работают независимо, вся система построена на принципе сетевой архитектуры. Сетевой принцип реализуется за счет организации трех типов связи: высокоскоростная связь между соседними модулями фотоприемника, дальняя связь для записи информации в ПЗУ ЦПУ и синхронизирующая связь для синхронизации работы отдельных модулей [60]. Цифровая обработка, включая систему запуска, выполняется в системе на кристалле Zynq, включающей ПЛИС и процессорную систему. Двухуровневая триггерная система для обнаружения ШАЛ используется так же, как и для JEM-EUSO. Для регистрации более медленных событий используются более медленные режимы и предполагается, что они будут работать аналогично телескопу Mini-EUSO. Триггеры медленных режимов могут быть реализованы в процессорной части ПЛИС, поскольку они не должны быть чрезвычайно быстрыми.

Модуль фотоприемника был изготовлен и протестирован для подтверждения его технических характеристик и проверки передачи команд и данных в ЦПУ как в ходе выполнения работ по проекту «КЛПВЭ», так и в процессе подготовки и эксплуатации баллонного эксперимента EUSO-SPB2, использующего такие же модули. Фотография модуля фотоприемника во время испытаний представлена на рис. 1.29.

Моделирование работы детектора «КЛПВЭ» проводилось в

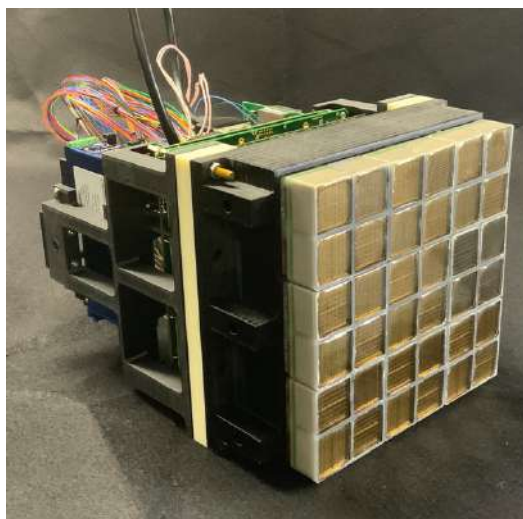


Рис. 1.29: Фотография модуля фотоприемника «КЛПВЭ»

специализированном программном пакете ESAF, разработанном в коллаборации JEM-EUSO [61, 62]. Пример отклика «КЛПВЭ» на ШАЛ от протона с энергией 100 ЭэВ, пришедшего под зенитным углом 60° , смоделированный с помощью ESAF, показан на рис. 1.30. На верхней панели показано распределение фотоэлектронов от ШАЛ (без учета фонового излучения атмосферы) на фокальной поверхности. На нижней левой панели показана кривая свечения ШАЛ. Периодическое уменьшение интенсивности сигнала обусловлено промежутками между МАФЭУ. Нижняя правая панель показывает спектр длин волн фотонов, попадающих в детектор. Линии излучения флуоресценции видны вместе с непрерывным черенковским излучением.

При расчете экспозиции и количества регистрируемых событий использовались триггерные алгоритмы JEM-EUSO [63]. Расчет экспозиции производился методом Монте-Карло моделирования ШАЛ с разной энергией и направлениями прихода. Чтобы избежать граничных эффектов, космические лучи инжектируются в область A_{simu} , превышающую поле зрения детектора. Отношение числа триггеров N_{trigg} к смоделированным событиям N_{simu} затем рассчитывается для каждого бина по энергии. В формулу расчета также входит телесный угол Ω , под которым космические лучи попадают в поле зрения. Эффекты цикла дня и ночи и фаз луны учитываются в параметре η . Эффекты облаков и искусственного освещения учитываются параметрами η_{clouds} и η_{city} соответственно. В

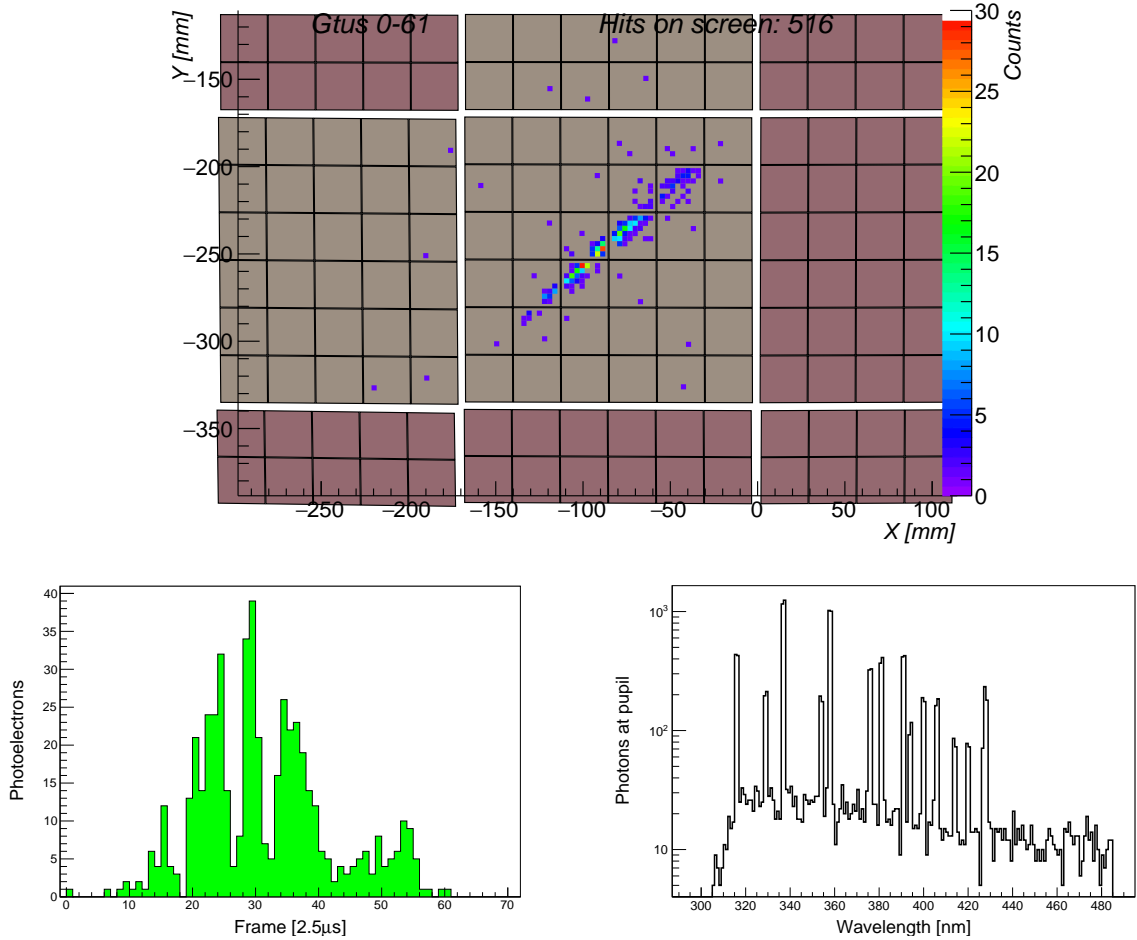


Рис. 1.30: Распределение фотоэлектронов от ШАЛ, генерируемого протоном с энергией 100 ЭэВ, пришедшим под зенитным углом 60° (результат моделирования с помощью ESAF). Показан только сигнал от ШАЛ. Вверху: распределение сигнала на фокальной поверхности. Внизу: соответствующее временное распределение фотоэлектронов (слева) и спектр фотонов на входе детектора (справа).

соответствии с оценками [64] $\eta = 0,2$, $\eta_{\text{clouds}} = 0,72$ и $\eta_{\text{city}} = 0,9$. Экспозиция за время t (которое полагается равным 1 году) рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}(E) = \frac{N_{\text{trigg}}(E)}{N_{\text{simu}}} \times A_{\text{simu}} \times \Omega \times \eta \times \eta_{\text{clouds}} \times \eta_{\text{city}} \times t. \quad (1.12)$$

Годовая экспозиция как функция энергии показана на рис. 1.31. Видно, что экспозиция «КЛПВЭ» выходит на плато $\sim 18000 \text{ км}^2 \text{ ср}$ в год, что достигается при энергиях выше 100 ЭэВ (для сравнения с $5000\text{--}7000 \text{ км}^2 \text{ ср}$ в год коллаборации Auger и $\text{TA} \times 4$). Эффективность 50 % достигается около 40 ЭэВ. Предполагая спектр Auger [65], ожидаемая

частота событий КЛ ПВЭ оценивается примерно в 65 событий в год выше 50 ЭэВ, включая 4 события с энергиями выше 100 ЭэВ. Для сравнения, коллаборация Pierre Auger Observatory обнаруживает в среднем ~ 19 событий в год с энергией выше 50 ЭэВ и зенитным углом ШАЛ ниже 60° .

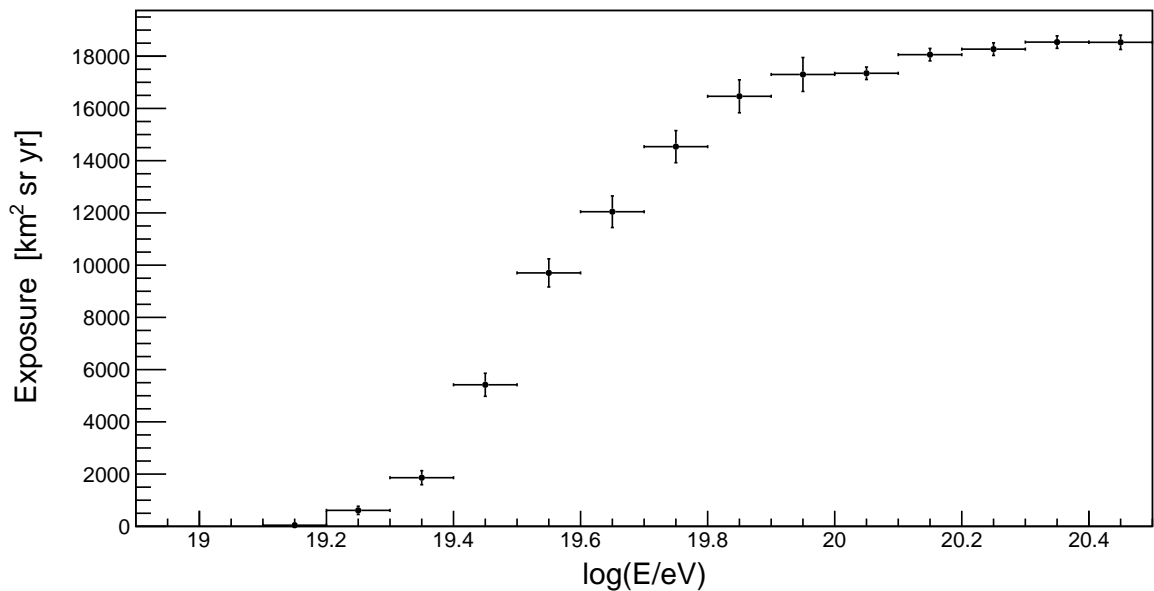


Рис. 1.31: Годовая экспозиция «КЛПВЭ» в зависимости от энергии.

Угловое разрешение «КЛПВЭ» составляет от 4° до 7° для малых зенитных углов, и улучшается до 1° – 2° для квази-горизонтальных событий. При этом точность увеличивается с ростом энергии событий. Энергетическое разрешение, в свою очередь, зависит от направления прихода ШАЛ. При малых зенитных углах (30° – 40°) оно составляет около 25 %, для квазигоризонтальных ШАЛ (зенитный угол больше 30°) – улучшается до 15 % (см. рис. 1.32. Для сравнения: Обсерватория Пьера Оже имеет энергетическое разрешение выше 10^{19} эВ порядка 7 %, тогда как у Telescope Array – 18 % в том же энергетическом диапазоне. Систематические неопределенности в определении энергии составляют 14 % и 21 % для Оже и ТА соответственно.

Таким образом, разрабатываемый детектор «КЛПВЭ» может быть первым полноценным орбитальным детектором космических лучей предельно высоких энергий с равномерной экспозицией по всей небесной сфере, что позволит разрешить имеющиеся противоречия между наземными установками. При этом, ожидаемая угловая точность

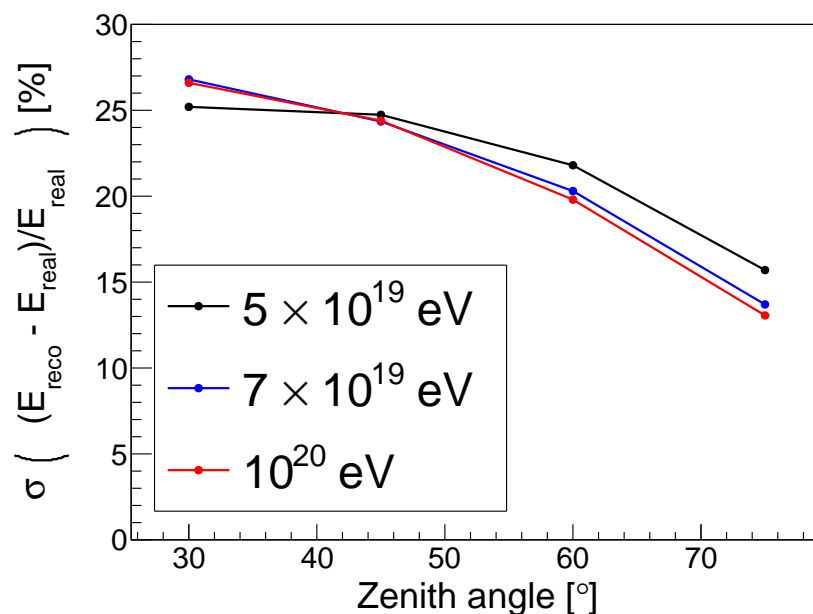


Рис. 1.32: Точность реконструкции (в %) первичной энергии при различных значениях энергии и зенитного угла.

измерений и энергетическое разрешение несколько хуже, чем у наземных детекторов. Однако если учитывать квази-горизонтальные ШАЛ с высокой энергией, то параметры становятся сопоставимы.

Самое важное преимущество заключается в экспозиции по всей небесной сфере, что недостижимо для наземных приборов. Так, в работе [66] было показано, что детектор «КЛПВЭ» за год на орбите сможет ответить на вопрос о физическом или методическом различии спектров в северном и южном полушариях. Ожидаемые спектры за год работы прибора на орбита показаны на рис. 1.33.

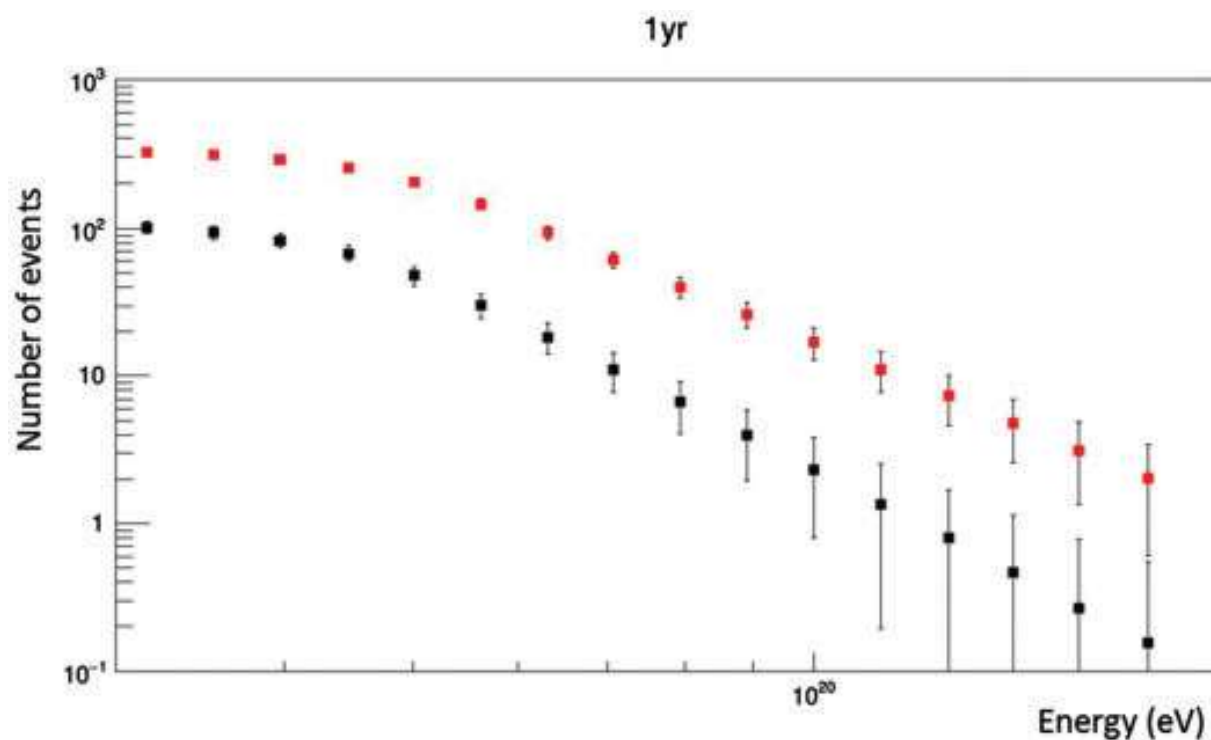


Рис. 1.33: Интегральный спектр КЛПВЭ, который может быть получен детектором «КЛПВЭ» за год работы из обеих полусфер. Красные точки – число событий в северном полушарии (на основе спектра ТА [67]), черные – в южном полушарии (на основе спектра РАО [68]).

1.6. Приборы серии «АУРА»

В связи с бурным развитием технологии создания унифицированных платформ малых космических аппаратов (наноспутников или кубсатов), стало возможным существенно сократить время разработки и запуска научной аппаратуры при условии, что она удовлетворяет требованиям по компактности, энергопотреблению и массе. В МГУ им. М.В. Ломоносова развивается программа запуска малых космических аппаратов с целью продолжения исследований околоземного космического пространства и верхней атмосферы на кубсатах.

В рамках этой программы разработана серия компактных фотометров на основе кремниевых фотоумножителей «АУРА» (англ. AURA – Atmospheric Ultraviolet Radiation). Первый такой прибор прошел летные испытания в составе космического аппарата «ВДНХ-80» (2019 г.), второй работает на борту спутника «ДЕКАРТ» (2020 г.), а третий

запущен в 2023 году в составе кубсата «САТУРН». На два варианта прибора получены патенты на изобретение РФ⁴.

Основные характеристики прибора описаны в работе [69]. Детектор «АУРА» состоит из трех составных частей:

1. Детекторного модуля;
2. Оптической системы;
3. Процессорного модуля.

Причем, в разных версиях прибора изменяется только оптическая часть, а именно, расположение фотосенсоров, используемые светофильтры и площадь входного окна. Оптическая система представляет собой бленду со светофильтрами для выделения диапазона нужных длин волн. Бленда ограничивает поле зрения фотоумножителей и определяет направление обзора. В случае спутника ВДНХ-80 все 4 поля зрения направлены в надир и составляют $22,5^\circ$. Используемые светофильтры – УФС1, УФС2 и ФС6. В приборе на спутнике ДЕКАРТ два центральных SiPM также направлены соосно в надир, а у крайних поле зрения направлено под углом и составляет от 22° до 45° . В центральных каналах используются 2 фильтра: УФС 1 и FF01-375/110, крайние работают без светофильтров.

Детекторный модуль представляет собой печатную плату, с расположенными на ней, кремниевыми фотоумножителями (SiPM) и датчиками температуры. В приборе используются SiPM модели MicroFC-60035-SMT с рабочей областью 6×6 мм, спектральной чувствительностью от 300 до 800 нм, максимумом спектральной чувствительности 420 нм и квантовой эффективностью до 41 % при 420 нм. Такая чувствительность достигается при напряжении питания между анодом и катодом около 29,5 В. Цифровой термометр в плате модели DS1631AU имеет рабочий диапазон температур от -55 до 125 °С. Данные о температуре можно использовать для их учета в последующей обработке данных.

⁴Патент на изобретение № 2764400 «Компактный детектор УФ-излучения атмосферы земли для использования на малых космических аппаратах». Патент на изобретение № 2764401 «Компактный детектор УФ излучения атмосферы Земли с широким полем зрения для использования на малых космических аппаратах».

Таблица 1.6: Основные характеристики «АУРА-2»

Характеристика	Значение
Диапазон длин волн, нм	300–400
Временное разрешение, мс	10
Габариты (Д×Ш×В), мм	не более 110×100×40
Масса, кг	0,5
Энергопотребление, Вт	< 1
Напряжение питания, В	5
Поле зрения	22° × 90°
Объем внутренней памяти, Мбайт	32

Питается SiPM от отрицательного и положительного источников напряжений. Отрицательный источник на основе микросхемы инвертирующего преобразователя напряжений ADP5073 задает напряжение пробоя $V_{br} = 24,2\text{--}24,7$ В для лавинных диодов в SiPM. Регулировать это напряжение можно при помощи цифрового потенциометра на микросхеме AD5245. Регулировка значения сопротивления осуществляется с контроллера по интерфейсу – I2C. Положительное значение перенапряжения $V_{ov} = 1\text{--}5$ В устанавливается на выходах 8-канального, 8-битного цифроаналогового преобразователя AD5308. Выходное напряжение регулируется микроконтроллером по каналу связи интерфейса SPI. Выходной буферный усилитель этого преобразователя выдерживает ток до 2,5 мА. Изменение V_{ov} позволяет регулировать усиление SiPM.

Регистрация потоков фотонов происходит путём измерения тока, проходящего через фотоумножители с помощью микросхем MAX9611, разработанных на основе токовых усилителей, и 12-ти разрядных аналого-цифровых преобразователей. В микросхемах предусмотрены 3 режима усиления сигнала: $\times 1$, $\times 4$ и $\times 8$. Это позволяет проводить измерения в широком диапазоне интенсивностей: от ночного неба до прямого солнечного света. При эксплуатации используются только два ($\times 1$ и $\times 8$), что позволяет снимать показания с SiPM с разрешениями 0,1344 мкА и 1,075 мкА. Измерение тока происходит путем измерения напряжения на шунтирующем сопротивлении, величиной 100 Ом. Основные характеристики детектора перечислены в таблице 1.6

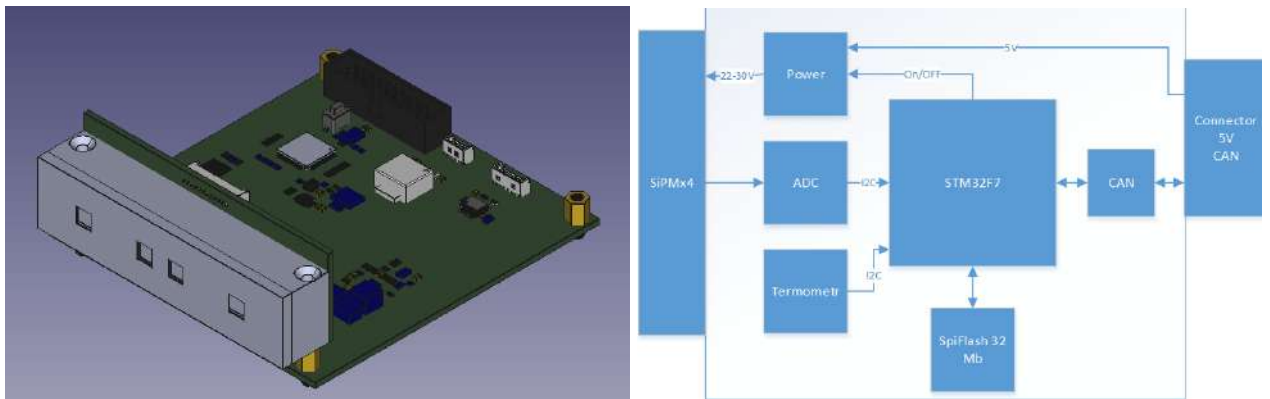


Рис. 1.34: 3D схема и блок-схема электроники детектора АУРА-2.

3D модель и блок-схема прибора АУРА-2 на спутнике ДЕКАРТ представлены на рис. 1.34

Для подстройки чувствительности SiPM к потоку излучения служит система автоматической регулировки усиления, которая имеет 4 режима, отличающиеся перенапряжением V_{ov} . Возможные значения перенапряжения: 0 В (режим фотодиодов), 1,22 В и 2,44 В (для измерений интенсивности на терминаторе и при случае высокой ночной атмосферной освещенности – полнолунии) и 5 В (наиболее чувствительный режим для измерения свечения в безлунные ночи). Обработка и хранение данных производится на микроконтроллере фирмы STmicroelectronics STM32F107R8T.

Временное разрешение детектора на спутнике «ВДНХ-80» составляло 1 с, на спутнике «ДЕКАРТ» – 10 мс. В первом случае важно было отработать режимы работы, переход через терминатор, оперативную подстройку напряжений в случае неконтролируемого вращения аппарата. Во втором, стало возможным проводить измерения вспышечных явлений. Наличие разных фильтров позволяет проводить спектральный анализ, и тем самым идентифицировать тип разряда в атмосфере (подробнее об это в главе 4).

Космический аппарат «ВДНХ-80» успешно запущен 5 июля 2019 года. Первые месяцы полета спутника «ВДНХ-80» были посвящены этапу ввода проекта в эксплуатацию и испытаниям служебных систем спутника. Поэтому первые включения детектора состоялись только 14.11.2019,

19.11.2019 и 26.11.2019. Включения научной аппаратуры происходили на дневной стороне орбиты в районе пункта управления в г. Калуга.

Первое, тестовое, включение происходило 14.11.2019 без подачи питания на SiPM на дневной стороне орбиты. В этом случае SiPM работают как фотодиоды и рассчитаны на измерения больших потоков. Интенсивность измерения (в кодах АЦП), полученная за первый сеанс, приведена на осциллограмме рис. 1.35. Временное разрешение составляет 1 с. Вариации интенсивности в основном определяются вращением спутника. Между 25 и 40 с сигнал равен темновому току, измеренному в предполетных испытаниях, следовательно, входные окна детектора направлены в сторону минимальной интенсивности свечения, и чувствительности SiPM при отсутствии питания недостаточно. При этом в предполетных измерениях SiPM 4 имел самое низкое значение темнового тока, равное 23 отсчетам АЦП (что и наблюдается на осциллограмме).

В районе 60-й секунды измерений наблюдается максимум свечения. При пересчете кодов АЦП в мощность излучения получено значение $\sim 0,14$ Вт/см², таким образом, в этот момент в поле зрения детектора находилось Солнце. Это показывает, что детектор сохраняет работоспособность и возможность проводить измерения во время и после попадания прямого солнечного излучения на фотосенсор.

Перед установкой на борт космического корабля фотометры проходят калибровку. Получены калибровочные кривые, т.е. зависимость между измеренным током на аноде SiPM и интенсивностью входного потока УФ-излучения. Для проведения калибровочных измерений детектор размещается в специальном непрозрачном боксе, чтобы избежать дополнительной неконтролируемой засветки. Светодиод с максимальной интенсивностью излучения на длине волны 405 нм был помещен в двухпортовую интегрирующую сферу с небольшим коллиматором диаметром 1 мм, направленным на SiPM. Интегрирующая сфера обеспечивает равномерное освещение SiPM. Второй порт сферы использовался для контроля и измерения интенсивности УФ-излучения, создаваемого установкой. Для был применен NIST фотодиод и измеритель мощности LaserStar производства Ophir Optronics Solutions Ltd.

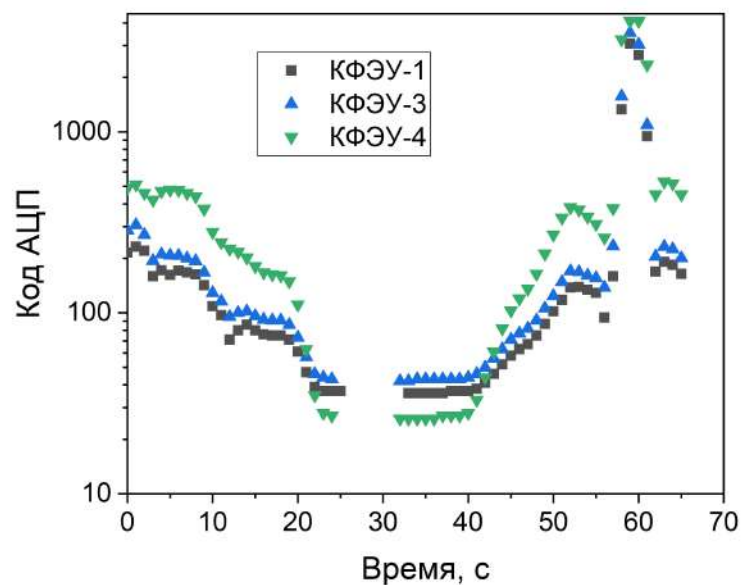


Рис. 1.35: Осциллограмма измерений детектора «АУРА» в течение сеанса 14.11.2019.

Для примера, результаты калибровки двух центральных SiPM «АУРА-2» для приосевого потока показаны на рис. 1.36. Левый график соответствует фильтру УФС1 и имеет в два раза меньшее пропускание на этой длине волны, чем интерференционный фильтр FF01-375/110. При малом УФ-потоке (примерно до $4 \cdot 10^9$ фотонов/с) обе зависимости линейны, а затем доля регистрируемых фотонов начинает существенно уменьшаться. Существуют две основные причины изменения характера кривой: 1) изменение напряжения, приложенного к SiPM, из-за большего тока через анодную цепь и 2) эффект суперпозиции фотонов, что приводит к образованию одной лавины в микроканале SiPMs при одновременном попадании в него нескольких фотонов. Второй эффект, так называемый эффект наложения, является доминирующим и частота регистрируемых импульсов (скорость счета) зависит от частоты фотонов как $k = A \cdot n \cdot \exp(-n\tau)$, где k — количество зарегистрированных импульсов, n — число фотонов, падающих на поверхность фотокатода, τ — характерное мертвое время системы регистрации.

Те же измерения были сделаны до установки фильтров, и эти два измерения позволяют получить коэффициенты пропускания фильтров (отношение параметра A двух аппроксимаций) и коэффициенты усиления

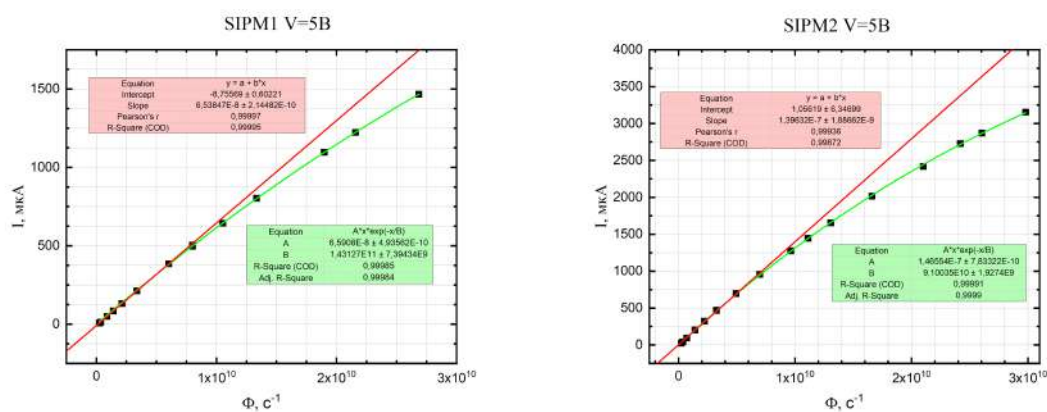


Рис. 1.36: Результаты калибровки двух SiPM детектора «АУРА-2» с величиной перенапряжения 5 В.

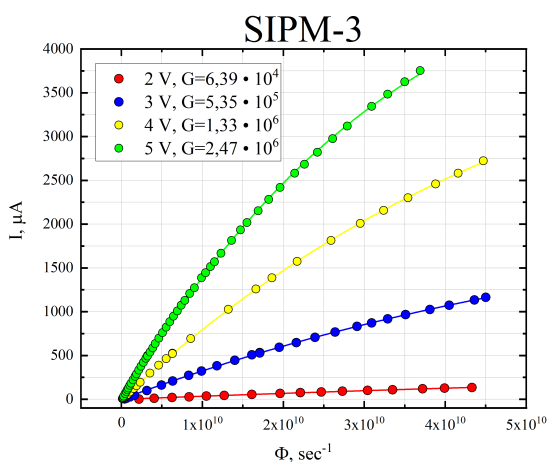


Рис. 1.37: Результаты калибровки двух SiPM-3 детектора «АУРА-2» при разных значениях перенапряжения.

SiPM (G). Для УФС-1 коэффициент пропускания составляет 43 %, а для FF01 – 93 %. Коэффициенты усиления SiPM в предположении, что квантовая эффективность фотокатода равна 40 % составляют $2,45 \cdot 10^6$ и $2,42 \cdot 10^6$.

Калибровка детектора и измерения усиления проводились и для других перенапряжений: 2 В, 3 В, 4 В. Пример кривых для одного SiPM показан на рис. 1.37.

1.7. Фотометры проекта RAIPS

Начиная с 2021 года технология, разработанная в рамках проектов, посвященных регистрации КЛ ПВЭ нашла свое применение в исследованиях излучения атмосферы Земли в Арктическом регионе. Автором работы было предложено использовать широкоугольные изображающие фотометры для регистрации пульсирующих полярных сияний с целью определения максимальной энергии заряженных частиц, участвующих в образовании данного типа сияний [70, 71]. Проект получил название RAIPS – Pulsationg Aurora Imaging Photometers System и был поддержан Российским научным фондом (проект № 22-62-00010).

Один фотометр (RAIP-V) установлен в обсерватории «Верхнетуломская» Полярного геофизического института (ПГИ) и работает с сентября 2021 года [72]. Детектор состоит из трех основных частей: (1) изображающего фотометра; (2) спектрометра и (3) системы обработки данных. Фотометр обеспечивает регистрацию пространственной структуры событий. Спектрометр позволяет измерять временной профиль сигнала в ряде (до 16) диапазонов длин волн. Система обработки данных обеспечивает считывание, хранение и предобработку информации как со спектрометра, так и с фотометра.

3D-модель детектора представлена на рис. 1.38. Линза — это входное окно телескопа. Матрица из 16 маленьких окон соответствует 16-ти каналам спектрометра. Входные окна телескопа и спектрометра снабжены черными блендами, защищающими детектор от бокового освещения. На рис. 1.39 показана фотография прибора и его установка в обсерватории «Верхнетуломская» (VTL, 68,63° с.ш., 31,78° в.д.) Полярного геофизического института.

При создании телескопа использован опыт разработки научной аппаратуры «УФ атмосфера» [42]. Он представляет собой детектор с простой оптической системой из одной линзы диаметром 5 см. Линза изготовлена из ПММА (полиметилметакрилата) — УФ-прозрачного пластика и имеет сферическую переднюю поверхность (с радиусом кривизны 82,32 мм) и плоскую заднюю поверхность.

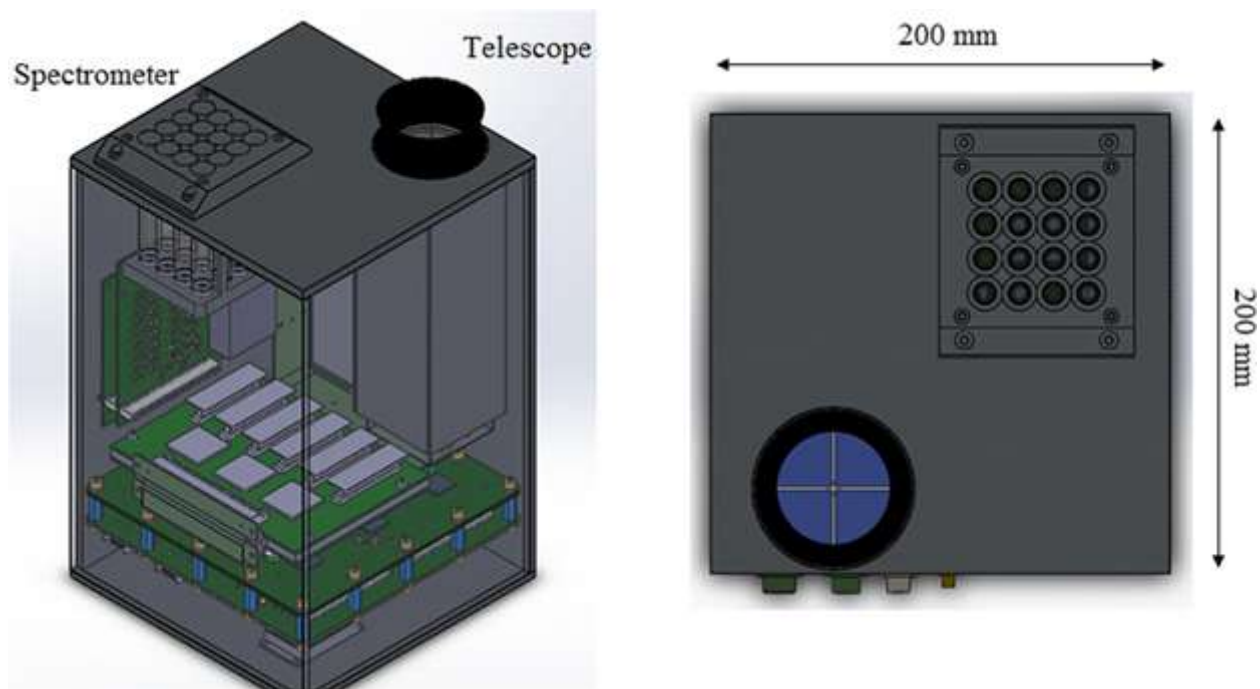


Рис. 1.38: 3D модель широкоугольного изображающего фотометра RAIP-V.

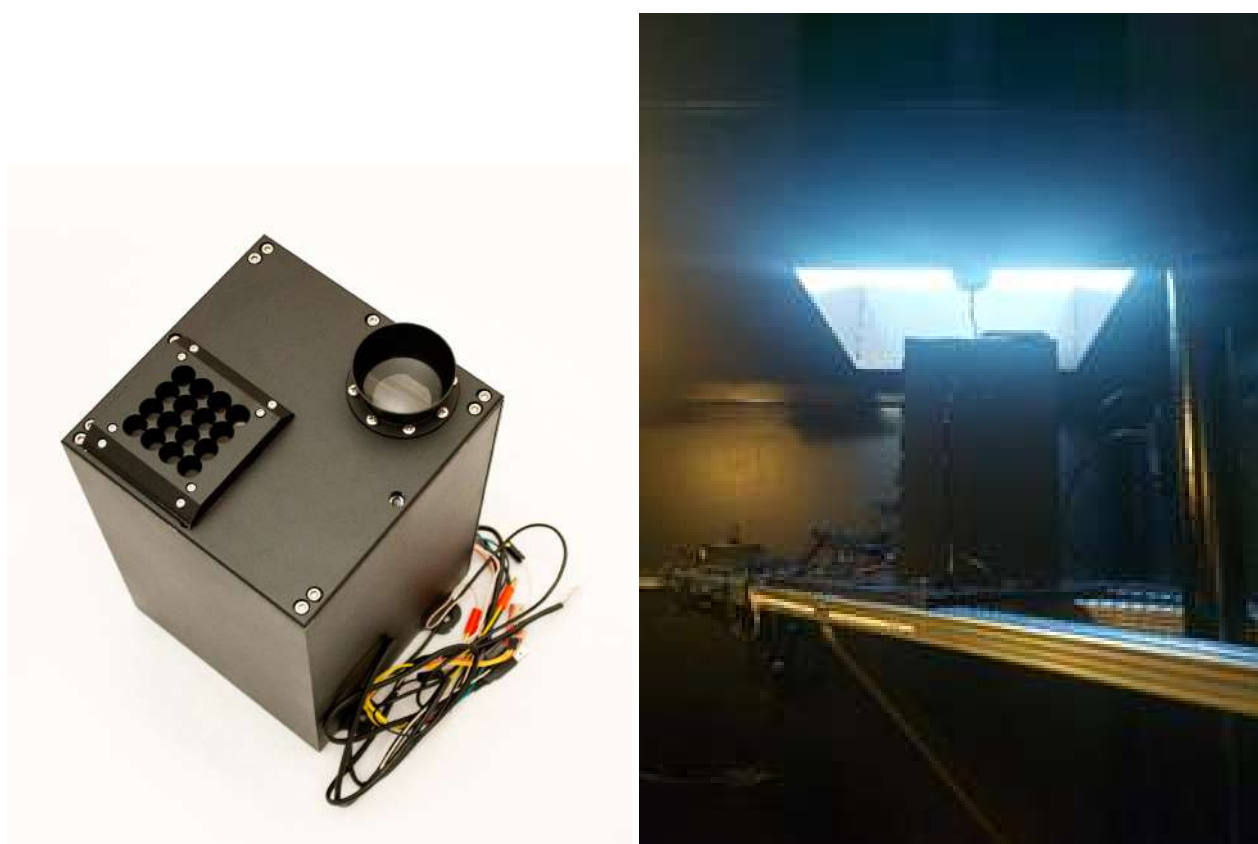


Рис. 1.39: Фотография RAIP-V при тестировании и установке в обсерватории «Верхнетуломская»

Фотодетектор состоит из 4 многоанодных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ), расположенных в фокальной плоскости объектива. Общее количество каналов («пикселей») на фокальной поверхности составляет 256 (матрица 16×16). Фокусное расстояние оптической системы равно 15 см, что дает угловое разрешение $1,2^\circ$ (каждый пиксель имеет размер ~ 3 мм). Таким образом пространственное разрешение на типичной высоте полярного сияния (100 км) составляет около 2 км. Общее поле зрения телескопа $\sim 20^\circ$.

Источник высоковольтного напряжения построен по схеме Кокрофта-Уолтона и обеспечивает питанием все 4 МАФЭУ. Он управляется системой обработки данных и имеет возможность изменять эффективность регистрации и коэффициент усиления (в течение нескольких микросекунд), чтобы можно было проводить измерения в случае событий с большой яркостью или высоким уровнем УФ-фона. МАФЭУ работают в режиме счета одиночных фотоэлектронов с очень высокой чувствительностью (эффективность обнаружения $\sim 20\text{--}30\%$). Этот режим реализуется с помощью специализированной интегральной схемы под названием SPACIROC-3, которая была разработана ранее в коллаборации JEM-EUSO [73]. В микросхеме реализован счет фотоэлектронных импульсов во временном интервале 1 или 2,5 мкс, что соответствует временному разрешению детектора. Режим счета одиночных фотоэлектронов позволяет добиться очень высокой чувствительности по сравнению с другими детекторами, широко используемыми для измерения полярных сияний, такими как камеры NIPR-CMOS [74] или EMCCD [75]. PAIP-V чувствителен к изменениям яркости полярного сияния в 10 рэлей.

Спектрометр состоит из 16 одноанодных ФЭУ (Hamamatsu R1463), использовавшихся в эксперименте ТУС [21] на борту спутника «Ломоносов». Каждый ФЭУ имеет индивидуальный светофильтр на входном окне. В текущей конфигурации используются только 7 каналов: три со стеклянными фильтрами УФС1, УФС2, КС11, один без фильтра, для измерения суммарной интенсивности в широком диапазоне длин волн, и три интерференционных фильтра фирмы Edmund Optics: 337 nm CWL, 10 nm FWHM; 390 nm CWL, 10 nm FWHM; 430 nm CWL,

10 nm FWHM. Спектрометр имеет систему автоматической регулировки усиления, позволяющую проводить измерения в широком диапазоне интенсивностей (от темной безлунной ночи до дневного света).

Блок цифровой обработки данных телескопа и спектрометра основана на системе на кристалле Xilinx Zynq XC7Z030. Этот чип включает в себя как высокоскоростную логическую часть (ПЛИС), так и процессорную систему. Это позволяет разработать высокоскоростную систему обработки данных и реализовать различные алгоритмы запуска. Использование памяти DDR объемом 1 Гбайт обеспечивает непрерывный захват данных по каналу Ethernet на внешний ПК с высокой скоростью передачи данных.

Второй (PAIP-L) изготовлен и установлен на полигоне «Ловозеро» ПГИ в 2023 году.

Общий вид модели приведен на рис. 1.40. Две боковые стенки убраны из модели, чтобы была видна внутренняя структура детектора. Синим цветом показаны линзы оптической системы.

Оптическая система состоит из двух линз Френеля диаметром 25 см и обеспечивает требуемое увеличение чувствительности телескопа, для компенсации ослабления сигнала из-за прохождения большего расстояния, относительно «Верхнетуломской». Данная оптическая схема обеспечивает фокусировку сигнала от удаленного источника в изображение размером не более одного пикселя во всем поле зрения.

В фокальной плоскости находятся три модуля по 4 МАФЭУ (256 каналов регистрации). Модули расположены таким образом, что каждый просматривает свою треть атмосферы над «Верхнетуломской», обеспечивая разрешение по высоте от 1,5 км у поверхности Земли и до 3 км на высоте 120 км.

Фотосенсором детектора являются МАФЭУ R11265-103-M64 производства фирмы Hamamatsu. Данный МАФЭУ имеет бищелочной фотокатод с квантовой эффективностью порядка 35 % в интересующей ближней УФ-области спектра. Размер отдельного пикселя 2,88 × 2,88 мм, максимум чувствительной площади всего

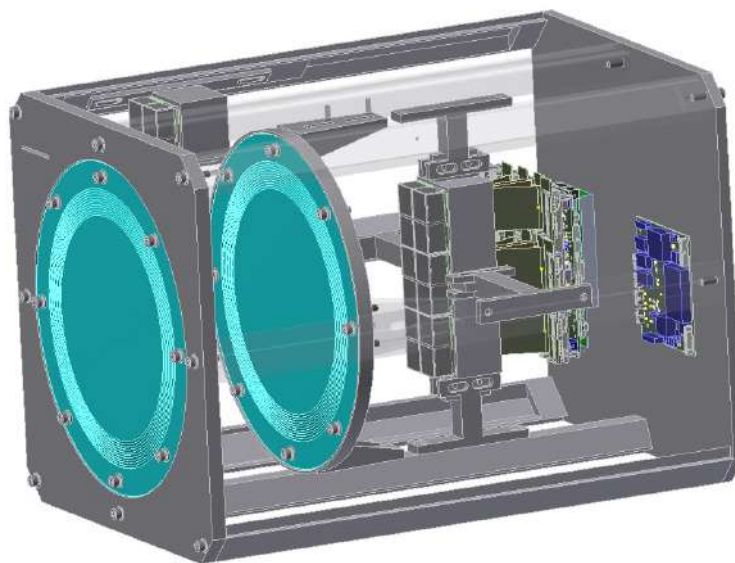


Рис. 1.40: 3D модель широкоугольного изображающего фотометра PIAP-L.

МАФЭУ примерно $23,04 \times 23,04$ мм. МАФЭУ имеет 12-ти ступенчатую диодную систему, обеспечивающую коэффициент усиления ФЭУ 10^6 при напряжении питания 900 В. Время нарастания импульса на аноде порядка 1 нс, кросс-ток отдельных пикселей составляет не более 1 %.

Основным электронным элементом модуля по 4 МАФЭУ является плата формирования высокого напряжения, поскольку она обеспечивает стабильное и постоянное распределение потенциалов на диодной системе всех 4-х МАФЭУ.

При традиционном подходе используется резистивный делитель, который имеет достаточно большое энергопотребление. Для уменьшения энергопотребления системы высоковольтного питания МАФЭУ был заменен резистивный делитель на схему Кокрофта-Уолтона (умножитель напряжения на диодах). Такой подход проработан и успешно применен как в ряде наземных экспериментов, так и в космических экспериментах коллаборации JEM-EUSO [76–78].

Еще один детектирующий модуль расположен отдельно от фотоприемника и предназначен для спектральных измерений. Оптическая система спектрометра представляет собой щель, расположенную горизонтально в передней стенке детектора. Высота щели 3 мм, что

соответствует размеру пикселя фотоприемника. Это позволяет получить разрешение по высоте соответствующее полю зрения одного пикселя. Перед фотоприемником вертикально расположены светофильтры, которые обеспечивают спектральные измерения для каждой высоты в отдельности. Установлены фильтры на линии молекулярного азота 337 нм, 391 нм, 430 нм и широкополосный УФС-1.

1.8. Выводы по главе 1

1. Разработан метод исследования пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) на основе мониторинга на космических аппаратах с использованием широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением ~ 1 мкс.
2. Разработана многофункциональная научная аппаратура, сочетающая в себе широкое поле зрения, высокое временное разрешение, высокую чувствительность и глобальный охват наблюдениями всего Земного шара, которая позволяет эффективно исследовать геофизические, космофизические и астрофизические явления по флуоресцентному свечению атмосферы.
3. Предложена и реализована методика полетной калибровки матрицы фотоэлектронных умножителей, основанная на вычислении статистических характеристик цифровых осциллограмм событий со стационарным уровнем сигнала, которая позволяет проводить контроль чувствительности и калибровку каналов фотоприемника в отсутствие калибровочного сигнала непосредственно в ходе эксперимента.
4. Разработана концепция и структура научной аппаратуры «КЛПВЭ» для регистрации космических лучей предельно высоких энергий. Проведено моделирование аппаратуры и расчет времени экспозиции, статистики регистрируемых событий.
5. Разработана и создана система матричных фотометров (PAIPS)

для исследования тонкой пространственно-временной структуры полярных сияний.

Глава 2. Квазистационарное свечение атмосферы в ближнем УФ-диапазоне¹

2.1. Введение

Излучение атмосферы Земли, в том числе ближнего УФ-диапазона (300–400 нм), является важным проявлением различных процессов, происходящих в атмосфере. Это как внутренние процессы, связанные с перераспределением электрических зарядов (грозы) или с антропогенным воздействием, так и результат внешних факторов, воздействующих на атмосферу Земли – проникновение энергичного ионизирующего излучения, космических лучей в широком диапазоне энергий, прохождение метеоров и т.д. Структура излучения, его временные вариации позволяют исследовать не только механизмы происходящих процессов, но и источники их происхождения.

Излучение ночной атмосферы Земли можно условно разделить на два типа: квазистационарное и транзиентное. Первое – имеет характерное время существования протяженной области излучения в течение минут, часов и более. В течение этого длительного времени может изменяться интенсивность, морфология свечения, но в течение всего времени излучения источник существует как единое целое. Пример такого свечения – авроральный овал. Транзиентное излучение – вспышки длительностью не более 1 с, которые локализованы в пространстве и времени: молниевые разряды, высокоатмосферные транзиентные явления. В ходе наблюдений с борта ИСЗ возможно проведение измерений по всему Земному шару,

¹Глава 2 написана на основе следующих работ из списка публикаций автора по теме диссертации: А4, А35, А45.

что позволяет исследовать глобальные распределения интенсивности и частоты событий, вариаций свечения.

Основным источником квазистационарного УФ-свечения ночной атмосферы является рассеянное излучение Луны и звезд, на порядок – два более интенсивное, чем собственное свечение атмосферы вызванное внутренними и квазистационарными околоземными процессами.

Исследования квазистационарного излучение атмосферы проводились в различных космических экспериментах. Одними из первых миссий, направленных на изучение атмосферного УФ-излучения, были советские спутники серии «КОСМОС». На борту спутника «КОСМОС-45» проводились измерения свечения ночного неба и рассеянного солнечного ультрафиолетового излучения (спутник запущен в 1964 г.).

Для регистрации рассеянного УФ-излучения использовался спектрофотометр, который включался только на дневной стороне, а свечение ночного неба измерялось калориметром. Регистрация ночного излучения производилась сразу в нескольких диапазонах длин волн с помощью вращающегося перед фотоэлектронным умножителем диска со светофильтрами. Обрабатывались лишь те результаты эксперимента, которые были получены в безлунные ночи, вследствие узкого динамического диапазона детектора. По той же причине невозможно было получить сведения об излучении от искусственных источников (свет городов), так что основные данные были получены в безлунные ночи в юго-западной части Тихого океана и над Индийским океаном. В спектральном канале, имеющим на входе фильтр УФС-1, 250–400 нм, была впервые измерена средняя интенсивность излучения в ближнем УФ-диапазоне в безлунную ночь, которая составила 400 Р ($\sim 3,2 \cdot 10^7$ фотон/см² с ср).

В эксперименте на спутнике «Космос-215» измерения проводились в диапазоне длин волн 122,5–135,0 нм и впервые наблюдалось приэкваториальное свечение, расположенное по обе стороны от геомагнитного экватора со средним расстоянием максимума светимости от него $\sim 12^\circ$.

В 1975 году был запущен спутник TAIYO с двумя фотометрами среднего УФ-излучения и четырьмя датчиками вакуумного УФ. УФ-фотометры были сделаны на основе фотоумножителей и предназначались для измерения глобального распределения атмосферного альbedo солнечного излучения на длинах волн 255 нм и 290 нм (т.е. для измерений на дневной стороне орбиты) [79].

С 2002 года на борту спутника TIMED работает прибор GUVI (Global Ultraviolet Imager). Это ультрафиолетовый спектрометр пространственного сканирования, дающий карту свечения атмосферы в пяти интервалах длин волн (121,6 нм, 130,4 нм, 135,6 нм, 140 – 150 нм и 165 – 180 нм) [80].

Пример измерений прибора за одни сутки представлен на рис. 2.1. Обращают на себя внимание две области повышенного свечения. Первая – область полярных сияний на высоких широтах. Вторая – свечение с максимумом на широтах $\pm 30^\circ$, повторяющее по форме геомагнитный экватор. Это свечение значительно более слабое, нежели в полярных областях, но заметно выше, чем в других районах. При этом оно носит стабильный характер, наблюдается практически каждый день с почти неизменной формой и интенсивностью. Свечение наблюдается на длине волны 135,6 нм, возникает в результате излучательной рекомбинации в основном атомарных ионов кислорода и представляет собой т.н. УФ-арки экваториальной ионосферной аномалии (EIA, Equatorial Ionospheric Anomaly). Яркость излучения изменяется в соответствии с электронной плотностью и концентрацией ионов кислорода, достигая максимума в F-слое ионосферы на высотах ~ 300 км. Поскольку в этой области эти величины примерно равны, интенсивность УФ-излучения пропорциональна квадрату электронной плотности. Во время геомагнитно-спокойного периода УФ-излучение EIA на длине волны 135,6 нм слабое (~ 10 Р) и достигает максимума на геомагнитных широтах $\sim 10\text{--}20^\circ$. На больших длинах волн ночное УФ-свечение в области EIA еще слабее [81].

Наиболее яркое УФ-излучение в тысячи рэлей наблюдается в широком диапазоне длин волн в высокоширотной области высыпаний авроральных частиц (например, [80,83]). Основным источником высыпания электронов в высоких широтах является суббуревая активность. УФ-

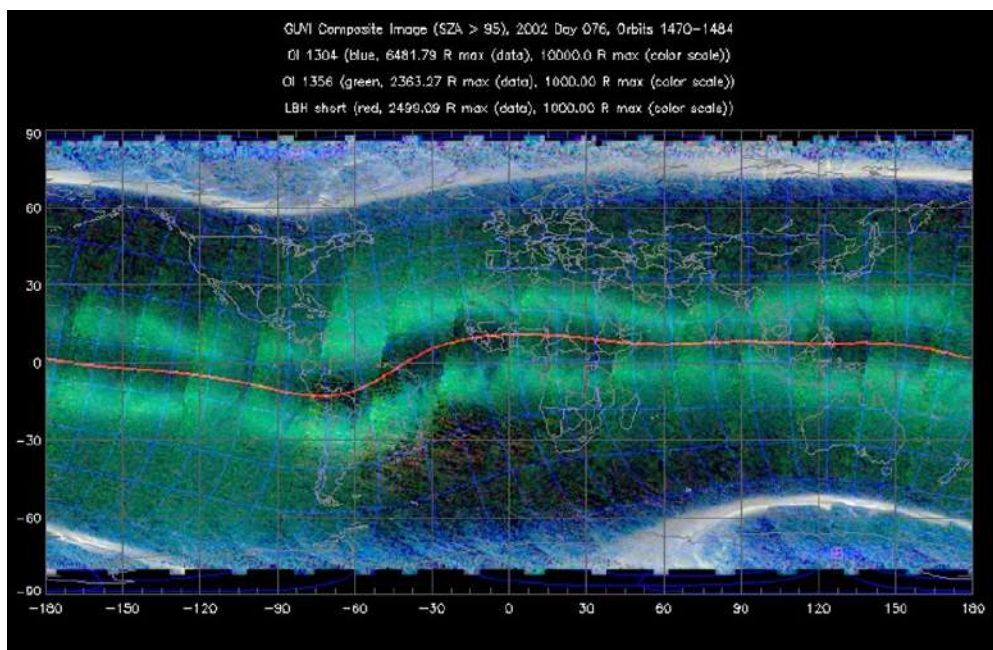


Рис. 2.1: Пример результатов измерения детектором GUVI. Синим цветом показано свечение 130,4 нм, зелёным – 135,6 нм, красным – 140–150 нм и 165–180 нм. [82].

спектр полярных сияний в основном представлен яркими линиями свечения ионизированных азота и кислорода с дифференциальными интенсивностями в несколько десятков $\text{R}/\text{нм}$ [84]. Ионизация и возбуждение на высотах более 80 км производятся энергичными электронами (с энергией в несколько кэВ), высыпаящимися из магнитосферы в верхние слои атмосферы, и низкоэнергетическими вторичными электронами (с энергией в несколько эВ), которые образуются в ходе ионизации.

Ночное УФ-свечение мезосферы было измерено в ряде наземных, ракетных и спутниковых экспериментов. В средних широтах суммарные интегральные интенсивности в полосах Герцберга I и Чемберлена оцениваются в 300–350 R и 120–150 R соответственно [85, 86]. Интегральное свечение в диапазоне 260–390 нм (полосы Герцберга I и Чемберлена) составляет нескольких сотен рэлей [87].

Интенсивность ночного УФ-свечения меняется в зависимости от широты [88]. Для дальнего УФ-диапазона (110–190 нм) широтный профиль ночного свечения хорошо изучен в спутниковых экспериментах. Как было показано выше, существуют две области увеличения интенсивности

излучения: EIA с интенсивностью в десятки рэлей и очень широкая и яркая высокоширотная область полярных сияний с интенсивностью в сотни и тысячи рэлей. Широтный профиль УФ-излучения в диапазоне 300–400 нм пока мало изучен, хотя имеет важное прикладное значение для экспериментов, нацеленных на регистрацию ШАЛ [21, 23, 24].

2.2. Результаты измерения квазистационарного излучения на спутниках МГУ

В ходе измерений на спутниках МГУ были получены первые результаты по исследованию структуры и вариаций интенсивности свечения атмосферы в ближнем УФ-диапазоне.

На рис. 2.2 приведена карта свечения, полученная в ходе измерений на спутнике «Университетский-Татьяна-2» в безлунные ночи за период с 20 октября 2009 года по 16 января 2010 года. Видно, что области максимальной интенсивности свечения соответствуют положению континентов и густонаселенных районов. Авроральное свечение в таком представлении видно не очень хорошо, т.к. часто попадает на область терминатора. Выделяется область в районе Южно-Атлантической аномалии – это свечение стеклянных частей фотоприемника при нахождении в области повышенных потоков заряженных частиц. Области с минимальной интенсивностью расположены над океанами и пустынной частью Африки. Минимальная интенсивность составила $\sim 3 \cdot 10^7$ фотон/см² ср с. Интенсивность свечения над континентами составляет $\sim 2 \cdot 10^8$ фотон/см² ср с. Во время полнолуния увеличивается до 10^9 фотон/см² ср с. Аналогичная картина наблюдается и в остальных экспериментах, например, карта свечения, полученная детектором ТУС, приведена в главе 3.

Широтная структура свечения была исследована по данным спутника «Университетский-Татьяна» и проведена попытка найти взаимосвязь между областями повышения свечения в ближнем УФ-диапазоне с повышением потоков высыпающихся частиц [89].

Одновременные наблюдения УФ-свечения неба и потоков электронов

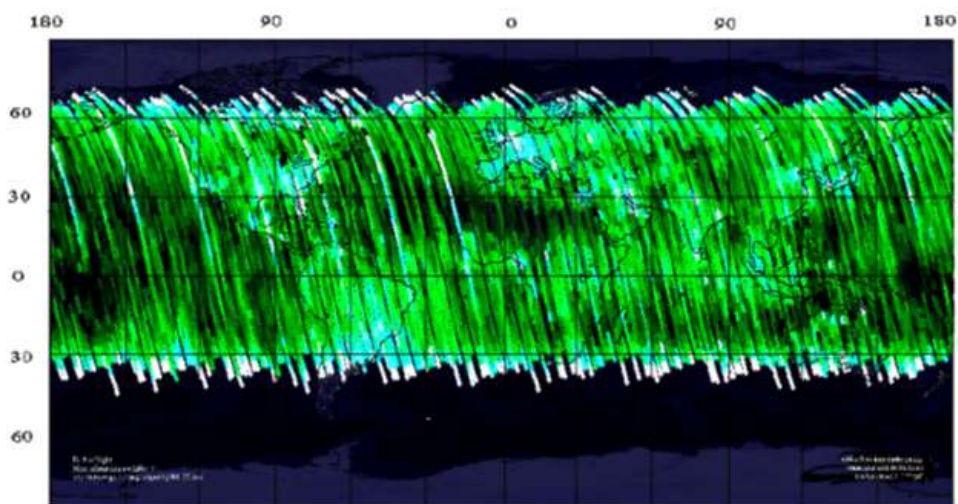


Рис. 2.2: Карта свечения по данным детектора УФ-излучения на спутнике «Университетский-Татьяна-2».

2 июля и 29 декабря 2005 г. представлены на рис. 2.3. Видны пики в интенсивности УФ-излучения на больших значениях L-оболочек ($L > 8$), которые соответствуют области авроральных высыпаний. Это авроральное УФ-излучение создается в основном электронами низкой энергии (от сотен эВ до нескольких десятков кэВ). Детектор частиц на борту спутника «Университетский-Татьяна» обладал относительно высоким порогом регистрации (более 70 кэВ) и не мог измерять популяцию низкоэнергетических электронов. Однако расположение этого свечения на траектории спутника, выраженной в единицах L, позволяет однозначно судить о его происхождении.

На более низких L-оболочках ($L \sim 4$) виден второй максимум УФ-излучения, значительно менее интенсивный ($I_{UV} \sim 10^8$ фотонов/см² ср с), чем авроральный максимум. Этот пик можно объяснить высыпанием квазизахваченных электронов с энергией от нескольких до десятков кэВ из внешнего радиационного пояса. Отметим, что максимум потоков электронов наблюдается на более низких широтах по сравнению с пиком УФ-излучения и это связано с геометрией наблюдения: детектор УФ-излучения ориентирован в надир. Высыпающиеся электроны, двигаясь вдоль силовых линий магнитного поля, могут воздействовать на атмосферу на высоте 100 км и создавать УФ-излучение на более высоких широтах, чем те, которые наблюдаются при наблюдении потока электронов на высоте

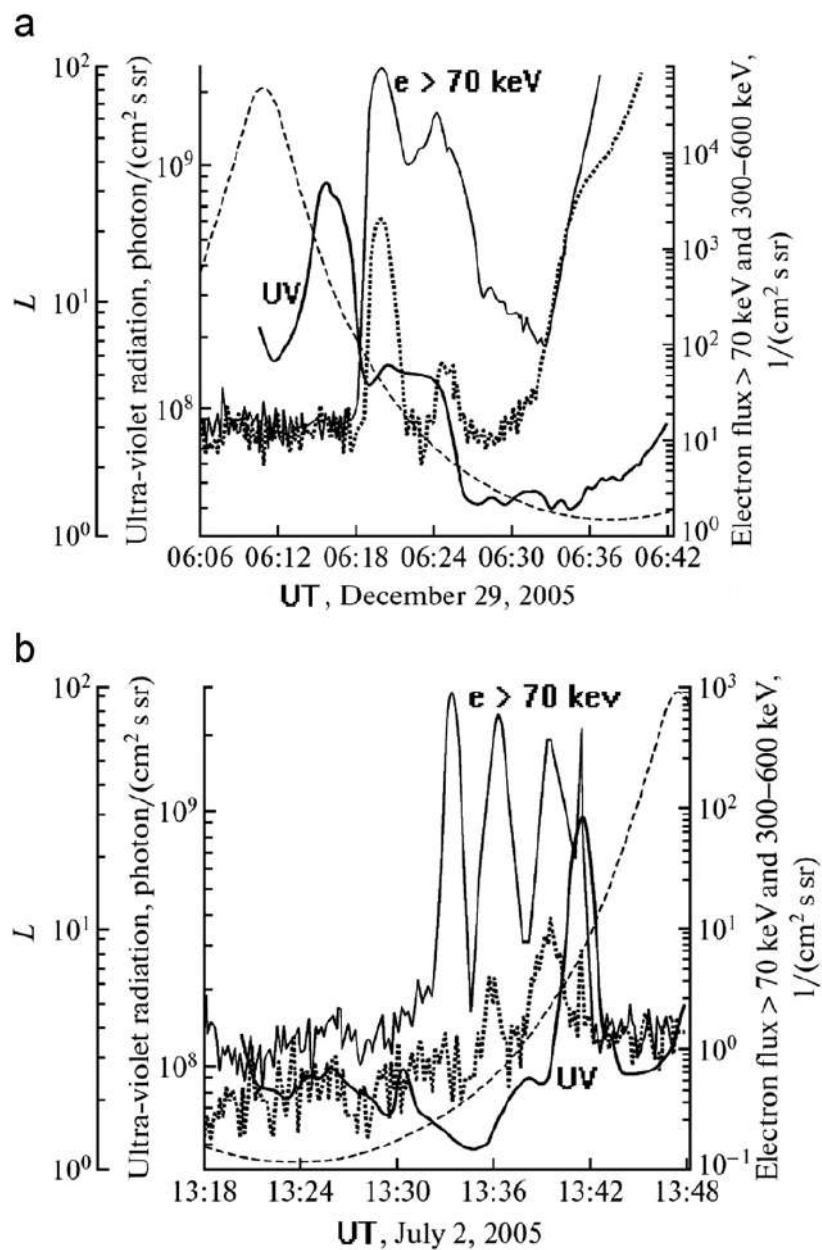


Рис. 2.3: Интенсивность УФ-излучения (жирная линия) и потоков электронов с энергией >70 кэВ (тонкая линия) и 300–600 кэВ (пунктир), зарегистрированных спутником «Университетский-Татьяна» в безлунную ночь: (а) 29 декабря 2005 г. и (б) 2 июля 2005 г. L-оболочка изображена пунктирной кривой.

спутника (950 км). Кроме того, азимутальный дрейф квазизахваченных электронов вдоль дрейфовых оболочек на восток приводит к продольному смещению соответствующего источника УФ-излучения на восток.

На рис. 2.3а видно, что при входе спутника в область ЮАА в 06:30 UT происходит резкое увеличение темпа счета в детекторе электронов, но существенного увеличения интенсивности УФ-излучения нет. Это ожидаемо, поскольку большая часть электронов в ЮАА захвачена и, следовательно, лишь немногие из них высыпаются в атмосферу. На низких широтах и в экваториальной области ($L < 1,5$) виден рост УФ-излучения до $I_{UV} \sim 10^8$ фотон/см² ср с, как показано на рис. 2.3а и 2.3б. Наименьшее значение интенсивности УФ-излучения ($4-5 \cdot 10^7$ фотон/см² ср с) наблюдается на средних широтах в диапазоне L от 1,5 до 2. Не наблюдается монотонного роста интенсивности ночного УФ-свечения от экватора к высоким широтам. Наблюдаемые пики указывают на существенное локальное усиление УФ-излучения. Из-за быстрого движения спутника по орбите невозможно четко различить пространственный этот эффект или временной. Однако дальнейший статистический анализ позволяет выявить упорядоченную пространственную (широтную) картину ночного УФ-свечения.

Были отобраны все пролеты в безлунные ночи в январе-декабре 2005 г. Большая часть повышений УФ-излучения наблюдалась над океаном и, следовательно, маловероятно, что связано с антропогенной деятельностью, грозами или лесными пожарами. Некоторая асимметрия север-юг в повышениях УФ-излучения является искусственным эффектом сбора данных. Около половины измерений выполнено весной, четверть летом и четверть зимой. Важно отметить, что подавляющее большинство наблюдений проводилось в спокойных или слабовозмущенных геомагнитных условиях, характеризующихся индексом K_p менее 3.

Был проведен статистический анализ местоположения наблюдаемых повышений УФ-излучения. Учитывались все последовательные измерения внутри области повышения УФ-сигнала. Длительность повышения отбиралась на уровне половины амплитуды сигнала относительно

ближайшего локального минимума. На рис. 2.4а показано распределение числа измерений с повышением УФ-излучения по геомагнитной широте. Отчетливо видны три широких пика: на низких широтах $< 20^\circ$ градусов, на средних широтах ($30^\circ-40^\circ$) и на высоких широтах $> 60^\circ$. Более подробно структура видна на распределении по L-оболочкам, показанное на рис. 2.4б. Распределение имеет 5 максимумов при L 1,3; 1,8; 2,8, 4 и 5. Эти значения приведены для высоты спутника (950 км). При проецировании положения спутника в атмосферу на высоте 100 км получаются такие значения L: 1,15; 1,6; 3,5; 3,6 и 4,6, соответственно.

Как и ожидалось, наибольшее количество УФ-превышений наблюдается в авроральной области. В низких широтах УФ-излучение наблюдается почти при каждом проходе над областью EIA. УФ-повышения в области средних широт наблюдаются реже.

В дальнейшем, было проведено моделирование распространения электронов в магнитосфере с учетом их энергетических потерь и рассеяния в атмосфере. В качестве программного обеспечения для моделирования использовались стандартные пакеты GEANT4.8.1 и PLANETOCOSMICS2.0. Последний пакет включает модель геомагнитного поля IGRF и модель атмосферы NRLMSISE00. Атмосфера аппроксимируется 115 сферическими однородными слоями воздуха различной плотности. Моделировалось распространение электронов в диапазоне энергий от 70 кэВ до 1 МэВ со спектрами, определенными на основе измерений спутника «Университетский-Татьяна», и начальными местоположениями (L), соответствующими искомым повышениям УФ-излучения. Начальные пичч-угловые распределения полагались гауссовыми, с максимумом в направлении, противоположном магнитному полю, со среднеквадратическим отклонением 45° и обрезанием при 90° .

Используя потери энергии на ионизацию, был произведен расчет выхода флуоресценции в атмосфере за счет высыпавшихся электронов, наблюдаемых в эксперименте. Расчеты проводились с использованием аппроксимационной формулы, предложенной в [90]. Стоит отметить, что данный расчет был предложен для оценки выхода флуоресценции ШАЛ на высотах менее 20 км и было показано, что он слабо зависит от высоты,

наличия водяного пара и пр. условий. Но он может быть использован и для больших высот, с учетом измерения плотности атмосферы.

Такие упрощенные модельные расчеты показали, что в низких и средних широтах ($L < 4$) УФ-излучение, создаваемое ионизацией при высыпании электронов, на несколько порядков меньше интенсивности наблюдаемого УФ-излучения. Это несоответствие не может быть разрешено, даже если принять во внимание дополнительные потоки электронов с меньшими энергиями. Следовательно, должен существовать другой механизм, ответственный за увеличение ночного УФ-свечения в низких и средних широтах.

В дальнейшем, аналогичные исследования были проведены на основе данных спутника «Вернов». Во-первых, было показано, что при значительном освещении Лунным светом амплитуда вариаций фона на порядок превышает измерения во время безлунных ночей. Для примера на рис. 2.5 приведены два измерения в одной и той же области, но слева показан пролет в безлунную ночь, справа во время фазы Луны – 87 %.

Во-вторых, было показано, что на каждом пролете регистрируется свечение в районе аврорального овала, а его характеристики зависят от геомагнитной активности.

На рис. 2.6 показаны примеры измерения интенсивности за четыре различных ночных витка 27.08 и 29.08 (нижняя пара), 19.09 и 21.09 (верхняя пара) 2014 года. Эти дни характеризуются разным уровнем геомагнитной активности, что сказывается на уровне интенсивности УФ-свечения в авроральной области и размерах области свечения:

- 27 августа $AE=1000$ нТ и наблюдается УФ-свечение в районе от -60° до -40° . Интенсивность свечения в максимуме более $2,5 \cdot 10^9$ фотон/см² ср с, а также наблюдается двугорбый вид – два максимума свечения, разнесенные по широтам.
- 29 августа $AE=400$ нТ и наблюдается перемещение авроры на более высокие широты. Интенсивность свечения в максимуме становится меньше $\sim 1,6 \cdot 10^9$ фотон/см² ср с, но двугорбая структура сохраняется.

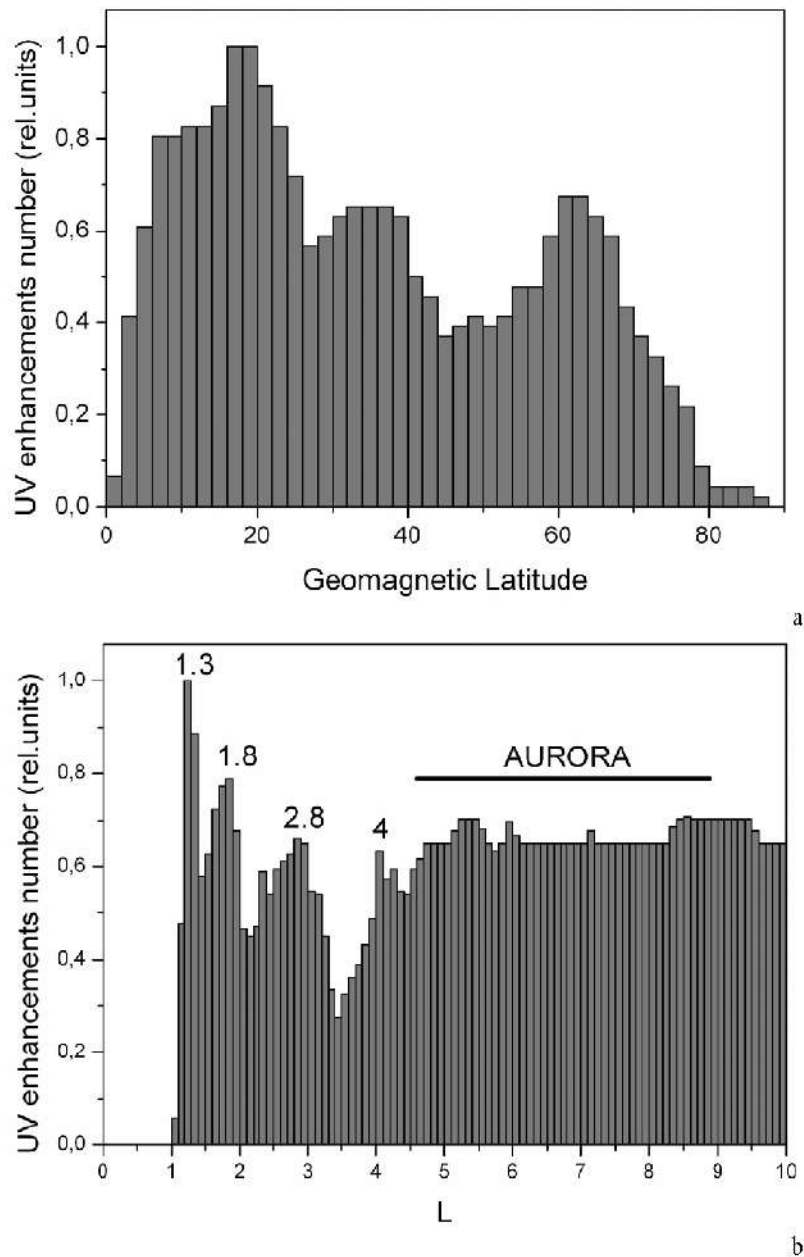


Рис. 2.4: Число измерений повышения УФ-излучения в зависимости от (а) геомагнитной широты и (б) L-оболочки. УФ-повышения в основном локализируются в трех широтных регионах: низких широтах ($<20^\circ$), средних широтах 30° – 40° и авроральной области ($>60^\circ$). Распределение по L-оболочкам демонстрирует более детальную структуру с максимумами при L 1,3, 1,8, 2,8, 4 и >5 .

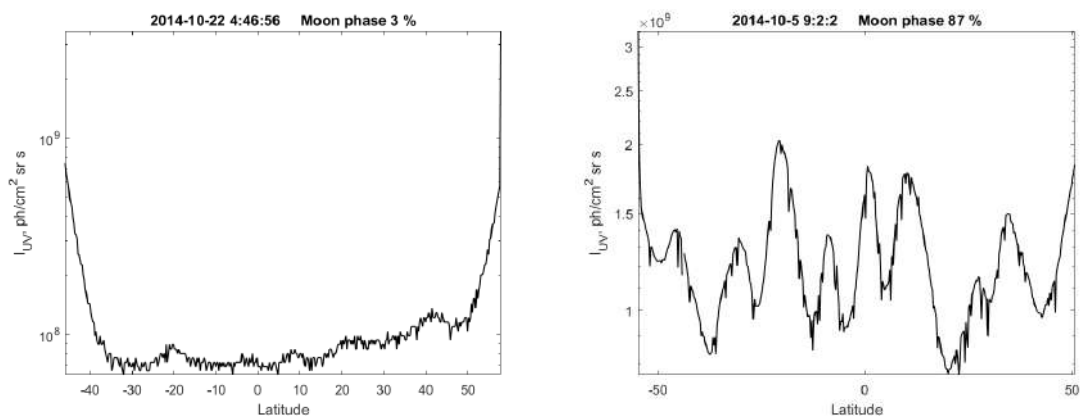


Рис. 2.5: Примеры ночных измерений УФ-свечения на спутнике «Вернов» для разных фаз Луны. Даты измерений и фазы указаны на рисунках.

- 19 сентября АЕ=100 нТ, максимум свечения наблюдается в районе -55° . Интенсивность свечения падает до 10^9 фотон/см² ср с и полностью теряется двугорбая структура.
- 21 сентября АЕ-индекс 0 нТ и аврора практически не наблюдается т.к. находится за границей терминатора.

На основе этих данных можно сделать вывод, что повышение АЕ-индекса больше чем 500 нТ приводят к появлению двугорбой структуры в свечении авроральной области. Также при увеличении этого индекса экваториальная граница авроральной области смещается на более низкие широты и происходит увеличение интенсивности свечения более чем на порядок.

В третьих, был проведен анализ вариации излучения в безлунные ночи, его широтной структуры и сравнение с облачным покровом. Для этого из всей базы данных были отобраны дни с малой фазой Луны и построены профили свечения вдоль траектории космического аппарата. Использовались следующие критерии отбора данных.

1. Рассматривались только даты около новолуния. В эти дни Луна находится на дневной стороне и не освещает атмосферу. В этом случае ожидается, что эффекты, связанные с отражением излучения от облаков, не должны быть видны.
2. Использовались только пролеты над Тихим океаном, чтобы исключить пролеты над континентами. При этом не учитываются

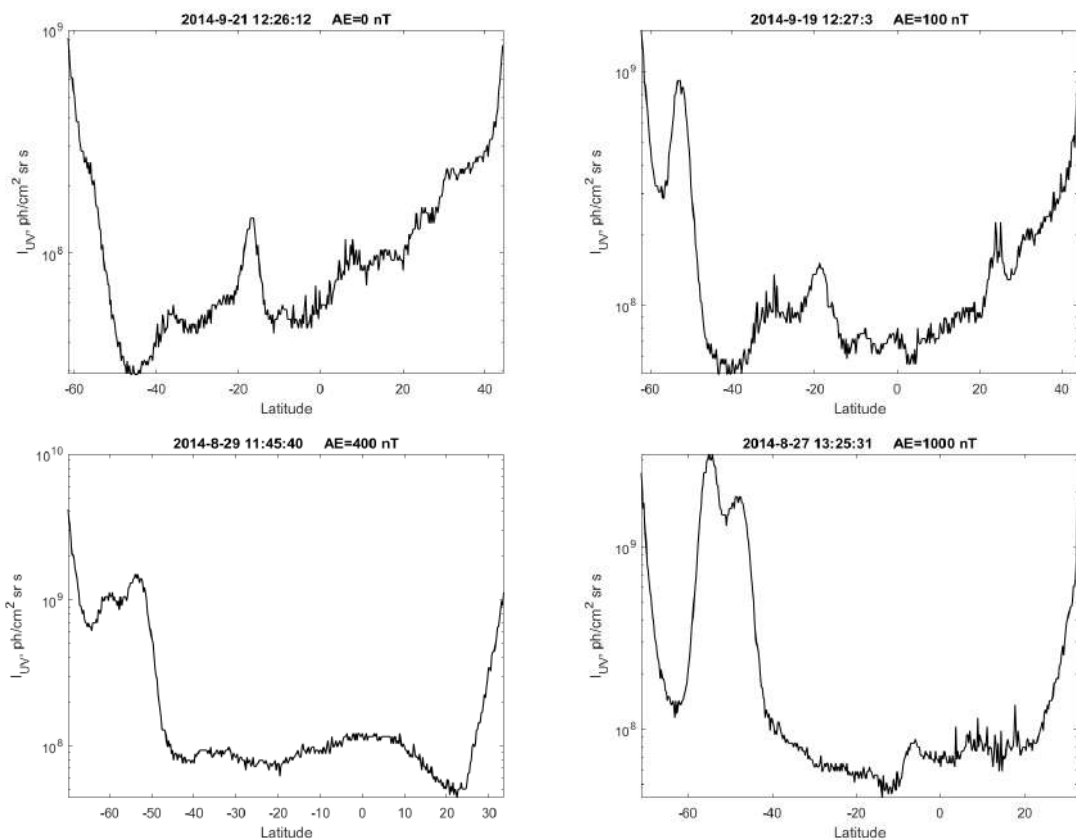


Рис. 2.6: Примеры ночных измерений УФ-свечения на спутнике «Вернов» для разных условий геомагнитной активности. Даты измерений и значения AE-индекса указаны на рисунках.

антропогенное свечение и грозовые активные районы, которые могут образовывать области повышенной УФ-освещенности.

3. Области терминатора не рассматриваются, поскольку увеличение интенсивности УФ вызвано переходом на дневную сторону орбиты.

Всего было отобрано 22 пролета. Для этих измерений наблюдается такая же структурированность по широте, как и для измерений на спутнике «Татьяна». Для верификации причин широтной структуры профили излучения были сопоставлены с картами облачности. Для этого использовались Global Satellite Composite IR images от Space Science and Engineering Center University of Wisconsin-Madison². Примеры сопоставления приведены на рис 2.7. Хорошо видно, что в основном области повышения УФ-излучения совпадают либо с облачным покровом, либо с антропогенными источниками.

Таким образом, анализ интенсивности излучения и ее вариаций показал следующее: области повышенного свечения, даже в отсутствие рассеянного Лунного излучения, связаны с облачным покровом или антропогенной деятельностью. Поскольку глобальные облачные структуры имеют вытянутость вдоль определенных географических долгот, то они могут давать повышенную частоту регистрации избыточного УФ-излучения на определенных широтах.

Возникновение областей повышенного УФ-излучения магнитосферного или ионосферного происхождения в данном случае не наблюдается. Однако взаимосвязь потоков энергичных частиц и слабого свечения атмосферы на средних широтах существует и требует дальнейшего исследования более высокочувствительной аппаратурой, поскольку в некоторых измерениях, наблюдается одновременное увеличение как потоков заряженных частиц, так и УФ-излучения. Пример показан на рис. 2.8. В профиле УФ-свечения видны пики, связанные с прохождением грозовой области, в конце траектории спутник залетает на континент (западное побережье США), в а районе экватора наблюдается подъем интенсивности свечения и одновременно с ним – рост потока электронов в диапазоне энергий 20–200 кэВ.

²<https://www.ssec.wisc.edu/data/composites/mollweide/>

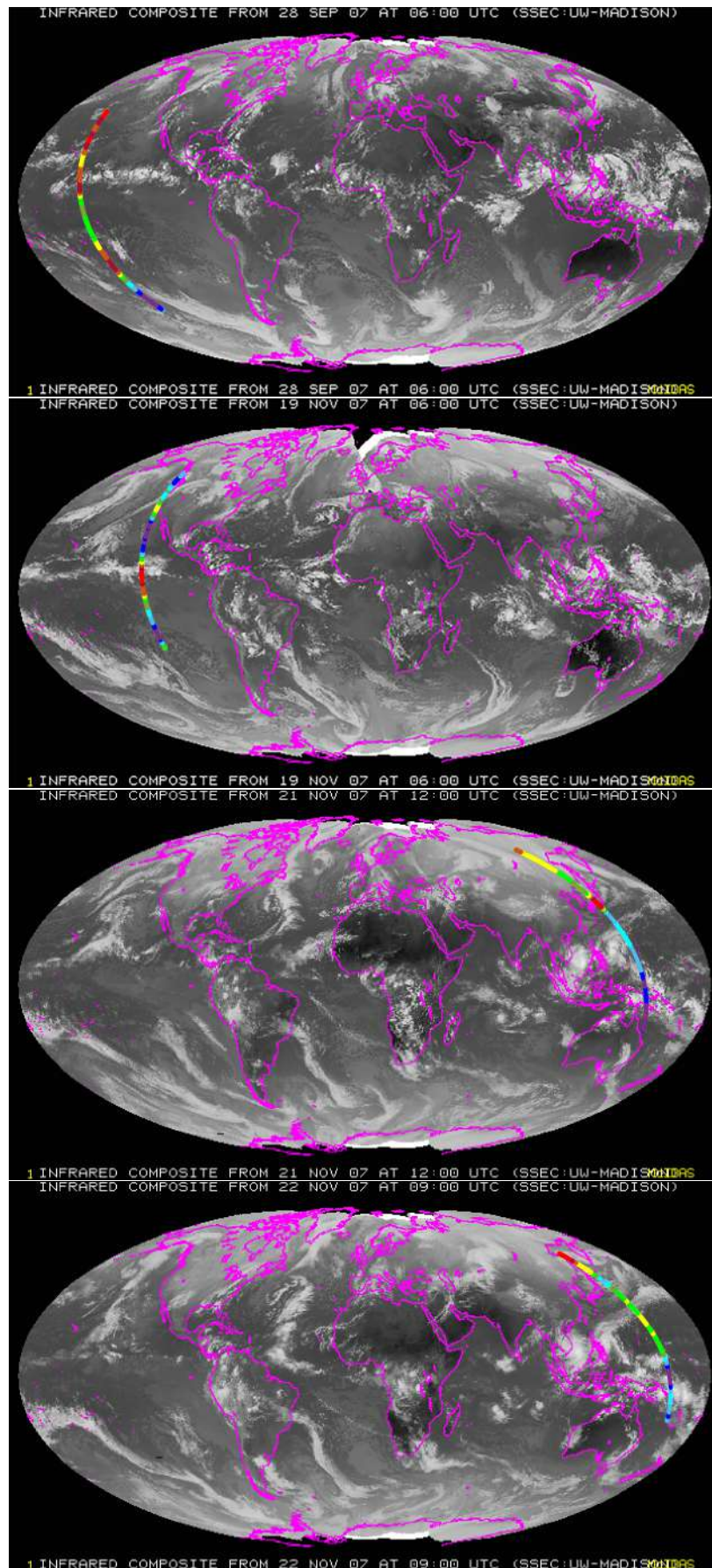


Рис. 2.7: Примеры регистрации вариаций УФ-свечения вдоль траектории движения спутника «Вернов», связанных с облачностью в условиях малой фазы Луны.

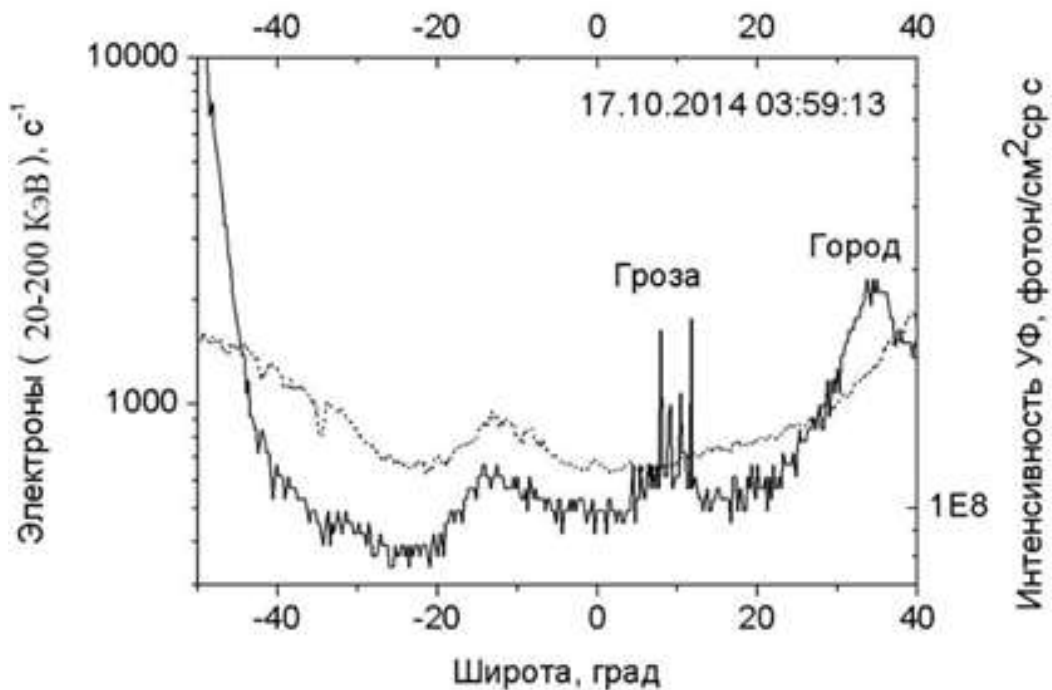


Рис. 2.8: Одновременные измерения потока УФ-излучения (сплошная кривая) и электронов (пунктирная кривая) на спутнике «Вернов».

В дальнейшем, это наблюдение было подтверждено в результате анализа наблюдательных данных детектора «УФ атмосфера» на борту МКС. В частности, показано, что циклонические облачные структуры видны при измерениях в безлунные ночи [91]. Пример измерений показан на рис. 2.9.

Однако взаимосвязь высыпающихся потоков энергичных электронов и свечения атмосферы в ближнем УФ-диапазоне остается открытым. Отдельные наблюдения временной и пространственной структуры измерений УФ-излучения и потоков заряженных частиц демонстрируют хорошее совпадение (см. рис. 2.8) и требуют дальнейших исследований.

2.3. Выводы по главе 2.

Проведены наблюдения глобальной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне и определены следующие особенности:

1. УФ фон над поверхностью океана в 1,5 раза меньше, чем над сушей. Минимальная интенсивность свечения составляет: $\sim 3 \cdot$

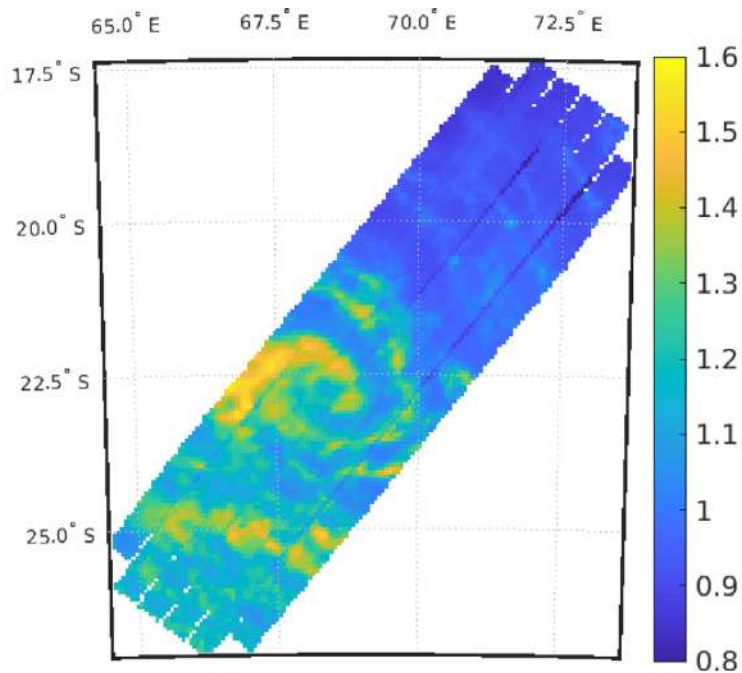


Рис. 2.9: Пример измерения структуры облачного покрова в ближнем УФ-диапазоне во время циклона 21 февраля 2020 г., 22:00 UTC, 1000 км к востоку от острова Маврикий.

10^7 фотон/см² ср с. Максимальная интенсивность свечения на ночной стороне составляет: $\sim 3 \cdot 10^9$ фотон/см² ср с.

2. Наблюдается широтная структуризация УФ-свечения атмосферы, в которую основной вклад дают свечение аврорального овала и масштабные облачные структуры.
3. Наличие максимумов в распределении УФ-излучения по L-оболочкам, а также случаи одновременной регистрации повышенной интенсивности в УФ-свечении и потоках электронов оставляют открытым вопрос о взаимосвязи выпадающих потоков энергичных электронов и свечения атмосферы в ближнем УФ-диапазоне.
4. Повышение AE-индекса больше чем 500 nT приводит к появлению двугорбой структуры свечения авроральной области, при этом экваториальная граница области свечения смещается на более низкие широты и происходит увеличение интенсивности более чем на порядок.

Глава 3. Поиск космических лучей предельно высоких энергий¹

3.1. Введение

Космические лучи предельно высоких энергии – самые энергичные частицы, когда-либо наблюдавшиеся. Их обнаруженные энергии варьируются от $E > 10^{17}$ эВ до энергий, превышающих $E > 10^{20}$ эВ. Прошло уже более 60 лет с момента первой регистрации в 1962 году таких частиц [92]. И несмотря на заметные успехи как в экспериментальном, так и в теоретическом плане, к настоящему времени так и не удалось с уверенностью установить, что это за частицы (протоны, ядра более тяжёлых элементов или какие-либо экзотические частицы), в каких астрофизических источниках и за счёт каких механизмов они ускоряются до столь колоссальных энергий. Основной экспериментальной проблемой является их крайне низкий поток, составляющий лишь несколько частиц на квадратный километр за 100 лет. Это требует сооружения дорогостоящих установок с гигантской площадью покрытия детекторами, что необходимо для достижения большой экспозиции наземного эксперимента и, как следствие, получения достаточного объёма экспериментальных данных.

Два самых крупных текущих эксперимента, посвященных наблюдению КЛ ПВЭ – это обсерватория Пьера Оже (РАО) в Аргентине и Telescope Array (ТА) в США. КЛ ПВЭ можно наблюдать лишь косвенно через обнаружение продуктов их взаимодействия с атмосферой Земли. Частица высокой энергии, взаимодействующая с ядром атмосферы, порождает адронные и электромагнитные каскады частиц, которые

¹Глава 3 написана на основе следующих работ из списка публикаций автора по теме диссертации: A14-A17, A23, A24, A28, A45, A51.

вместе называются широким атмосферным ливнем (ШАЛ). И в РАО, и в ТА обнаружение ШАЛ осуществляется путем непосредственного обнаружения частиц, достигающих поверхности земли, и наблюдения за флуоресцентным излучением, создаваемым в атмосфере частицами ШАЛ.

Сооружение РАО началось в 2000 г., с 2005 г. установка начала набор данных, а с 2008 г. эксперимент осуществляется в полном объёме. Обсерватория состоит из 1660 водных черенковских детекторов объёмом 12 м^3 каждый, расположенных на расстоянии 1,5 км друг от друга на площади более 3000 км^2 , и 24 флуоресцентных телескопов, объединённых в 4 станции, находящиеся на границах территории. За 14 лет непрерывной работы Auger удалось зарегистрировать десятки тысяч КЛ с энергией выше 3 ЭэВ, однако лишь около 300 из них имели энергию выше 50 ЭэВ.

Вторым по размерам экспериментом, работающим в области КЛ ПВЭ, является Telescope Array (ТА), расположенный в штате Юта, США. Аналогично Auger, ТА также использует как поверхностные детекторы, так и флуоресцентные телескопы, но в качестве поверхностных детекторов используются двухслойные сцинтилляторы площадью 3 м^2 . В состав установки в настоящее время входит 507 детекторов, расположенных на квадратной сетке с шагом 1,2 км, покрывающей площадь примерно 680 км^2 , т.е. менее четверти площади Auger. По углам установки размещены три станции, состоящие из 38 флуоресцентных телескопов. Эксперимент работает с марта 2008 г.

За всё время работы Auger и ТА зарегистрировали в общей сложности лишь около 30 КЛ с энергией порядка 100 ЭэВ. Поэтому, вопрос создания детектора с большой площадью наблюдений и способного регистрировать на порядки больше событий остается актуальным.

Важной характеристикой потока космических лучей является энергетический спектр, а именно, зависимость потока КЛ от их энергии. Вскоре после первой регистрации КЛ с энергией более 50 ЭэВ, Грейзен [93] и — независимо — Зацепин и Кузьмин [94] показали, что при таких энергиях поток протонов должен значительно подавляться в результате взаимодействия с фотонами реликтового микроволнового излучения. Этот эффект, предсказанный теоретически, получил название

«обрезания ГЗК» (GZK cut-off). Ситуация с наличием обрезания ГЗК в спектре КЛ оставалась неясной на протяжении многих лет, поскольку разные эксперименты давали противоречащие друг другу результаты. В частности, в спектре, полученном в эксперименте Akeno Giant Air Shower Array (AGASA), который работал в Японии с 1990 по 2004 гг., этот эффект не наблюдался вообще [95], что давало почву для многочисленных экзотических моделей КЛ ПВЭ. Загадка разрешилась лишь в 2007–2008 гг., когда резкое сокращение («обрезание») потока КЛ при энергиях 60 ЭэВ было зарегистрировано экспериментом High Resolution Fly’s Eye (HiRes) — предшественником ТА — на уровне статистической значимости более 5σ [96, 97]. Вскоре это открытие было подтверждено коллаборацией РАО [98], и позже — Telescope Array [99].

За время, прошедшее с момента этого открытия, спектр КЛ ПВЭ был измерен с беспрецедентной статистикой, что, однако, не сняло некоторые важнейшие вопросы. Последние результаты, опубликованные коллаборациями РАО и ТА, показаны на рис. 3.1 [19]. Из рисунка хорошо видно, что спектры, полученные в обоих экспериментах, аналогичны друг другу при энергиях выше 30 ПэВ: оба спектра демонстрируют т.н. «лодыжку» (ankle) в районе 5 ЭэВ и резкое укрупнение спектра при энергиях, предсказанных Грейзенем, Зацепиным и Кузьминым. Однако укрупнение спектра по данным РАО начинается при энергии 40 ЭэВ, а по данным ТА — при 60 ЭэВ; при этом спектр РАО становится настолько круче, чем спектр ТА, что поток КЛ ПВЭ по данным ТА примерно в 4 раза превышает поток, регистрируемый на установке РАО. Это очень важное различие, и его не удаётся сгладить путём приведения к единой энергетической шкале и учёта всех неопределённостей [19]. Изучение возможной зависимости спектра от области наблюдения показало, что спектр РАО остаётся практически неизменным, в то время как спектр ТА сильно зависит от склонения. При этом в общей области наблюдения он приближается к спектру РАО, но всё равно заметно от него отличается.

Таким образом, *в настоящее время сохраняются важные различия по энергетическому спектру КЛ в области ПВЭ между двумя основными экспериментами — РАО и ТА.* Эти различия в спектрах, а также

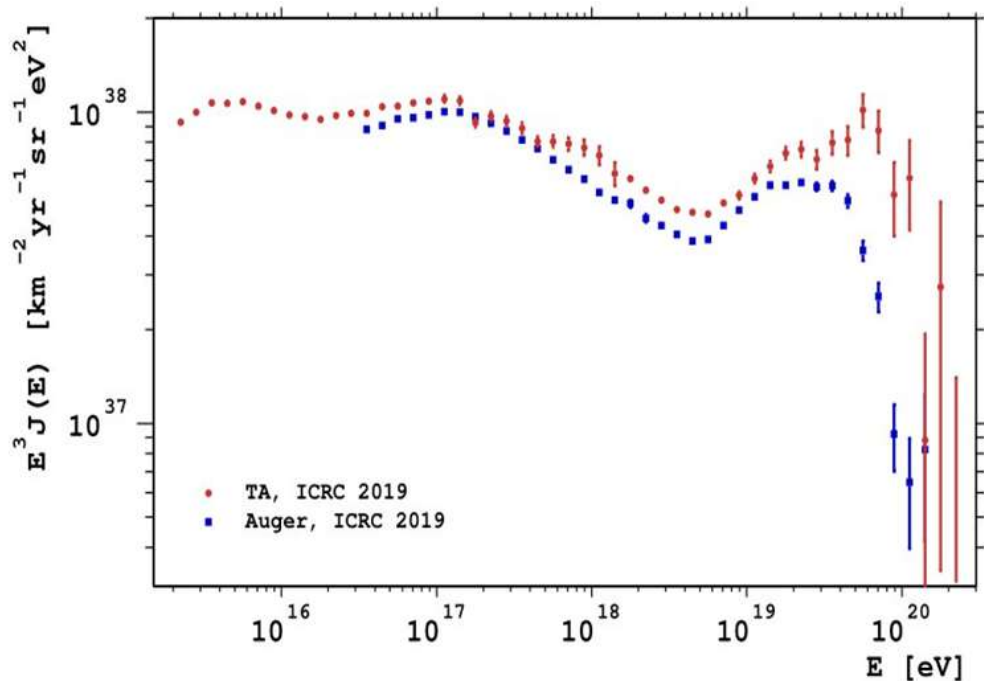


Рис. 3.1: Энергетический спектр КЛ ПВЭ по данным ТА и РАО [19].

некоторые результаты, относящиеся к химическому составу КЛ ПВЭ (см. ниже), не позволяют в настоящее время сделать заключение о том, является ли наблюдаемое укрупнение спектра в районе 50 ЭэВ следствием эффекта ГЗК, достижением максимально возможной энергии ускорения в источниках или комбинацией обоих факторов. Этот фундаментальный вопрос остаётся открытым. *Орбитальный детектор, который достаточно точно измерит энергетический спектр КЛ ПВЭ по всей небесной сфере, может сыграть принципиальную роль в разрешении противоречия между данными наземных установок и получении ответа на принципиальный вопрос о природе укрупнения спектра.*

Другим важным аспектом в поиске источников КЛ ПВЭ является анализ направлений их прихода. Если КЛ ПВЭ представляют собой лёгкие ядра (например, протоны или ядра гелия, как следует из результатов эксперимента ТА), то при столь высоких энергиях они должны незначительно отклоняться в галактическом и межгалактических магнитных полях, особенно, если источники находятся на сравнительно небольшом расстоянии от Земли, и, благодаря этому, указывать направление на свой источник.

Анизотропия КЛ ПВЭ также является косвенным тестом их

массового состава, поскольку лёгкие ядра в меньшей степени отклоняются магнитными полями в процессе распространения от источников, чем более тяжёлые ядра (например, ядра азота, кремния или железа). Таким образом, в случае обнаружения корреляции направлений прихода КЛ ПВЭ с положением возможных источников или хотя бы с распределением материи в локальной части Вселенной, можно будет с высокой долей уверенности говорить о лёгком составе таких КЛ. Отсутствие какой-либо корреляции будет означать тяжёлый состав либо наличие сильных магнитных полей, но величина последних ограничена, по данным других исследований.

В 2014 году коллаборацией TA был опубликован результат обнаружения т.н. «горячего пятна» (hotspot) с избыточным потоком КЛ с энергией более 57 ЭэВ [100]. На момент публикации «горячее пятно» представляло собой область радиусом 20° . Внутри этой области за 5 лет работы установки было зарегистрировано 19 событий, при ожидаемом числе 4.49. Дальнейшие наблюдения подтвердили существование «горячего пятна», но не привели к увеличению статистической значимости отклонения от ожидаемого изотропного распределения. Последний, опубликованный в 2023 г., результат представлен на рис. 3.2. Показана априорная статистическая значимость отклонений потока КЛ от ожидаемого изотропного распределения за 15 лет работы установки.

В данных РАО наблюдается некоторый избыток событий с энергией более 58 ЭэВ в направлении на галактику Cen A (т.н. «тёплое пятно»). По результатам, опубликованным в 2019 г., избыток потока КЛ с энергией выше 38 ЭэВ из обширной области с центром, близким к положению Cen A, был подтверждён на уровне почти 4 стандартных отклонений [102].

В силу того, что направление на радиогалактику Cen A доступно только наблюдениям РАО, а область скопления галактик Virgo — только TA, эти два эксперимента не могут осуществить независимую проверку результатов друг друга. Орбитальный эксперимент, равномерному наблюдению которого доступна вся небесная сфера, может подтвердить или опровергнуть сразу оба этих результата на высоком уровне статистической значимости [103]. Можно также ожидать, что орбитальный

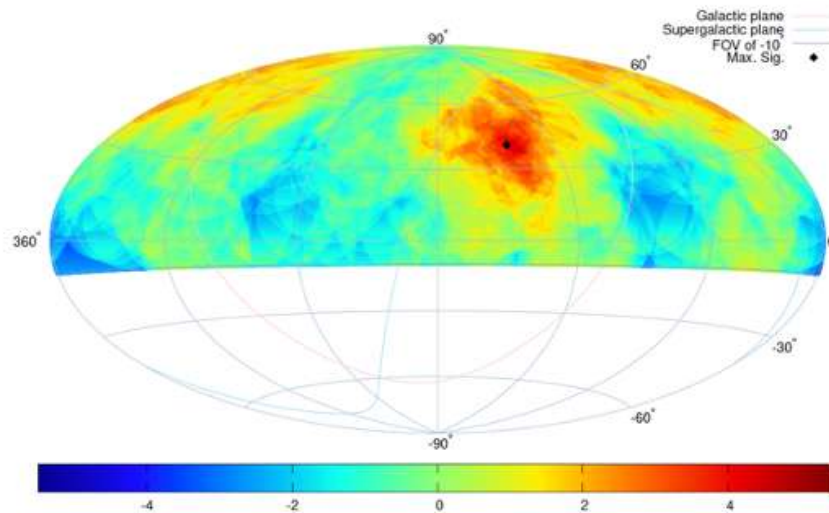


Рис. 3.2: Карта неба в экваториальных координатах в проекции Хаммера с «горячим пятном» ТА. Цвет представляет значимость Li-Ma с использованием кругового углового окна радиусом 25° в экваториальных координатах для 15-ти лет данных поверхностных детекторов с $E > 5,7 \cdot 10^{19}$ эВ. Черный ромб указывает на максимальную значимость ($144,0^\circ$, $40,5^\circ$). Цветом показан избыток (красный) и дефицит (синий) событий по сравнению с изотропным распределением [101].

эксперимент с равномерной экспозицией даст совершенно новые результаты по тем областям небесной сферы, которые находятся на периферии полей зрения наземных установок.

Ещё одной характеристикой космических лучей, принципиально важной для понимания их природы и идентификации их источников, является химический (массовый) состав. Выводы о составе КЛ делаются преимущественно на основании наблюдения т.н. глубины максимума ШАЛ (X_{\max}), измеряемой в единицах г/см², а также компьютерного моделирования ШАЛ, порождаемых различными первичными частицами. Используя данные за 2004–2017 гг., коллаборация РАО получила экспериментальную зависимость средних значений и вариации распределений X_{\max} и показала, что поток КЛ ПВЭ в области энергий 2 ЭэВ образован преимущественно лёгкими ядрами, но доля тяжёлых ядер неуклонно возрастает вплоть до самых высоких энергий [104].

Таким образом, несмотря на усилия, прилагаемые международным научным сообществом, уже почти 60 лет не удаётся решить загадку

о природе и происхождении космических лучей предельно высоких энергий. В этой области накоплен большой объём знаний, но, с одной стороны, результатов двух основных наземных экспериментов и их предшественников до сих пор недостаточно для решения указанной задачи, с другой – между ними имеются серьёзные разногласия. Эти разногласия связаны как с характеристиками самого объекта исследования, в первую очередь, с крайне низким потоком КЛ ПВЭ, так и с ограничениями, связанными непосредственно с наземными исследованиями, а именно, с тем, что наблюдениям с любой из существующих установок доступна лишь часть небесной сферы, и наибольшая экспозиция набирается в непересекающихся областях, так что проверка, полученных в них, результатов силами другого наземного эксперимента невозможна. *Орбитальный детектор с соответствующими техническими параметрами может совершить прорыв в данной области знаний за счёт равномерной экспозиции всей небесной сферы и большой статистики регистрируемых событий.*

3.2. Орбитальная методика регистрации КЛ ПВЭ

Регистрация широких атмосферных ливней, порождённых космическими лучами сверхвысоких энергий, по их флуоресцентному излучению в атмосфере является хорошо зарекомендовавшей себя методикой, применявшейся ранее в экспериментах HiRes и Fly's Eye и используемой в настоящее время на установках Telescope Array и Pierre Auger Observatory в сочетании с «традиционными» детекторами частиц. Она также была предложена для использования в орбитальных детекторах [20] и прошла первую проверку детектором ТУС.

Метод основан на том, что заряженные частицы, возникающие в процессе развития и распространения ШАЛ, возбуждают молекулы азота, находящиеся в атмосфере Земли, которые затем возвращаются в исходное состояние, испуская при этом фотоны в диапазоне частот примерно от 300 до 430 нм (ближний УФ). Число, испускаемых таким образом, фотонов флуоресценции пропорционально энергии, выделяемой в атмосфере заряженными частицами вследствие электромагнитных потерь.

Измеряя величину флуоресцентного излучения как функцию глубины X в атмосфере, флуоресцентный детектор определяет профиль продольного развития ШАЛ $dE/dX(X)$. Интеграл этого профиля даёт оценку полной энергии, рассеянной заряженными частицами электромагнитным образом, что составляет приблизительно 90 % от полной энергии первичной космической частицы.

К настоящему времени разработано несколько методов нахождения направления трека ШАЛ, порождённого КЛ ПВЭ, и оценки энергии первичной частицы при регистрации ШАЛ орбитальным детектором, см., например, [105]. Основной информацией, по которой идёт определение искомых параметров события, являются момент времени и число фотонов, попавших в сработавший канал фокальной поверхности, а также угол, под которым фотоны, попавшие в канал, достигли детектора. В совокупности с данными о положении детектора (его высоте над уровнем моря) эта информация позволяет решить поставленную задачу.

Определение энергии частицы, породившей ШАЛ, основано на том, что число фотонов флуоресценции, испущенных в процессе развития каскада, прямо пропорционально числу электронов в каскаде, которое, в свою очередь, напрямую зависит от энергии первичного ядра. При этом необходимо знать прозрачность атмосферы в момент наблюдения, состояние облачного покрова, а также высоту, на которой происходило развитие ШАЛ.

Интенсивность линий высвечивания флуоресценции, в расчете на единицу пути заряженной релятивистской частицы слабо зависит от давления воздуха (высоты в атмосфере) благодаря противоположному действию двух факторов, пропорциональных давлению: вероятности возбуждения молекул и вероятности столкновения молекул (которые приводят к безызлучательным переходам возбужденных уровней). Такое постоянство выхода света флуоресценции чрезвычайно выгодно для измерений числа частиц ШАЛ на различных высотах в атмосфере.

Для калибровки измеренных значений энергии ШАЛ важно знать точные абсолютные значения выхода света флуоресценции для каждой линии высвечивания. Экспериментальные работы по

измерению выхода света флуоресценции, как функции давления воздуха, его влажности, выполнены несколькими группами авторов [106, 107]. Изменения, связанные с этими параметрами, лежат в пределах 10–20 %.

Параметры флуоресцентного свечения атмосферы, вызванного прохождением диска заряженных частиц ШАЛ со скоростью света, исключительны и позволяют отличить рассматриваемое явление от других возможных природных и техногенных оптических вспышек в атмосфере Земли. Например, свечение при прохождении микрометеоров через атмосферу, в принципе, похожее на свечение диска частиц ШАЛ, отличается медленным движением светящегося пятна – в тысячи раз медленнее скорости света.

Важной составляющей ШАЛ является черенковское излучение, возможность появления которого прямо следует из теории эффекта Вавилова-Черенкова. В отличие от наземных детекторов, орбитальный детектор предоставляет возможность регистрации черенковского света, отражённого от облаков и поверхности Земли, что, в свою очередь, помогает более точно определить высоты, на которых происходило развитие ШАЛ, и глубину максимума.

Эксперимент, который позволил бы решить проблему природы и происхождения КЛ ПВЭ, должен:

- обладать огромной экспозицией для набора максимально возможной статистики КЛ ПВЭ;
- обеспечивать обзор всей небесной сферы, желательно с равномерной экспозицией.

Очевидно, что наземный эксперимент, удовлетворяющий этим требованиям, должен занимать колоссальную площадь, значительно превышающую площади современных установок, что неминуемо приведёт к высокой стоимости его реализации, а для наблюдения всей небесной сферы он должен располагаться в районе экватора с существенным «заходом» в оба полушария. Но даже в этом случае он не сможет добиться равномерной экспозиции всего неба, хотя работы по планированию такой

установки ведутся в рамках проекта GCOS (The Global Cosmic Ray Observatory) [108].

Решение задачи проведения требуемого эксперимента было предложено в начале 1980-х гг. [20]. Авторы этой работы представили проект телескопа-рефлектора, способного регистрировать в ночной атмосфере Земли флуоресцентное и черенковское излучение, возникающее в процессе развития ШАЛ, но размещённого не на поверхности Земли, а на околоземной орбите. По их оценкам, телескоп, размещённый на орбите высотой 500–600 км и оснащённый соответствующей оптической системой, смог бы в любой момент времени обозревать площадь порядка 10^4 км² на поверхности Земли – в несколько раз больше, чем любая из когда-либо существовавших и работающих в настоящее время наземных установок. Работа привлекла к себе большое внимание, и предложенный в ней принцип регистрации КЛ ПВЭ остаётся по-прежнему актуальным. Это обусловлено целым рядом причин:

- орбитальный детектор с соответствующими техническими параметрами, может совершить прорыв в данной области знаний за счёт равномерной экспозиции всей небесной сферы и большой статистики регистрируемых событий;
- орбитальный детектор, который достаточно точно измерит энергетический спектр КЛ ПВЭ по всей небесной сфере, сможет сыграть принципиальную роль в разрешении противоречия между данными наземных установок и получении ответа на вопрос о природе укрупнения спектра;
- орбитальный эксперимент, равномерному наблюдению которого доступна вся небесная сфера, сможет подтвердить или опровергнуть все результаты наземных установок по анизотропии на разных угловых масштабах на высоком уровне статистической значимости. Можно также ожидать, что орбитальный эксперимент с равномерной экспозицией даст совершенно новые результаты по тем областям небесной сферы, которые находятся на периферии полей зрения наземных установок и, следовательно, имеют очень ограниченную и

«искажённую» экспозицию, которая существенно усложняет анализ анизотропии;

- несмотря на то, что точность результатов монокулярного орбитального детектора по определению глубины максимума ШАЛ будет хуже, чем у наземных детекторов, он сможет дать косвенную информацию о массовом составе КЛ ПВЭ на основе анализа направлений их прихода и, тем самым, сделать существенный вклад в решение задачи о природе таких космических лучей, а также их источников;

Тем не менее, реализация такого проекта до сих пор представляет сложнейшую технологическую задачу. Это связано с целым рядом факторов:

- регистрация флуоресцентного и черенковского излучения ШАЛ с расстояний, примерно на порядок превышающих расстояния, на которых такая регистрация осуществляется в наземных условиях, требует высокой чувствительности орбитального прибора, а также его высокого углового разрешения – примерно на порядок выше, чем у наземных флуоресцентных телескопов;
- уровень фона УФ-излучения ночной атмосферы Земли варьируется в широких пределах, что предъявляет повышенные требования к орбитальному телескопу;
- регистрация сигналов от ШАЛ с орбиты затруднена наличием антропогенных источников засветки, а также излучением, связанным с грозowymi процессами в атмосфере;
- вся научная аппаратура должна стабильно функционировать в условиях орбитального полета в открытом космосе, а также выдерживать пусковые перегрузки.

Совокупность перечисленных факторов привела к появлению проекта сравнительно простого орбитального детектора КЛ ПВЭ ТУС, который выполнил роль прототипа более сложных научных приборов, и основной научной задачей которого являлась проверка работоспособности

принципа регистрации ШАЛ от КЛ ПВЭ по их флуоресцентному и черенковскому свечению в ночной атмосфере Земли. Одновременно с этим, надо сказать, что существенная проработка методики регистрации КЛ ПВЭ велась и в международной коллаборации JEM-EUSO. Создан ряд вариантов орбитальной обсерватории, проработаны вопросы дополнительного оборудования, реконструкции и анализа событий, создан целый ряд прототипов: наземных, стратосферных и орбитальных.

3.3. Результаты эксперимента ТУС

Как было сказано выше, флуоресценция ШАЛ в максимуме ливня определяется числом электронов, которое зависит от первоначальной энергии частицы и составляет порядка 10^{14} фотонов за 1 мкс. Для регистрации хотя бы нескольких десятков этих фотонов необходима апертура детектора в несколько квадратных метров. Поэтому регистрация такого типа событий была возможна только в проекте ТУС, хотя проект и носил, скорее методический и технологический характер. В ходе проведения этого космического эксперимента не было зарегистрировано проявления КЛ ПВЭ, однако, было решено две важные задачи, которые показывают работоспособность новой разработанной методики регистрации ШАЛ:

- проведено исследование фоновых условий регистрации КЛ ПВЭ по флуоресцентному свечению ШАЛ с орбиты Земли;
- произведен поиск и реконструкция событий, которые по пространственно-временной структуре аналогичны ШАЛ (ШАЛ-подобные события).

Эта информация имеет важное методическое значение, используется при проектировании будущих космических миссий по исследованию КЛ ПВЭ: «КЛПВЭ» [23] и РОЕММА [24] для оценки их экспозиции, пороговой энергии и возможности по регистрации атмосферных явлений.

Фоновое, для детектора КЛ ПВЭ, излучение атмосферы можно разделить на две составляющие: квазистационарное и транзитное.

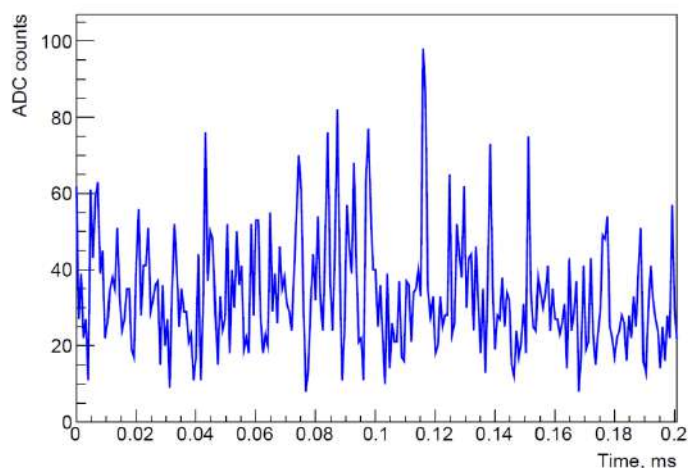


Рис. 3.3: Типичная оциллограмма шумового сигнала в одном пикселе детектора ТУС.

3.3.1. Квазистационарный УФ-фон и оценки времени экспозиции

Под квазистационарным излучением атмосферы в данном контексте подразумевается то, которое изменяется плавно во время записи одного события, т.е. характерное время изменения интенсивности существенно больше длительности ШАЛ. Такое излучение атмосферы определяет порог и экспозицию детектора. Оциллограмма записи фонового излучения имеет характерный вид флуктуации сигнала, распределенного по Пуассоновскому закону, срабатывание триггера происходит за счет флуктуаций большой амплитуды. Пример показан на рис. 3.3.

Среди записей с шумоподобной формой сигнала встречаются события с сильно неравномерной освещенностью фокальной плоскости. Событие такого рода показано на рис. 3.4, когда ТУС находился над Ереваном, Армения. На карте каналов виден локализованный сигнал. Интересно отметить, что над городами США сигнал модулирован на частоте 120 Гц, а сигналы Европы и России — с частотой 100 Гц. Это позволяет легко идентифицировать антропогенный наземный сигнал, например, в сравнении с локальной облачностью, которая также выглядит как повышение яркости сигнала в отдельных пикселях. Пример измерений над США, с временным разрешением 0,4 мс, с хорошо видимой периодической структурой и результатами Фурье-анализа, показаны на рис. 3.5.

Для уменьшения частоты ложных срабатываний разрабатываются и

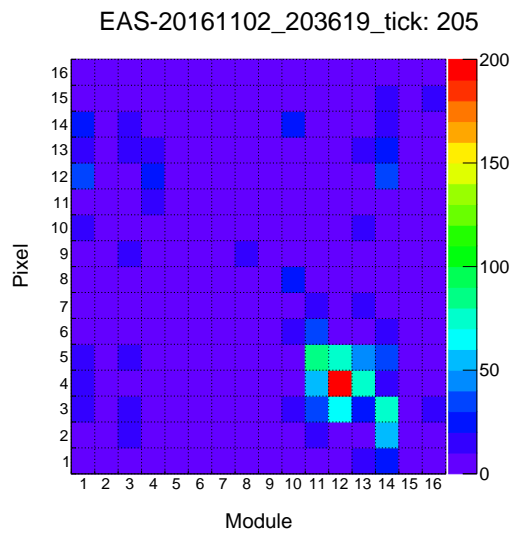


Рис. 3.4: Карта каналов при пролете детектора ТУС над городом Ереван.

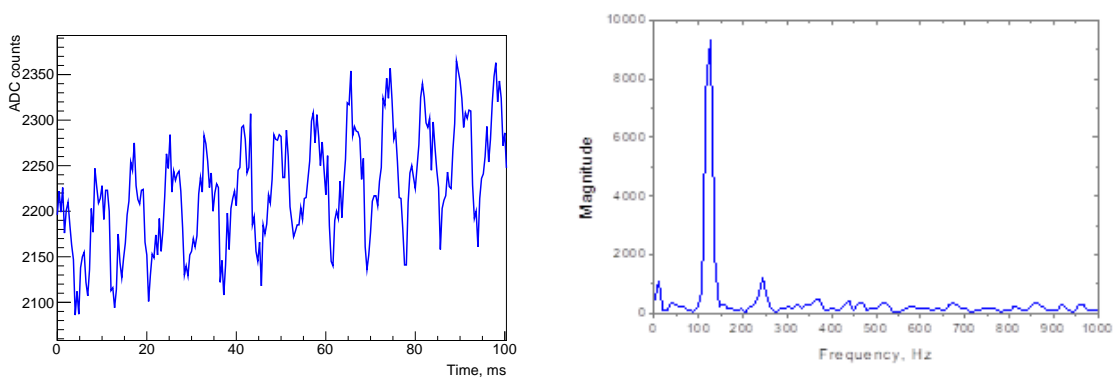


Рис. 3.5: Слева: Осциллограмма сигнала одного канала фотоприемника при пролете над городом на территории США 11.06.2016, 04:56 UTC. Справа: результат фурие-преобразования с пиком на частоте 120 Гц.

используются специальные многоуровневые триггерные алгоритмы [109]. В детекторе ТУС использован двухуровневый триггер [110]. Первый уровень (пороговый триггер) строит карту каналов, где произошло превышение скользящего среднего по 16-ти тактам среднего сигнала за предыдущий кадр (256 тактов) на величину dQ . Второй уровень – триггер смежности – анализирует соседство последовательных пороговых триггеров, т.е. отбирает такие события, когда в течение n тактов срабатывают соседние пиксели. dQ и n – параметры триггерной системы, которые настраиваются в процессе работы прибора таким образом, чтобы частота триггерных событий была меньше пропускной способности канала передачи данных между детектором и бортовым компьютером.

Оценка геометрической экспозиции для космических детекторов КЛ ПВЭ является более сложной задачей, чем для наземных, поскольку условия наблюдения – состояние атмосферы, фоновой освещенности и пр. – быстро меняются из-за высокой скорости движения спутника. Для оценки экспозиции орбитального детектора и влияния на нее фонового излучения атмосферы были проанализированы все данные, полученные в режиме регистрации ШАЛ с апреля 2016 г. по декабрь 2017 г. К сожалению, детектор ТУС периодически отключали для проведения профилактических работ на космическом аппарате, а также использовались другие режимы работы, с большим временным разрешением, которые в данный анализ не попали. На рис. 3.6 показано географическое распределение триггеров (срабатываний триггерной системы) детектора ТУС за время его работы в режиме регистрации ШАЛ. Видно, что триггеры распределены достаточно равномерно, но имеют более высокую концентрацию над континентами. Заметным исключением из этого правила являются Антарктида, Арктика и Сахара, где частота триггеров, сравнима с частотой над океанами.

Мертвое время после каждого срабатывания составляло 53–60 секунд (изменялось в течение эксперимента в зависимости от настроек триггера). Время, которое спутнику требовалось, чтобы пересечь ночную сторону Земли, составляло ~ 2000 секунд. Таким образом, орбиты с числом триггеров более ~ 40 в целом наблюдаться не могли. Для каждой орбиты

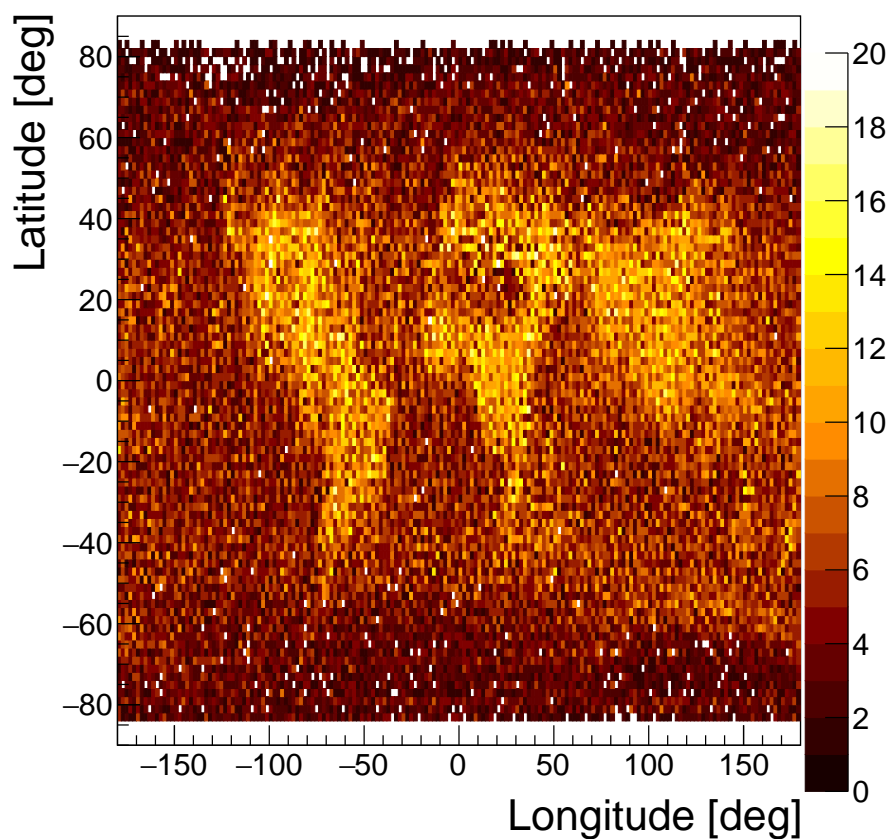


Рис. 3.6: Географическое распределение триггеров ТУС в режиме ШАЛ. Цветовая шкала показывает количество триггеров в каждом бине.

можно дать оценку активного времени в предположении, что детектор всегда находился в режиме сбора данных, за исключением собственного мертвого времени. Выявлено 3118 витков с общим временем наблюдения 73 полных дня. Активное время наблюдения составит всего 31 день, если принять во внимание мертвое время. Это $\sim 42\%$ от общего времени сбора данных. Используя телеметрические данные о траектории спутника возможно с точностью ~ 1 секунды оценить состояние детектора (режим активного триггера/мертвое время) для каждой точки на карте Земли. На рис. 3.7 показана доля активного времени измерений в зависимости от географических координат.

Из этого рисунка видно, что частота срабатывания триггера и мертвое время прибора связаны друг с другом. Населенные пункты и грозовые районы практически не вносят вклада в суммарную экспозицию, т.к. в них прибор не находится в активном режиме. Овалы полярных сияний также хорошо видны, как неактивные области в полярных

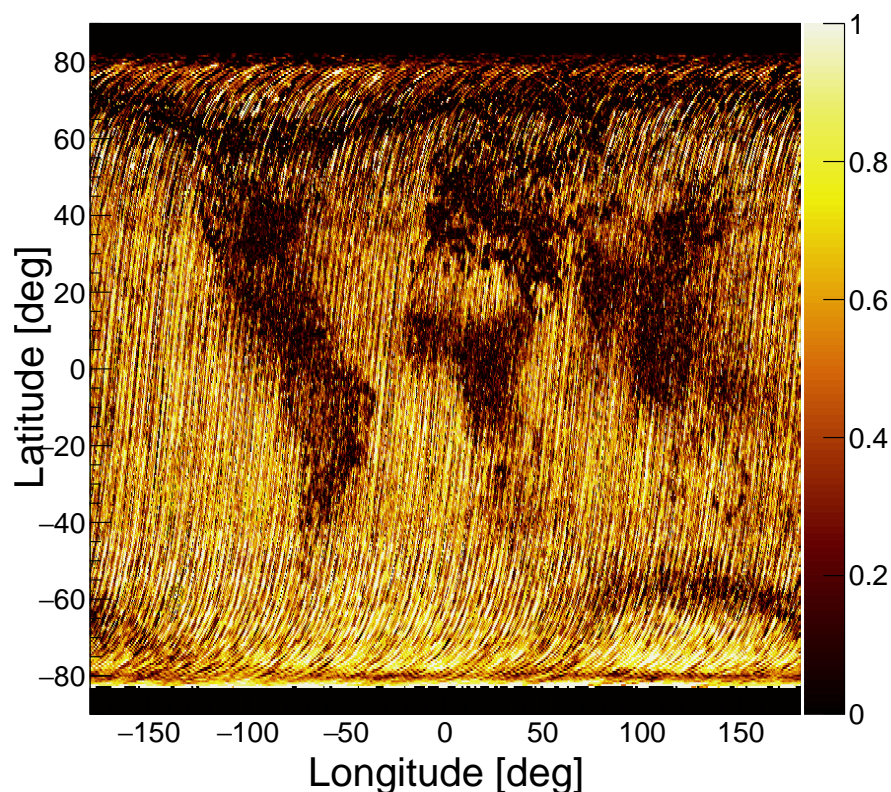


Рис. 3.7: Отношение активного времени к общему времени работы прибора в зависимости от географического положения.

регионах. С другой стороны, над океанами частота срабатывания триггера мала и время экспозиции при наблюдении КЛ ПВЭ – максимально.

Для обеспечения низкого порога регистрации КЛ ПВЭ необходима также малая освещенность рассеянным лунным светом (малая фаза Луны), это условие выполняется только для 21,2 полных дня. Таким образом, активное время набора данных еще уменьшается до 12,9 дней (это 60 % времени безлунной экспозиции). Состояние облаков для каждого триггера также необходимо принять во внимание. Оценка облачности производилась по данным MERRA2 (The Modern Era Retrospective Analysis for Research and Applications-2) – часть разрабатываемой модели общей циркуляции атмосферы нового поколения (AGCM) в Управлении глобального моделирования и ассимиляции НАСА². Оказалось, что 70 % измерений происходят в условиях наличия облачности в поле зрения прибора. При этом 28 % событий регистрируются когда высота облачности ниже 2 км, а 64 % – когда ниже 6 км. В условиях низкой высоты облачности

²<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

несколько повышается фон и, тем самым, уменьшается эффективность триггерной системы.

Таким образом, в ходе изучения квазистационарного сигнала было показано, что существенное повышение фона, сопровождающееся также и ложными срабатываниями триггерной системы, наблюдается над областями активной антропогенной деятельности и грозовых районах. Это приводит к тому, что время ожидания события (эффективное время работы прибора) уменьшается над континентами в 5–10 раз [111]. В результате, эти области вносят лишь 10 % в экспозицию прибора. Более того было показано, что лишь 30 % измерений происходят в идеальных метеоусловиях, когда при регистрации и реконструкции событий нет необходимости учитывать облачность.

Суммарная экспозиция детектора ТУС за время работы составила $\sim 1550 \text{ км}^2$ ср год, а если учесть влияние облачного покрова, то она уменьшается до $\sim 880 \text{ км}^2$ ср год. Это значение на порядок меньше, чем для наземных установок и является следствием малого поля зрения прибора и большого мертвого времени при записи событий.

Оценим, какое количество ШАЛ мог зарегистрировать детектор ТУС при данной экспозиции. За 14 лет и 8 месяцев работы Pierre Auger Observatory (с 01.01.04 по 31.08.18) полная экспозиция этого эксперимента для целей нахождения энергетического спектра КЛ составила примерно 60400 км^2 ср год. За это время было зарегистрировано 15 событий с энергией первичной частицы более 100 ЭэВ, что приблизительно соответствует порогу регистрации детектора ТУС. Отсюда следует, что для регистрации одного события с такой энергией потребовалось в среднем накопить экспозицию более 4000 км^2 ср год, что 2,6 раза превышает экспозицию эксперимента ТУС без учета облачного покрова и в 4,5 с их учетом.

С другой стороны, поток КЛ ПВЭ с энергией выше 50 ЭэВ, по данным эксперимента Telescope Array, приблизительно в 4 раза превышает поток, измеренный в эксперименте Auger. Если принять, что верен спектр ТА, получим, что ТУС мог зарегистрировать 1 событие с энергией выше 100 ЭэВ. Ближе к действительности некоторый усреднённый спектр, и

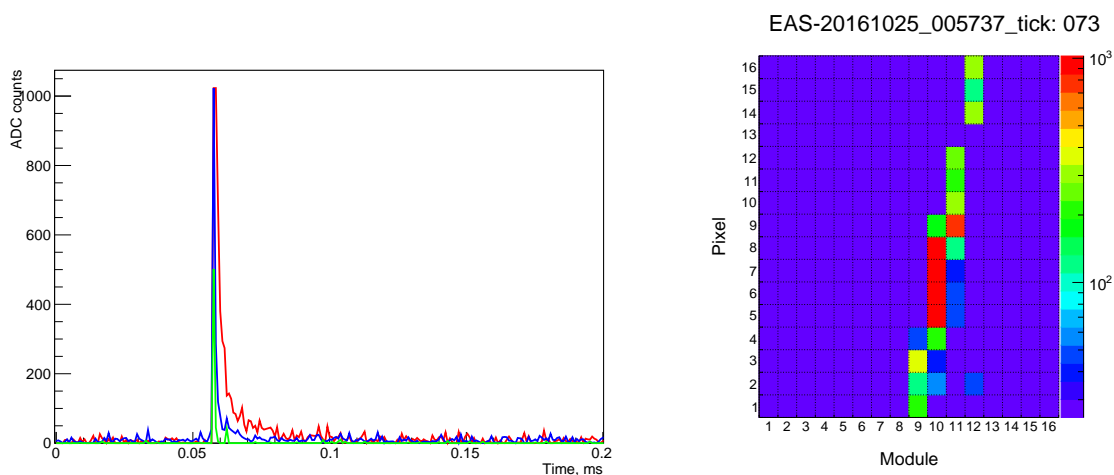


Рис. 3.8: Мгновенный трек, зарегистрированный 25 октября 2016 года. Слева: формы осциллограммы десяти ФЭУ, с наибольшими значениями АЦП. Цвета обозначают разные пиксели. Справа: карта каналов в момент максимального значение кода АЦП.

ожидать уверенной регистрации ШАЛ КЛ ПВЭ в эксперименте ТУС невозможно.

3.3.2. Транзиентный УФ-фон и анализ работы триггерной системы

К *транзиентному излучению атмосферы* в данном случае относятся события, которые имеют тот же временной масштаб, что и ШАЛ. Оно определяет мертвое время прибора, вызванное обработкой зарегистрированных ложных событий. События такого типа имеют различную природу и, соответственно, форму осциллограмм.

В ходе проведения эксперимента были зарегистрированы разнообразные типы событий: мгновенные треки, монотонные вспышки грозовой природы, высокоатмосферные ТАЯ, пульсации в зоне полярного овала, необычные внегрозовые вспышки, метеоры, сигналы антропогенного происхождения [14, 112]. Опишем некоторые из них более подробно.

1. Мгновенные треки

События имеют резкий фронт сигнала (подъем до максимума за 1 такт измерения) и экспоненциальный спад, а сработавшие пиксели, как правило, локализованы в виде небольшого пятна или выстроены вдоль линии. Пример осциллограммы и карты каналов приведен на рис. 3.8.

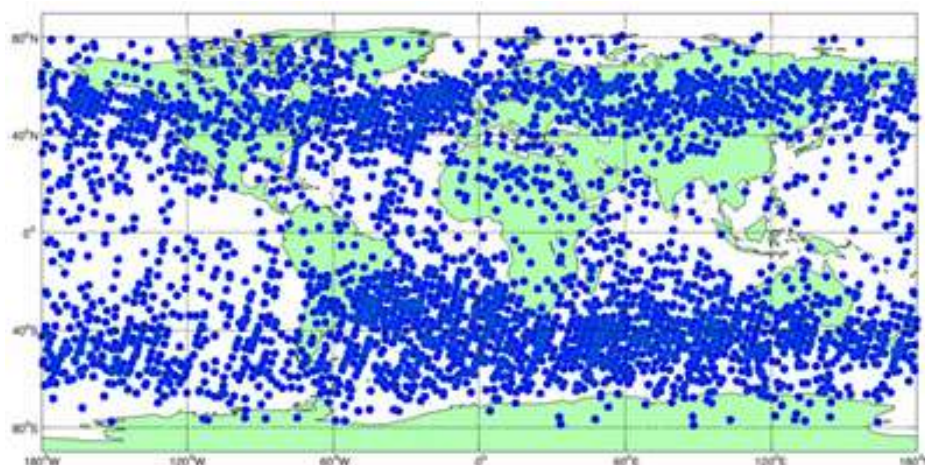


Рис. 3.9: Географическое распределение мгновенных треков.

При поиске сигналов со скачкообразным ростом, в данных детектора ТУС было найдено более 3600 таких событий, среди которых в 70 % случаев наблюдалось насыщение активных каналов фотоприёмника (т.е., коды АЦП принимали максимальное возможное значение, равное 1023).

При анализе трекоподобных событий быстро стало понятно, что они возникают в детекторе, а не в атмосфере. В противном случае возникновение трека длиной несколько десятков километров в атмосфере в течение микросекунды потребовало бы движения источника сигнала со сверхсветовыми скоростями.

Более того, географическое распределение событий имеет характерную особенность – число событий растет с широтой, а также наблюдается очевидная корреляция с конфигурацией геомагнитного поля и повышенная плотность трекоподобных событий в районе Южно-Атлантической аномалии (см. рис. 3.9).

Для проверки предположения об источниках таких событий было проделано математическое моделирование прохождения протонов с энергиями в диапазоне от 100 МэВ до 10 ГэВ через детектор. Для этого использовался программный комплекс GEANT4. Модель детектора представляла собой матрицу из 256 детектирующих ячеек (квадрат 16×16 ячеек). Ячейка состояла из круглого стеклянного светофильтра, размещенного в алюминиевой пластине толщиной 2,5 мм, над светофильтром был расположен алюминиевый световод. Оптические

фотоны, образовавшиеся в процессе взаимодействия первичной частицы с материалом прибора, регистрировались в нижней части ячейки, где располагаются ФЭУ.

При моделировании взаимодействия заряженных частиц с элементами детектора использовалась стандартная библиотека FTFP_BERT, учитывающая процессы электромагнитных и ядерных взаимодействий протонов с веществом. Применённое при моделировании описание оптических процессов включало в себя рождение черенковских фотонов, флуоресценцию стекла, поглощение фотонов в стекле и отражение от границ раздела материалов. При этом световыход флуоресценции для стекла был принят равным 300 фотонов/МэВ при длине волны 300–400 нм. Показатель преломления стекла УФС1 равен 1,54. Для сопоставления результатов моделирования с экспериментальными данными, рассчитанный спектр зарегистрированных фотонов преобразовывался в количество зарегистрированных фотоэлектронов в соответствии со спектральной чувствительностью данного ФЭУ.

Моделирование показало, что в случае, если протон попадает в светофильтр параллельно его плоскости, то срабатывание ФЭУ, находящихся на периметре фотодетектора, происходит начиная с энергий порядка 100 МэВ, при этом, в большинстве случаев, амплитуда сигнала достаточна для насыщения ФЭУ. При увеличении энергии протона до 200 МэВ сработают за счет сцинтилляции и достигнуть насыщения могут уже до 6 ячеек фотоприёмника. Начиная с энергии порядка 400 МэВ, попадание протона в светофильтр может приводить к срабатыванию всех 16 ФЭУ, выстроенных в прямую линию. В качестве иллюстрации на правой панели рисунка 3.10 показан результат моделирования для протона с энергией 1 ГэВ. Видно, что при выбранных параметрах модели детектора протоны данной энергии создают сигнал достаточной амплитуды.

При моделировании рассматривались случаи попадания протона в светофильтр под различными углами, преимущественно под небольшим углом к его плоскости. Максимальная амплитуда сигнала наблюдается в ячейках, где первичный протон проходит непосредственно через светофильтр. Импульсы с более низким уровнем сигнала наблюдаются

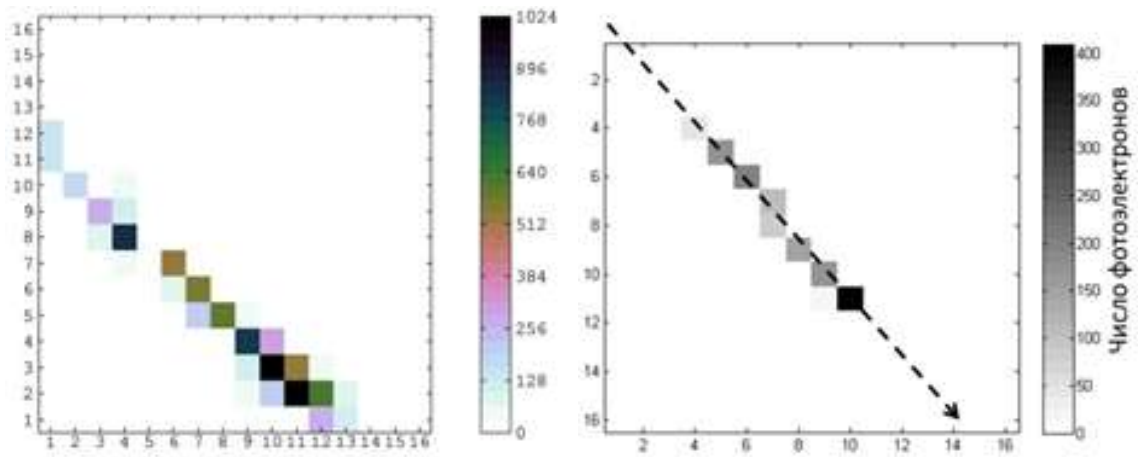


Рис. 3.10: Слева: реальный трек, зарегистрированный детектором ТУС. Справа: трек от попадания в прибор протона с энергией 1 ГэВ по результатам моделирования. Стрелка показывает направление движения протона.

в пикселях в основном за счет флуоресценции, обусловленной ионизационными потерями вторичных частиц, образовавшихся в алюминиевом световоде при прохождении первичного протона. Результаты исследования были опубликованы в работе [113].

Была проанализирована типичная временная структура сигнала для событий типа «мгновенный трек». При появлении мгновенной вспышки на входе фотокатода ФЭУ характерное время спада сигнала должно соответствовать постоянной времени $\tau = RC = 600$ нс анодной цепи. Однако, практически во всех событиях, время спада существенно больше и плохо фитируется одной экспоненциальной функцией. Поэтому было сделано предположение, что сигнал состоит как бы из двух компонент: быстрой, связанной с мгновенным высвечиванием, и медленной, появляющейся из-за дополнительной флуоресценции в стекле ФЭУ, светофильтре или переходных процессов в ФЭУ после яркой вспышке.

Получаемые сигналы в отдельных ФЭУ были аппроксимированы зависимостью:

$$N_{ADC} = A \cdot e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau_1}} + B \cdot e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau_2}} + C \quad (3.1)$$

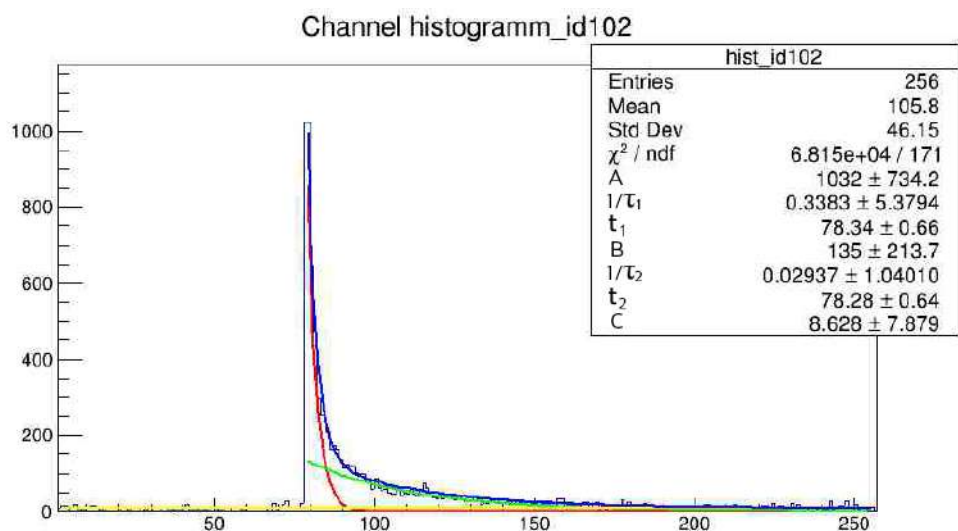


Рис. 3.11: Результат аппроксимации события при помощи двух экспонент для 102-го пикселя события, зарегистрированного 28 октября 2016 года в 08:29 UTC.

где A и B – амплитуды быстрой и медленной компонент сигнала, а τ_1 и τ_2 – характерные времена спада быстрой и медленной компонент сигнала, C – базовый уровень.

Пример результата фитирования приведен на рис. 3.11.

Для всех обработанных сигналов получено распределение для постоянных времени τ_1 и τ_2 . Распределение приведено на рис. 3.12. Видно, что первая экспонента, описывающая пик, имеет постоянную времени, характерную для анодной RC-цепочки (~ 800 нс). Для второй экспоненты распределение заметно шире (от 1 до 40 мкс), с двумя максимумами в около 8 мкс и 20 мкс.

Вторая компонента и обуславливает срабатывание триггерной системы, т.к. существует длительное время и она удовлетворяет второму уровню и критерию смежности (срабатывают соседние пиксели).

Как было сказано выше, пространственно данные события, как правило, выглядят либо в виде компактных пятен, либо вытянутых треков на матрице фотоприемника. В некоторых случаях импульс наблюдается в большом количестве каналов одновременно.

Геометрически длина трека обусловлена углом прихода частицы к

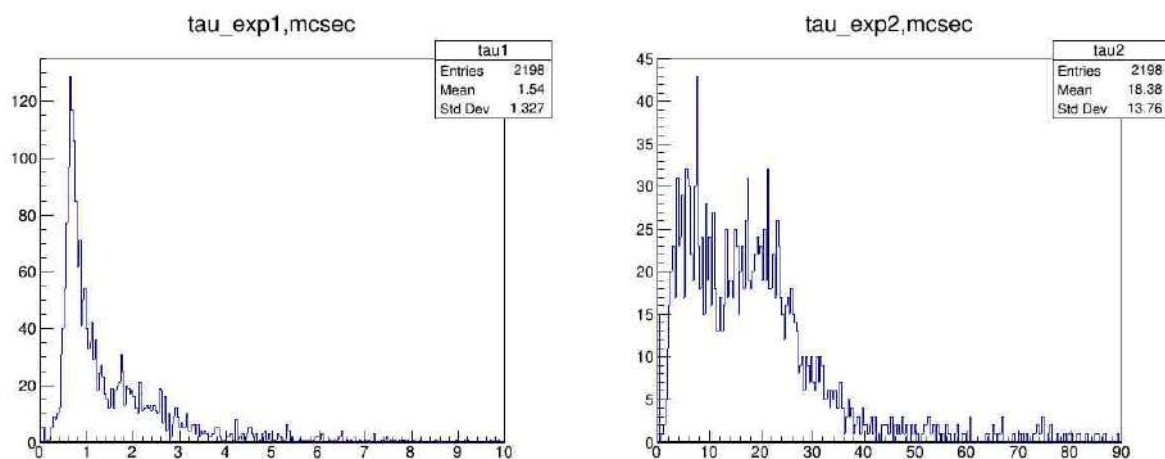


Рис. 3.12: Распределение для постоянных времени τ_1 (слева) и τ_2 (справа).

поверхности фотоприемника и толщиной прозрачного слоя вещества (а также энергией частицы). При этом, чем тоньше «мишень», тем меньше должна быть доля «длинных» событий, т.к. телесный угол, приходящийся на квазигоризонтальное (относительно плоскости фотоприемника) попадание, уменьшается. Таким образом, по распределению событий по длине трека можно определить характерную толщину области образования свечения. На рисунке 3.13 приведены: экспериментальная гистограмма распределения событий по множественности – числу каналов, в которых наблюдается сигнал (множественность характеризует длину трека), и модельные кривые распределения событий при разной толщине вещества. Видно, что при малых толщинах модельные кривые существенно расходятся с экспериментальными данными, поскольку у них основная доля приходится на вертикальные события с множественностью равной единице. Хорошее согласие наблюдается при толщине вещества 4–5 см. Это размер близкий к длине колбы ФЭУ, а значит, косвенно указывает на то, что свечение происходит не только в тонком светофильтре и фотокатоде (суммарная толщина 3 мм), а по всей колбе ФЭУ.

Таким образом, в результате анализа мгновенных трековых событий показано, что:

1. Географическое распределение событий связано со структурой геомагнитного поля Земли.
2. Мгновенные треки могут быть вызваны прохождением протонов с

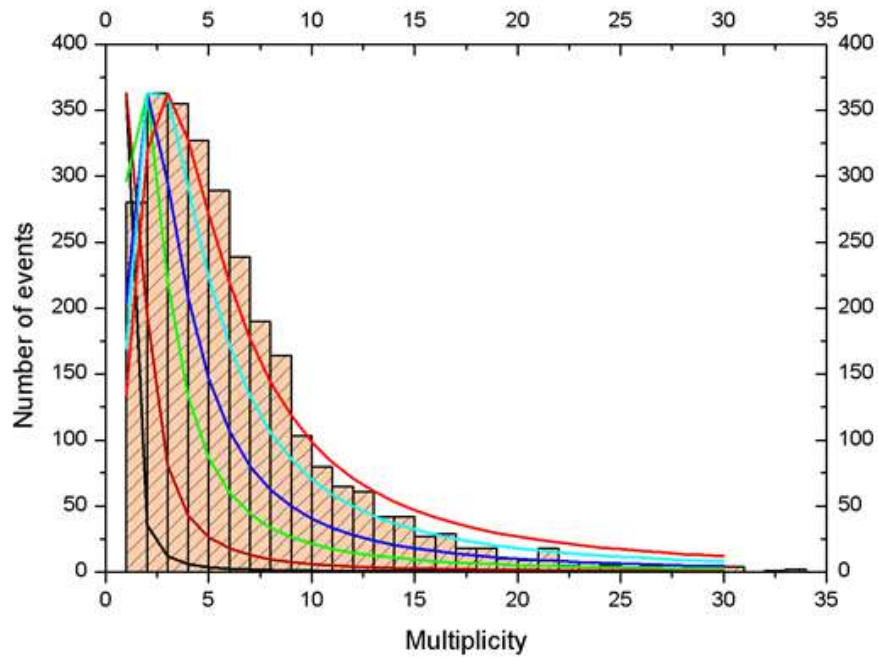


Рис. 3.13: Гистограмма – экспериментальное распределение числа событий по множественности. Линии – модельные кривые для разных толщин светящегося вещества: черная – 3 мм, коричневая – 1 см, зеленая – 2 см, синяя – 3 см, голубая – 4 см, красная – 5 см.

энергиями выше 100 МэВ через оптические элементы и вещество фотоприменика.

3. Длительность спада сигнала существенно больше постоянной времени анодной RC-цепи, что говорит либо о флуоресцентном послесвечении стеклянных частей прибора, либо о длительных процессах перераспределения избыточного заряда в ФЭУ.
4. Распределения сигнала по числу сработавших ячеек говорит о том, что воздействие ионизирующего излучения происходит не только на стекло входного окна (светофильтр и фотокатод), но и на все ФЭУ целиком.

Регистрация и анализ этих событий имеет, скорее, важное методическое значение. Наличие этих событий необходимо учитывать при разработке триггерной системы детекторов нового поколения, т.к. их высокая частота существенно снижает время экспозиции прибора.

Такие мгновенные треки появлялись примерно в 14 % всех зарегистрированных на первом этапе работы детектора ТУС (первые

6 месяцев, май–ноябрь 2016 г.). После обработки данных за первые дни работы прибора стала очевидна необходимость введения «антитриггера», который бы не реагировал на эти события. Алгоритм работы триггера заключается в следующем: при записи осциллограмм в случае возникновения мгновенного (за один такт) скачка амплитуды (dA) выработка триггера ШАЛ блокируется на определенное время T . Таким образом, в этом алгоритме два управляющих параметра, позволяющих регулировать эффективность отсеечения ложных срабатываний.

В ноябре 2016 года было изменено программное обеспечение детектора ТУС с довольно мягкими значениями параметров dA и T , а именно, $dA = 512$, $T = 64$. Т.е. при превышении сигнала 512 кодов АЦП в течение 64 тактов не происходит выработка триггера.

На рис. 3.14 показано распределение регистрируемых событий данного типа по дням работы детектора с 19.05.2016 по 01.12.2017. Промежутки без данных – время когда прибор был выключен или работал в других режимах. Синей линией показан момент введения антитриггера. Видно, что частота мгновенных вспышек существенно сократилась (в 2–3 раза), см. диапазон дней 200–300. Однако все равно их доля в числе событий оставалась значительной. Поэтому было принято решение ужесточить условия антитриггера, а именно, увеличить время ожидания после регистрации резкого скачка амплитуды. На рис. 3.14 введение второго варианта антитриггера показано красной линией. Видно, что относительно первоначальных значений, частота срабатываний на мгновенные вспышки от попадающих в фотоприемник заряженных частиц упала на порядок, т.е. 90 % событий данного типа отсеиваются на этапе первичного триггера.

Видно также, что частота регистрации событий варьируется. На рисунке 3.15 показан отдельно период с 300 по 600 день и на нем же синей линией отображено изменение фазы Луны. Очевидна антикорреляция частоты регистрации событий с фазой Луны, что объясняется тем, что при большей освещенности атмосферы (а Луна является основным фактором определяющим стационарное рассеянное свечение ночной атмосферы), с одной стороны, понижается чувствительность детектора, а с другой – на

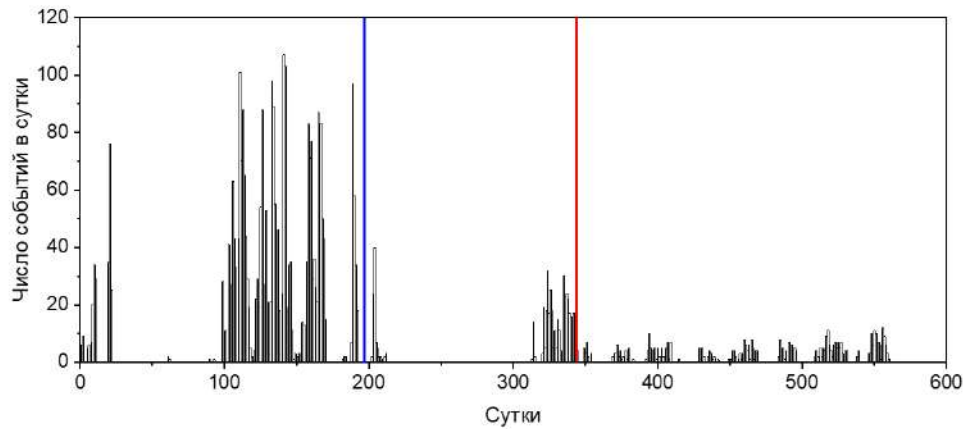


Рис. 3.14: Частота регистрации событий типа «мгновенный трек» в сутки.

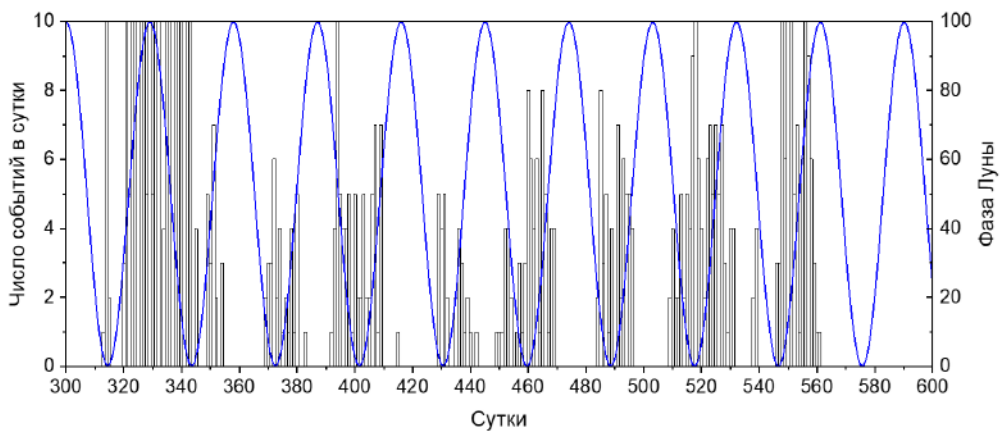


Рис. 3.15: Частота регистрации мгновенных вспышек в сутки (черная гистограмма) и вариации фазы Луны (освещенности ночной атмосферы) – синяя линия.

работу триггерной системы оказывают большее влияние другие факторы, в частности флуктуации интенсивности свечения атмосферы.

2. Монотонные вспышки.

Другая отдельная группа событий состоит из монотонного увеличения значений кода АЦП со сравнительно медленным временем нарастания (100 мкс) – т.н. «монотонные вспышки». Такая вспышка обычно возникает одновременно в большинстве пикселей, обеспечивая почти равномерное освещение фокальной поверхности. Пример осциллограммы монотонной вспышки показан на рис. 3.16. В большинстве случаев

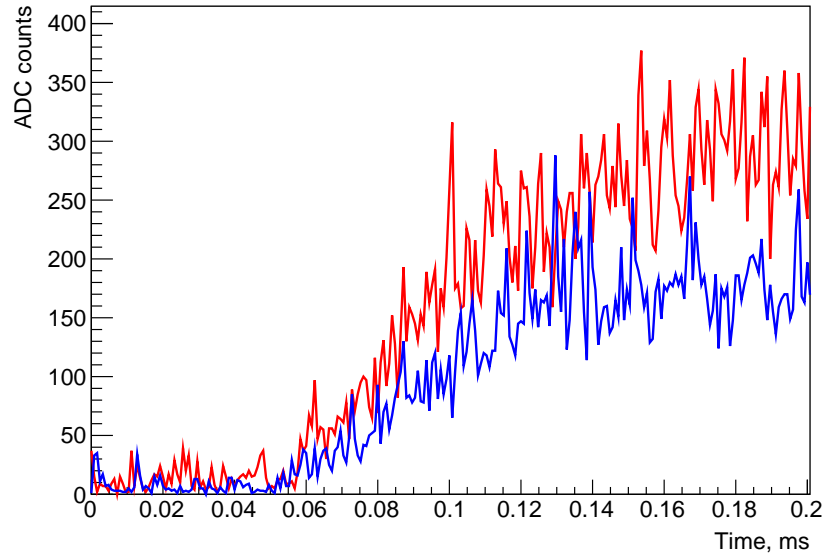


Рис. 3.16: Осциллограммы двух каналов фотоприемника в случае регистрации монотонной вспышки.

максимум вспышки не пройден до окончания записанной трассы (200 мкс).

Анализ географического распределения этих вспышек показывает их корреляцию с известными районами грозовой активности (см. рис. 3.17). Проведено сравнение со вспышками молний, измеренными WWLLN, и показано, что большинство из них происходят на расстоянии более 400 км от поля зрения детектора ТУС в течение 1 с [114].

Эти вспышки можно объяснить следующим образом. Зеркало детектора ТУС помимо фокусировки УФ-излучения, диффузно рассеивает существенную его часть. Предполетные измерения показали, что доля рассеянного излучения составляет 40 % [34, 35]). Причем рассеивается излучение не только из поля зрения фотоприемника, но и за его пределами, что делает «эффективное» поле зрения прибора больше и вероятность обнаружения молний (или связанных с ними транзиентных событий) за пределами фактического поля зрения может быть выше. Сделаем простую оценку сигнала в одном пикселе для точечного источника вне поля зрения фокусирующего зеркала. Точечный источник, излучающий Q фотонов на расстоянии R до подспутниковой точки, производит $q(Q, R)$ фотонов,

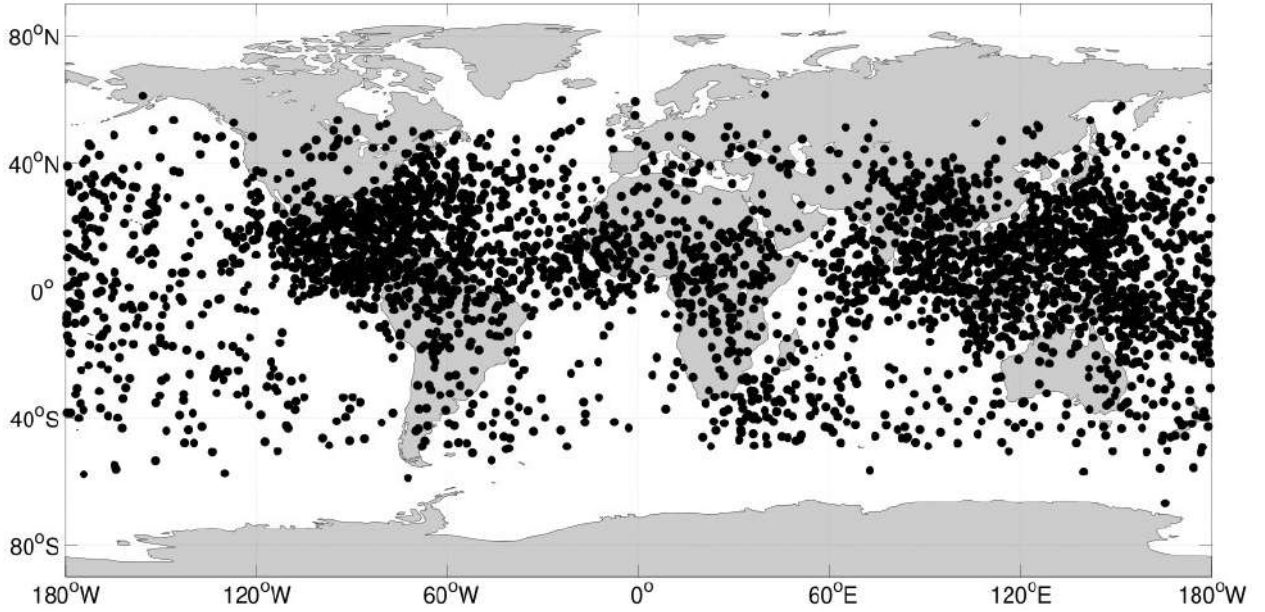


Рис. 3.17: Географическое распределение событий с монотонным ростом сигнала.

отражаемых плоским шероховатым зеркалом площадью S :

$$q(Q, R) = QS \frac{\cos^2(\delta(R))}{4\pi(R^2 + h^2)} \quad (3.2)$$

где $\delta(R) = \arccos(h/(h^2 + R^2)^{0,5})$ – угол между направлениями в надир и на источник света (h – высота орбиты спутника). Свет рассеивается от зеркала до пикселя фокальной плоскости, имеющего поле зрения 10^{-4} ср, и производит $P(Q, R) = q(Q, R)10^{-4}0,2/2\pi$ фотоэлектронов в одном пикселе.

На расстоянии $R = 1000$ км (значительно за пределами поля зрения фокусирующего зеркала) источник $Q = 10^{23}$ фотонов (типичная УФ-вспышка, измеренная спутниками «Татьяна» и «Вернов») производит количество фотоэлектронов в одном пикселе порядка $P = 10^4$. Учитывая, что длительность молнии в тысячу раз превышает временной отсчет ТУС (в режиме работы ШАЛ), следует ожидать сигнала около десяти фотоэлектронов в одном пикселе, что слишком мало для обнаружения над фоном. На расстояниях близких к полю зрения фокусирующего зеркала ($R = 100$ км), плоское зеркало может производить монотонную вспышку с общим количеством фотоэлектронов более $P = 10^5$ (или 10^2 на пиксель за такт), что дает вполне регистрируемый сигнал.

Важным методическим выводом анализа таких монотонных внеапертурных вспышек является то, что для уменьшения частоты ложных триггеров на грозовые вспышки необходима более эффективная защита от боковой засветки. Это решается за счет дополнительных бленд и «закрытой оптической системы», типа камеры Шмидта, когда основное зеркало находится внутри светонепроницаемого кожуха.

3. Транзентные атмосферные явления

Другие явления, которые ассоциированы с грозовыми областями – высоко атмосферные транзентные события – также регистрируются детектором ТУС. Отсутствие спектральных измерений и довольно грубое пространственное разрешение не позволяют надежно отличать объемное свечение спрайтов, джетов от, рассеянного в облаках, молниевое свечения. Поэтому, единственным типом событий, которые идентифицируются по характерному пространственно-временному паттерну, являются вспышки типа ELVES. Подробно они описаны в предыдущей главе, где показано, что 1) высокая чувствительность прибора позволяет регистрировать ELVES с крайне низким максимальным током обратного удара родительской молнии, 2) анализ кинематических характеристик двойных ELVES позволяет определять положение родительского внутриоблачного разряда. В дополнение отметим лишь, что детектором ТУС впервые зарегистрирован т.н. множественный ELVES – событие у которого наблюдается 5 колец. Карта каналов для такого события и осциллограммы двух пикселей приведены на рис. 3.18.

Отдельно были исследованы события в самом медленном режиме работы детектора (с временным разрешением 6,6 мс). Пример двух событий, которые представляют собой серии вспышек, показан на рис. 3.19. Для всех событий такого типа было произведено сравнение с данными наземных сетей по регистрации молний (WWLLN и Vaisals GLD360). И показано, что присутствующие на осциллограммах резкие пики соответствуют обратным ударам молний, а остальные, более широкие импульсы, – не регистрируемым наземными сетями внутриоблачным процессам и высокоатмосферным транзидентам. Таким образом, в режиме с временным разрешением 6,6 мс возможно отличать одни типы

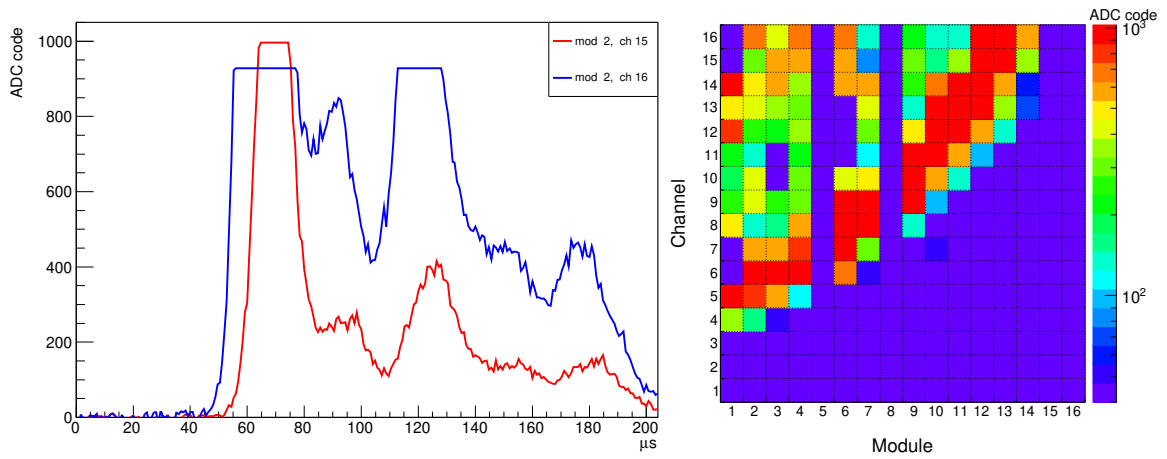


Рис. 3.18: Пример события ELVES со сложной пространственно-временной структурой, зарегистрированный детектором ТУС 04.08.2017 в 16.26.20 UTC. Слева: осциллограмма двух каналов фотоприемника. Справа: карта каналов в момент времени 152 мкс от начала записи осциллограмм

событий (молнии) относительно других. Еще более интересным оказался факт, что для событий, на осциллограмме которых нет острых пиков, молниевые разряды наземными сетями в районе поля зрения детектора не регистрируются.

Так, первое из событий, показанных на рис. 3.19 было измерено над грозовой областью. В это время сети WWLLN и Vaisala GLD360 зарегистрировали многочисленные удары молний в поле зрения ТУС. Три узких высоких пика являются обратными ударами молнии: они соответствуют молниям, обнаруженным в данных Vaisala GLD360. Второе событие имеет совершенно иную временную структуру: здесь нет коротких (однотактовых) пиков. Оно произошло вдали от гроз (расстояние до ближайшей молнии от поля зрения ТУС более 300 км) по данным сети Vaisala GLD360 и, скорее всего, имеет другую природу.

В заключении скажем, что наличие и регистрация транзитных вспышечных событий, связанных с грозовой активностью, не влияют на оценки времени экспозиции детектора КЛ ПВЭ, поскольку они заведомо происходят при наличии плотного облачного покрова, и эти области уже учтены в параметре η_{clouds} при, проведенном выше, расчете. Частота же внегрозных вспышек крайне мала и учитывать их наличие не нужно.

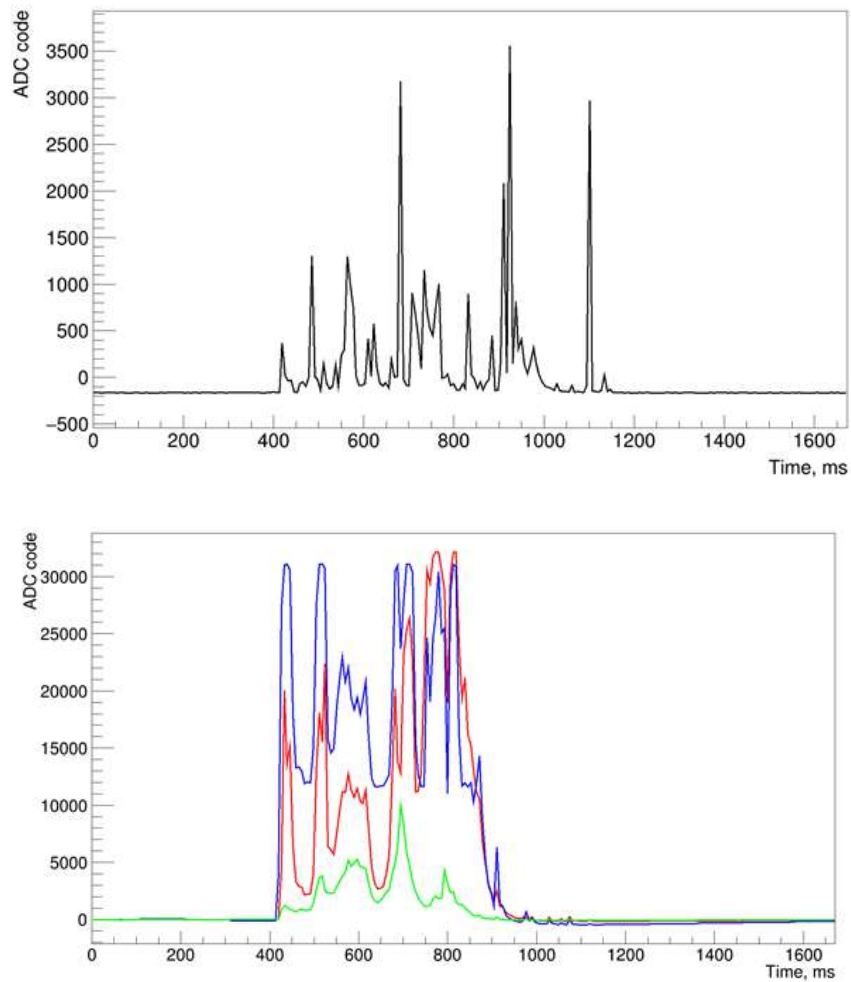


Рис. 3.19: Осциллограммы двух событий, зарегистрированных в режиме с разрешением 6,6 мс. Сверху: серии УФ-вспышек над грозой. Снизу: далекого от грозы события.

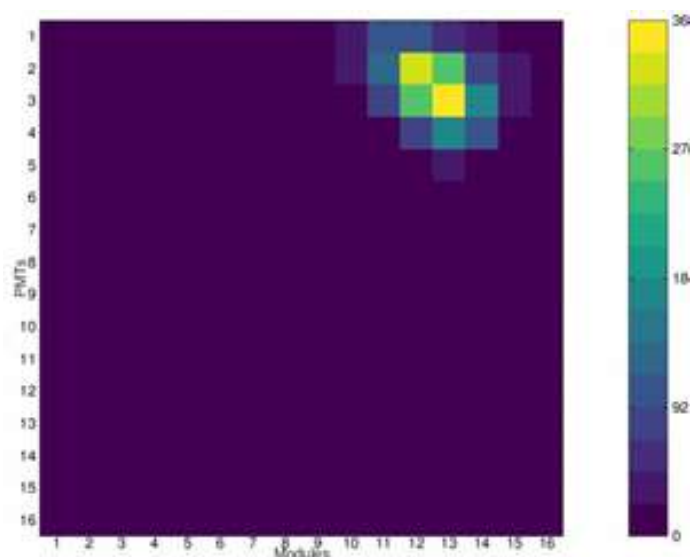


Рис. 3.20: Пример возможного трека на фокальной плоскости детектора ТУС от флуоресцентного свечения ШАЛ по результатам моделирования.

3.3.3. ШАЛ-подобные события

Главной целью эксперимента ТУС была проверка работоспособности метода регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), порождаемых при вхождении в атмосферу Земли космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ). Поэтому задача поиска ШАЛ является одной из важнейших при анализе базы данных, полученной в ходе эксперимента.

Образом ШАЛ на фокальной плоскости (ФП) детектора является трек, создаваемый перемещающимся сигналом. В случае идеальной оптики трек является линейным. В реальной ситуации линейность трека в той или иной степени размывается за счёт ФРТ оптического прибора. В процессе создания телескопа ТУС и подготовки эксперимента было проведено моделирование различных аспектов работы прибора, в первую очередь, его возможного отклика на флуоресцентный и черенковский сигнал ШАЛ. Для этого использовался пакет программ ESAF, разработанный международной коллаборацией JEM-EUSO [115], а также программа TUSSIM, разработанная в ОИЯИ [116]. На рис. 3.20 показан ожидаемый (интегральный) трек от ШАЛ, созданного первичным протоном с энергией 200 ЭэВ, входящим в атмосферу под зенитным углом 60° .

Число фотонов флуоресценции, создаваемых в процессе развития ШАЛ, и, следовательно, амплитуда кривой свечения, прямо

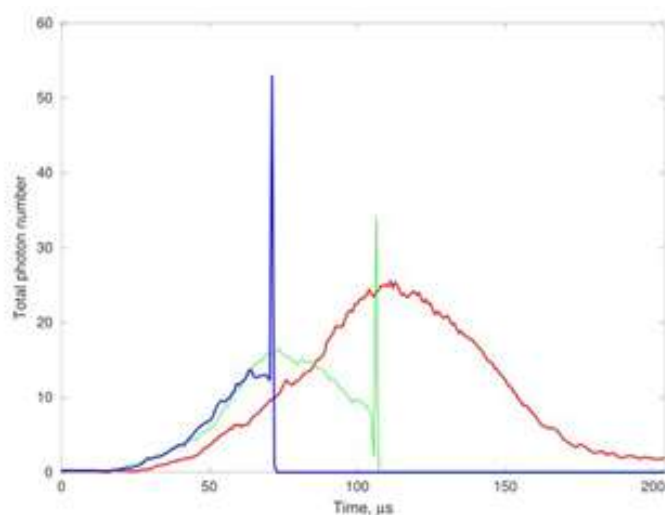


Рис. 3.21: Пример возможных кривых свечения от ШАЛ, вызванных протонами с энергией 100 ЭэВ, имеющими различные зенитные углы: 15 (синий), 45 (зелёный) и 75 град (красный). По оси абсцисс отложено полное число фотонов. Уровень фонового излучения равен нулю.

пропорционально числу электронов (позитронов) в ШАЛ, которое, в свою очередь, зависит от энергии и природы первичной частицы. Форма кривой свечения сильно зависит от зенитного угла, под которым первичная частица входит в атмосферу. На рис. 3.21 показаны ожидаемые кривые свечения от ШАЛ, вызванных протонами с энергией 100 ЭэВ, имеющими различные зенитные углы: 15°, 45° и 75°. Очевидно, что несмотря на одинаковую энергию первичных частиц, кривые свечения имеют совершенно различную форму, различные амплитуды и длительности.

Анализ больших наборов модельных данных показал, что длительность кривой свечения достаточно медленно изменяется с изменением энергии первичной частицы, но сильно зависит от величины зенитного угла. Типичные значения ширины кривой свечения на полувысоте колеблются от, приблизительно, 38 мкс для ШАЛ с зенитным углом 30° до 94 мкс для 80°.

На основе результатов моделирования можно разработать достаточно простые алгоритмы поиска ШАЛ в экспериментальных данных, что и было сделано в ходе подготовки эксперимента и последующего анализа данных.

На первом этапе поиска отбираются события с максимальным кодом

высокого напряжения, т.е. в наилучших условиях наблюдения с точки зрения фонового излучения. Сигнал должен удовлетворять ряду условий:

- скользящая сумма кодов АЦП должна была превышать фоновые значения по крайней мере на 96 единиц;
- т.н. длина смежности, используемая в триггере второго уровня детектора ТУС, должна была превышать значение 5;
- число осциллограмм, удовлетворяющих указанным условиям, не должно было превышать 16 в одном событии.

На следующем шаге среди отобранных таким образом событий была найдена более узкая выборка, удовлетворявшая ряду дополнительных условий, налагаемых на аппроксимации осциллограмм в активных каналах функцией Гаусса:

- максимум сигнала располагался между 72-м и 230-м тактами осциллограммы;
- полная длительность сигнала в каждом из активных каналов лежала в диапазоне от 27 до 144 мкс;
- множественный коэффициент корреляции R^2 , характеризующий качество аппроксимации, должен был превышать 0.8.

Эти условия были выработаны на основе изучения откликов прибора на нескольких тысячах модельных ШАЛ, и, при обработке данных первого года работы детектора на орбите, были отобраны 13 кандидатов в ШАЛ, удовлетворяющие этим условиям [117]. Среди этих событий оказалось и единственное событие, которое наиболее подробно обсуждается как кандидат в ШАЛ, ввиду метеорологических, фоновых и пр. условий регистрации (см. далее).

На следующем этапе был разработан более сложный алгоритм поиска событий, учитывающий также асимметричность кривой свечения (аппроксимация сшивкой двух функций Гаусса), наложены пределы на максимальные коды АЦП, число каналов, введено дополнительное сглаживание. Алгоритм тестировался и усовершенствовался на модельных событиях. Всего было отобрано 650 событий. После анализа

метеорологических условий, антропогенных источников в поле зрения прибора осталось – 116. И только в 11 из них была обнаружена кинематика сигнала, похожая на ожидаемую от ШАЛ, однако почти во всех случаях трек сигнала имел ориентацию близкую к направлению на ближайший аэропорт. Пять из этих событий были подробно рассмотрены в статье [118].

Единственное событие (TUS161003), в котором не была обнаружена корреляция между направлением перемещения сигнала по фокальной плоскости и направлением на какой-либо аэропорт, было зарегистрировано 3 октября 2016 г. над территорией штата Миннесота, США. Сигнал, зарегистрированный в данном событии, обладал целым рядом характеристик, схожих с ожидаемыми от ШАЛ, однако амплитуда оказалась столь велика, что исключала его интерпретацию в рамках современных представлений о КЛ ПВЭ. Детальному анализу этого события и его возможной интерпретации посвящена статья [119].

Событие-кандидат в ШАЛ было зарегистрировано в 05:48:59 UTC. Центр поля зрения детектора ТУС в момент регистрации имел географические координаты $44,08^\circ$ с.ш., $92,71^\circ$ з.д., примерно в 100 км на юго-восток от города Миннеаполиса.

На рис 3.22 представлена локализация полей зрения в момент регистрации TUS161003: всего детектора (зеленый квадрат), объединенного поля зрения 10-ти сработавших каналов в предположении точной временной привязки (желтая линия) и с учетом возможной десинхронизации ± 1 с (красная линия), вызванной соответствующей дискретизацией временной метки регистрации события.

Поле зрения сработавших пикселей удалено от крупных городов, аэропортов и других потенциальных источников антропогенного происхождения (анализ корреляции расположения зарегистрированных событий и аэропортов подробно обсуждается далее). Кроме этого, чтобы исключить в качестве возможного источника свечения процессы, связанные с атмосферным электричеством, с помощью ресурса US National Weather Service были подробно исследованы погодные условия в данном месте. Основной вывод данного анализа заключается в том, что во время наблюдения атмосферные условия были практически безоблачными (за

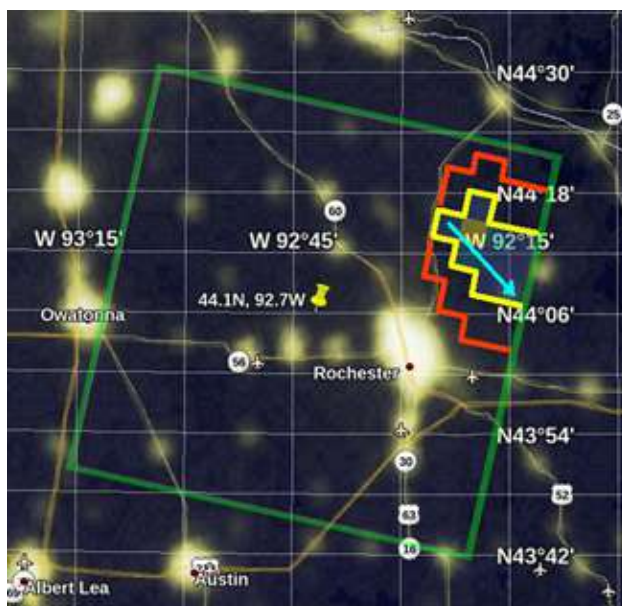


Рис. 3.22: Поле зрения детектора ТУС в момент регистрации события TUS161003 (карта Google Earth с данными NASA о ночном освещении). Стрелкой указано предполагаемое распространение источника (реконструированный трек). Желтой и красной линией обведено общее поле зрения сработавших пикселей при точной временной отметке и при десинхронизации ± 1 с.

исключением небольшого количества малых облаков на низких высотах). Молниевая активность в данном районе была изучена по данным сети Vaisala Global Lightning Dataset GLD360 с относительно высокой эффективностью детектирования разрядов. Оказалось, что в радиусе 930 км в интервале ± 10 с от момента регистрации сетью не зарегистрировано ни одного разряда. Все это указывает на то, что источник события TUS161003, скорее всего, имеет не грозовое происхождение.

На этапе распознавания сигнала были отобраны 10 сработавших каналов, и выделен сигнал в каждом из них. При этом были использованы результаты полетной калибровки для этих 10 каналов, представленные в таблице 3.1 (ϵ – чувствительность канала относительно (11,2), s – абсолютная чувствительность, G – коэффициент усиления ФЭУ, полученный в результате полетной онлайн калибровки, описанной в главе 1.).

На рис. 3.23 изображены активные сигналы и их аппроксимации би-гауссовой функцией (для удобства базовый уровень предварительно

Таблица 3.1: Калибровка 10 каналов детектора ТУС: первый ряд – идентификаторы канала в системе координат (номер модуля, номер канала), второй – коэффициент усиления ФЭУ, третий – относительная оптическая чувствительность, четвертый – коэффициент абсолютной чувствительности канала.

(md, ch)	(11,1)	(11,2)	(12,1)	(12,2)	(12,3)	(13,1)	(13,2)	(13,3)	(13,4)	(14,3)
$G \cdot 10^{-6}$	1,1	1,8	1,3	2,3	3,9	1,3	2,0	1,1	1,2	5,4
ϵ , отн.	1,3	1	0,6	0,5	0,5	1,3	0,5	0,7	0,7	0,9
s , мкс м ²	0,8	1,0	0,5	0,6	1,1	0,9	0,6	0,4	0,5	2,6

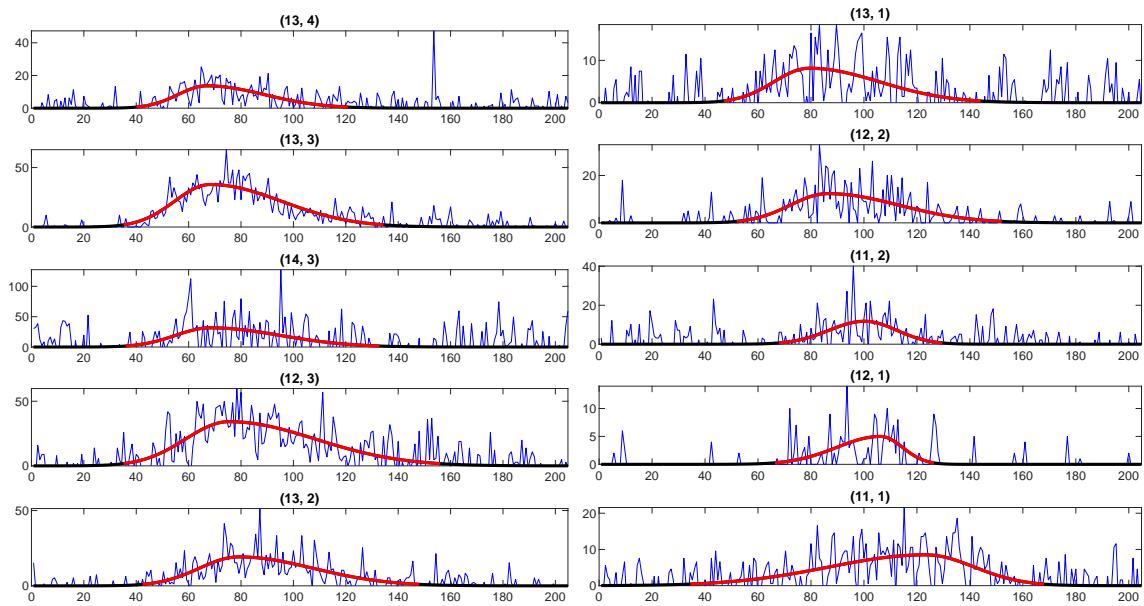


Рис. 3.23: Активный сигнал в сработавших каналах события TUS161003 (в заголовке каждого рисунка – идентификатор пикселя в системе (md, ch)). Красная линия – результат би-гауссовой аппроксимации. По оси абсцисс – время в мкс, по оси ординат – сигнал в фот./мкс м²).

вычтен). Полученные в результате этой аппроксимации параметры представлены в таблице 3.2 (здесь, также как и на рисунке, пиксели расположены в хронологическом порядке по моменту пика t_p). Медианное значение FДНМ составило 48 мкс, а общее время задержки между первым пиком и последним – 56 мкс.

Суммарный сигнал всех сработавших пикселей (кривая свечения) представлен как стек-гистограмма на рис. 3.24.

В результате анализа кинематических характеристик события были получены зенитный и азимутальный углы, характеризующие направление

Таблица 3.2: Параметры активных сигналов события TUS161003: расположение пикселя в системе координат (md, ch), положение пика во времени, его амплитуда и длительность FDHM.

(md,ch)	t_p , мкс	FDHM, мкс	I_p
(13,4)	66,9	38,9	27,9
(13,3)	68,2	48,0	81,2
(14,3)	68,2	47,0	12,1
(12,3)	75,3	58,3	30,5
(13,2)	79,1	51,2	34,9
(13,1)	79,3	46,9	9,0
(12,2)	86,3	48,3	20,9
(11,2)	100,2	30,2	11,8
(12,1)	104,8	40,9	7,6
(11,1)	123,3	64,5	10,6

прихода события:

$$\phi_{\text{rec}} = (50_{-10}^{+3})^\circ, \quad \theta_{\text{rec}} = (44 \pm 4)^\circ.$$

Так как событию TUS161003 трудно приписать грозное происхождение (см. выше), а проведенный кинематический анализ не противоречит гипотезе ШАЛ, то следующим этапом исследования данного события была оценка предполагаемой энергии E первичной частицы КЛ ПВЭ. Данная оценка проводилась двумя способами. Первый способ основан на приближенной аналитической формуле, связывающей интенсивность флуоресцентного свечения I_{fl} и E энергию первичной частицы.

$$I_{\text{fl}} = N_{\text{max}} \frac{c \eta_{\text{atm}} Y_{\text{fl}} \cos \gamma}{4\pi R^2 (1 + \cos \theta)}, \quad (3.3)$$

где N_{max} – число электронов (и позитронов), которое пропорционально энергии первичной частицы $N_{\text{max}} \approx E/1.45 \text{ GeV}$ [120], Y_{fl} – выход флуоресценции, η_{atm} – прозрачность атмосферы, c – скорость света, R – высота орбиты, θ – зенитный угол ШАЛ, γ – угол между направлением в надири и направлением на максимум ШАЛ, определяющий положение трека в поле зрения относительно его центра.

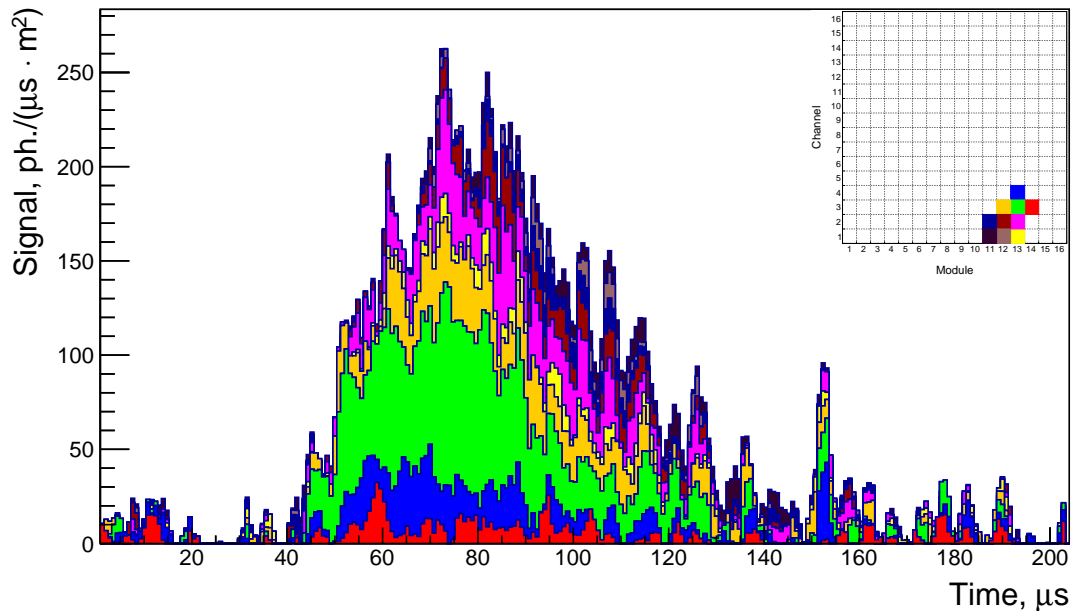


Рис. 3.24: Кривая свечения события TUS161003, построенная по 10-ти сработавшим каналам (показаны на вставке соответствующими цветами).

Если учитывать только релеевское рассеяние, то в диапазоне длин волн 320–400 нм коэффициент η при изменении высоты от 5 до 10 км лежит в пределах 0,6–0,85 (а выше 14 км становится больше 0,9). Выход же флуоресценции относительно постоянен в диапазоне высот 5–15 км и грубо может быть оценен как $Y_{\text{ф}} \sim 5$ фотон/м. В соответствие с этим для события TUS161003 с $R = 480$ км, при полученном ранее зенитном угле, имеем оценку амплитуды интенсивности свечения во входном зрачке 150–180 фотон/(мкс м^2) при $E = 1000$ ЭэВ (т.е. 10^{21} эВ = 1 ЗэВ). Однако данный расчет не учитывает вклада в сигнал многократного рассеяния, более аккуратные оценки приводят к амплитуде сигнала на уровне 200–240 фотон/(мкс м^2), т.е. значение, которое соответствует максимуму кривой свечения в событии TUS161003.

Во втором подходе при помощи пакета ESAF был промоделирован отклик детектора на события с близкими к TUS161003 направлениями прихода (с зенитными углами от 35° до 55° и азимутальными от 40° до 60°) для ШАЛ, образованных при попадании в атмосферу первичного протона с энергиями от 200 ЭэВ до 1000 ЭэВ (для каждого 200 ЭэВ было смоделировано 1000 событий). Усредненные значения амплитуды свечения во входном зрачке для каждого энергетического бина представлены в

таблице 3.3 в виде среднего и стандартного отклонения. Эти результаты согласуются с полученными первым способом для $E=1$ ЗэВ.

Таблица 3.3: Зависимость амплитуды кривой свечения от энергии первичного фотона для модельной базы данных (подробнее см. в тексте).

Энергия, ЭэВ	200	400	600	800	1000
$\langle I_m \rangle \pm \sigma_I$, фотон $\text{мкс}^{-1} \text{ м}^{-2}$	44 ± 2	88 ± 3	132 ± 5	176 ± 7	221 ± 9

Стоит также отметить, что данные оценки первичной энергии E являются оценками снизу, так как при отборе сработавших каналов, часть излучения, попавшая в соседние каналы, оказывается под-пороговой и не учтена.

Важной феноменологической особенностью события является то, что максимум излучения находится очень высоко в атмосфере. Анализ смоделированных кривых свечения ШАЛ с энергией 1 ЗэВ, показал, что должен наблюдаться резкий обрыв сигнала из-за того, что глубина максимума свечения находится ниже уровня моря. Этого не наблюдается в кривой свечения события TUS161003, показанной на рис. 3.24. Хорошо видно, что зарегистрированная кривая свечения не имеет крутого излома, который, как ожидается, произойдет при достижении фронтом ШАЛ поверхности Земли, а постепенно затухает. Также не наблюдается явного черенковского пика, следующего за максимумом кривой свечения примерно через 20–30 мкс. Интервал времени между максимумом кривой свечения и моментом затухания сигнала до уровня фона составляет ~ 60 мкс, что геометрически соответствует высоте $\sim 7,5$ км. Это позволяет оценить глубину максимума ливня как ~ 550 г/см².

Большую высоту максимума кривой блеска можно также получить, если рассматривать острый пик около 150 мкс как черенковский, см. рис. 3.24. Он имеет задержку от максимума кривой свечения ~ 70 мкс, а это означает высоту $\sim 8,5$ км, что соответствует глубине максимума ~ 480 г/см². Это число не может быть объяснено в предположении об обычном ШАЛ (от протонов и даже ядер железа) с энергией 100–1000 ЭэВ, поскольку его максимум при энергиях около 1 ЗэВ должен находиться значительно ближе к уровню земли.

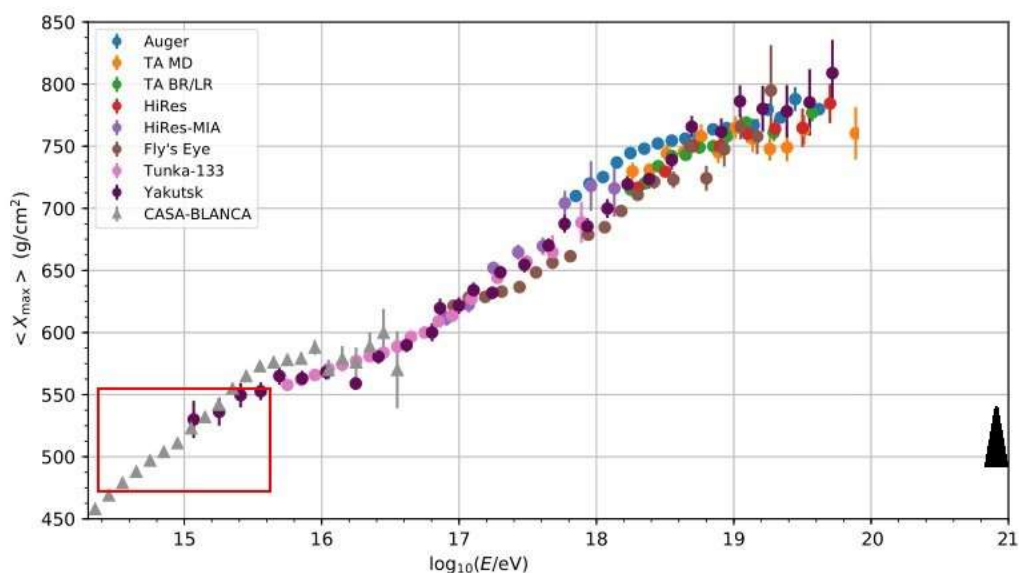


Рис. 3.25: Зависимость средней глубины максимума ШАЛ от энергии первичных космических лучей по данным различных экспериментов. Рисунок адаптирован из [97]. В красном прямоугольнике показан диапазон глубин максимума и соответствующих энергий, оцененных для события TUS161003. Черный треугольник показывает оценки для события TUS161003.

Если теперь нанести событие TUS161003 на экспериментальную зависимость средней глубины максимума ШАЛ от энергии первичной частицы, полученную по данным многих наземных экспериментов (см. рис. 3.25), то очевидно, что это событие выбивается из общего тренда. Видно, что при энергии порядка 1 ЗэВ глубина максимума соответствует ШАЛ с энергиями в районе 1 ПэВ.

Возможная астрофизическая интерпретация события TUS161003

В [119] был рассмотрен ряд искусственных источников, чтобы объяснить событие TUS161003, и показано, что только своеобразная конфигурация наземных вспышек способна воспроизвести кинематику и кривую свечения.

Однако остается возможность объяснения события астрофизическим явлением, так называемыми, релятивистскими пылинками. Для них должно выполняться важное условие, наблюдаемое в событии TUS161003, небольшая глубина максимума ШАЛ.

Впервые релятивистские пылинки были рассмотрены

Спитцером [121], а затем Хаякавой [122] как возможные источники КЛ ПВЭ самых высоких энергий. Идея была повторно рассмотрена в [123, 124] и [125] и ряде других исследований. В частности, было выполнено детальное моделирование ШАЛ, созданных релятивистскими пылинками [123, 124] с помощью кода AIREС³, сгенерировано несколько наборов ливней, каждый с разными Лоренц-факторами. ШАЛ были распределены в диапазоне энергий от 10^{18} эВ до 10^{20} эВ и равномерно набросаны на поверхность атмосферы в интервале зенитного угла от 0° до 60° . Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными, в частности с событием, зарегистрированным на Якутской установке 7 мая 1989 года [126]. Один из основных выводов работы заключался в том, что зависимость продольного профиля такого ШАЛ от Лоренц-фактора достаточно слабая, при одной и той же массе первичной частицы число вторичных частиц увеличивается с ростом γ , но интересно отметить, что для разных значений γ ШАЛ имеют схожее продольное развитие и достигают максимума около одной и той же глубины в атмосфере $X_{\max} \sim 350 \pm 47$ г/см².

В продолжение работы [123], было проведено аналогичное моделирование, но с акцентом на тяжелые и «сверхтяжелые» ядра, в том числе и релятивистские пылинки. Один из их результатов показан на рис. 3.26. Интересно, что форма профиля ШАЛ, индуцированного пылинкой с лоренц-фактором $\gamma = 4,5$, аналогична кривой свечения события TUS161003, показанной на рис. 3.24, а ее максимум находится на глубине ≈ 500 г/см².

Одним из ключевых компонентов исследований [124] была модель суперпозиции, которая предполагает, что ливень, создаваемый ядром с энергией E и массовым числом A , в среднем практически неотличим от суперпозиции A протонных ливней, каждый с энергией E/A . Модель является приближительной, но некоторые эксперименты показывают, что она может быть достаточно надежной. В частности, в [127] систематическое исследование множественности мезонов в зависимости от энергии при ядерно-ядерных столкновениях было проведено с использованием данных

³<http://aires.fisica.unlp.edu.ar/>

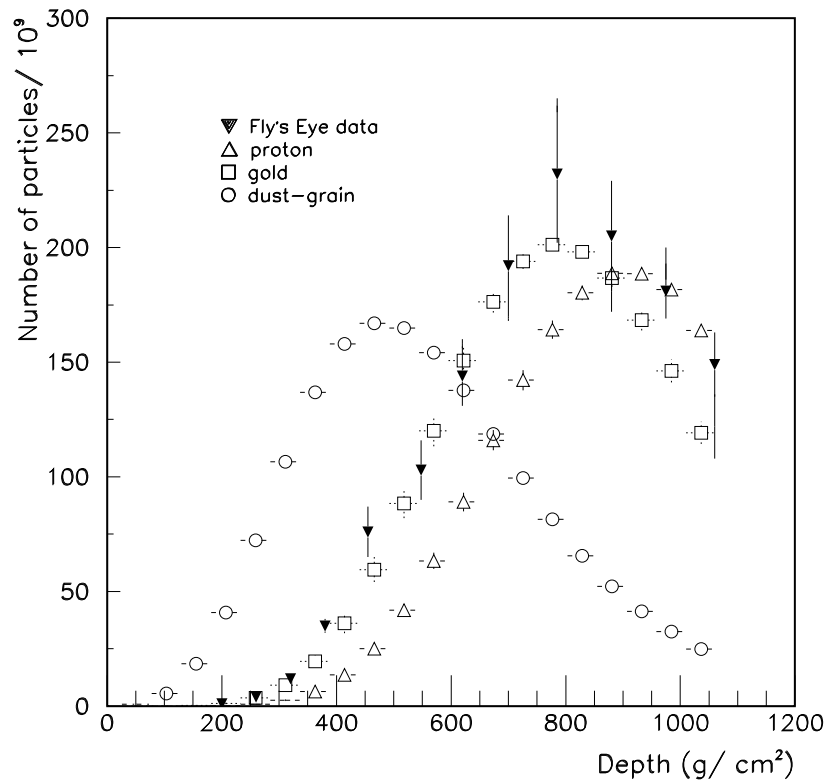


Рис. 3.26: Продольный профиль ливней с энергией 300 ЭэВ, генерируемых протоном, ядром золота и релятивистской пылинкой с $\gamma = 4,5$ вместе с данными КЛ ПВЭ самой высокой энергии, зарегистрированными Fly's Eys. Рисунок из [124].

космических лучей в ядерной эмульсии. Показано, что данные согласуются с моделью суперпозиции. Эксперименты дали одинаковые результаты по конечному распределению нуклонов по энергиям в двух случаях: когда учитывалась вся история фрагментации первичного ядра и когда учитывалось только деление первичного ядра с энергией E_0 на A нуклонов. Модель суперпозиции работала, если длина свободного пробега фрагментов кластера в воздухе была намного меньше длины свободного пробега нуклонов.

Предположим теперь, что на атмосферу падают скопления нуклонов (пылинки), содержащие $N_n = 10^6$ нуклонов в атомных и молекулярных состояниях, с первичной энергией $E_0 \approx 10^{21}$ эВ, энергия на нуклон соответственно – $E_n = E_0/N_n = 10^{15}$ эВ. Применяя модель суперпозиции, следует ожидать в качестве окончательной наблюдаемой картины сумму N_n ШАЛ с полной энергией, примерно равной E_0 , без учета энергии связи нуклонов в пылинке. Для ядер кремния с числом нуклонов в одном ядре

$A = 28$, энергия связи на нуклон около ≈ 8 МэВ и число нуклонов – составляющих пылинку $N_n = 10^6$, энергия, затраченная на распад всех составляющих кластера, будет порядка 10^{14} эВ, что ничтожно мало по сравнению с энергией пылинки.

В случае применения модели суперпозиции к первичным пылинкам важно иметь в виду, что молекулы и атомы релятивистских пылинок имеют очень малую длину свободного пробега поглощения в воздухе (10^{-5} – 10^{-4} г/см²) по сравнению со средней длиной свободного пробега поглощения ядер, которая равна 14 г/см² для железа и 25 г/см² для кремния (наиболее распространенные вещества пылинок в нерелятивистском диапазоне). Это означает, что атомный тип пылинки при столкновении с атмосферой очень скоро (на высотах порядка ста километров) меняет свою первоначальную форму на сумму N_n независимых нуклонов.

Таким образом, на основе принципа суперпозиции, можно предположить, что ШАЛ, генерируемый релятивистской пылинкой, состоящей из $\sim 10^6$ протонов с энергией около 1 ПэВ, может создать кривую свечения, аналогичную событию TUS161003. Однако надо иметь в виду и другой аспект: фотоэлектронная эмиссия оптическим и УФ-фоновым излучением, а также столкновения в межзвездной и межгалактической среде играют важную роль в разрушении релятивистских пылинок на своем пути, что значительно снижает вероятность того, что они являются причиной КЛ ПВЭ [128].

3.4. Результаты проекта «УФ атмосфера» в контексте регистрации КЛ ПВЭ

Детектор «УФ атмосфера» работает в непрерывном мониторинговом режиме, что позволяет существенно более подробно исследовать пространственную структуру квазистационарного свечения атмосферы. Данные в мониторинговом режиме, полученные в эксперименте, позволили провести первое сравнение с предполагаемыми фоновыми уровнями в будущих миссиях JEM-EUSO, «КЛПВЭ» и РОЕММА,

чтобы убедиться, что ранее рассчитанные характеристики основаны на правильных предположениях. В таблице 3.4 приведены результаты анализа интенсивности среднего УФ-излучения в различных условиях: ясная и облачная погода, море и суша, различные лунные фазы.

Таблица 3.4: Темп счета телескопа «УФ атмосфера» для разных условий наблюдения УФ-фона атмосферы.

Фаза Луны	Океан	Суша	Океан+ облачность	Суша+ облачность	Облачность
Новолуние	0,9	1,4	1,3	1,7	1,4
50 %	1,8	2,8	13,0	8,1	9,7
Полнолуние	37,6	35,1	35,1	51,1	51,0

Предполагая отсутствие луны и типичные соотношения доли земли/океана и ясной/облачной атмосферы, равные 30/70, средний уровень фона составляет 1,3 отсчета/пиксель/GTU (GTU – один такт измерения, равный 2,5 мкс). Это значение можно отмасштабировать для проекта JEM-EUSO с учетом соотношения полей зрения пикселя (L), оптических апертур (A) и эффективностей телескопов (ε) УФ атмосфера и JEM-EUSO (средние уровни фона для «КЛПВЭ» и РОЕММА получаются аналогично JEM-EUSO). Ожидаемое соотношение фона (R) между НА «УФ атмосфера» и JEM-EUSO составляет:

$$R = \left(\frac{L_{UV}}{L_{JE}}\right)^2 \times \frac{A_{UV}}{A_{JE}} \times \frac{\varepsilon_{UV}}{\varepsilon_{JE}} \quad (3.4)$$

где $L_{UV} = 6,3$ км, $L_{JE} = 0,55$ км, $A_{UV} = 0,05$ м², $A_{JE} = 4,5$ м², $\varepsilon_{UV} = 0,080 \pm 0,015$ (по предварительным результатам измерений) и $\varepsilon_{JE} = 0,085$. Это означает, что ожидаемое отношение УФ-фона должно быть $R = 1,4 \pm 0,3$, т.е. ожидаемое среднее значение фона для JEM-EUSO составляет $(0,93 \pm 0,20)$ отсчетов/пиксель/GTU. Это указывает на то, что среднее значение 1,1 отсчета/пиксель/GTU, принятое ранее для оценок экспозиции и пороговой энергии JEM-EUSO, находится в пределах текущей оценки и подтверждает надежность допущений, использованных ранее [129].

3.5. Выводы по главе 3.

По направлению исследования структуры УФ-свечения атмосферы, как фоновых условий для регистрации космических лучей предельно высоких энергий, и поиска кандидатов в ШАЛ получены следующие результаты:

1. Проведен анализ данных первого орбитального детектора КЛ ПВЭ ТУС, работавшего в составе научной аппаратуры спутника «Ломоносов» в 2016–2017 гг.
2. Экспозиция детектора ТУС составила $1500 \text{ км}^2\text{ср}$ год. Повышенная частота триггера наблюдается в областях антропогенной деятельности, грозовой активности и аврорального овала.
3. Проведен анализ работы триггерной системы детектора ТУС. Показана необходимость введения антитриггера на мгновенные треки, связанные с прохождением заряженных частиц через матрицу фотоприемника. Определены необходимые параметры антитриггера и показано, что при его введении частота ложных срабатываний, связанная с попаданием частиц в фотоприемник, уменьшается на порядок.
4. Зарегистрированы события-кандидаты в ШАЛ. Проведена оценка энергии события в предположении, что источник событий – КЛ ПВЭ. Показано, что энергия событий более 1000 ЭэВ , что превышает разумные значения для частиц КЛ ПВЭ. Однако на примере этих событий были проработаны алгоритмы реконструкции параметров первичной частицы и удалось показать принципиальную работоспособность орбитальной методики регистрации ШАЛ.
5. При интерпретации ШАЛ-подобного события TUS161003 как результата КЛ ПВЭ показано, что глубина максимума ШАЛ существенно ниже ожидаемых значений. Обсуждается возможная астрофизическая природа: потенциальный источник ШАЛ – релятивистская пылинка. В этом случае глубину максимума порядка 500 г/см^2 можно объяснить в рамках модели суперпозиции.

Глава 4. Транзиентное свечение атмосферы Земли¹

Детекторы, которые используются в данной работе (ДУФ на спутниках «Татьяна-1», «Татьяна-2» и «Вернов», ТУС на спутнике «Ломоносов», «АУРА» на спутниках «ВДНХ-80» и «ДЕКАРТ», а также «УФ атмосфера» на МКС), изначально были оптимизированы для регистрации флуоресцентного свечения молекулярного азота в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм). И оказалось, что измерения в этом спектральном окне эффективны для регистрации разнообразных атмосферных явлений грозовой и негрозовой природы. Это позволило впервые пронаблюдать УФ-транзиенты, которые в научной литературе в данный момент приобретают название BLUES и активно исследуются, т.к. являются индикатором внутриоблачных процессов, связанных с загадкой зарождения молнии. Высокое временное разрешение детекторов УФ-излучения позволяет проводить детальную пространственно-временную реконструкцию событий, что было невозможно при использовании обычных телевизионных камер, пусть и с высокой чувствительностью.

В этой главе диссертации описаны основные транзиентные явления в верхней атмосфере, УФ-транзиенты в облаках и над облачным покровом (BLUES), и представлены результаты, полученные в космических экспериментах МГУ по исследованию УФ-транзиентов с участием автора диссертации.

4.1. Введение

Транзиентное свечение представлено низковысотными молниевыми разрядами облако-земля, внутриоблачными и межоблачными разрядами,

¹Глава 4 написана на основе следующих работ из списка публикаций автора по теме диссертации: А1-А3, А5, А8, А13, А17, А22, А24, А26, А36, А37, А48, А50.

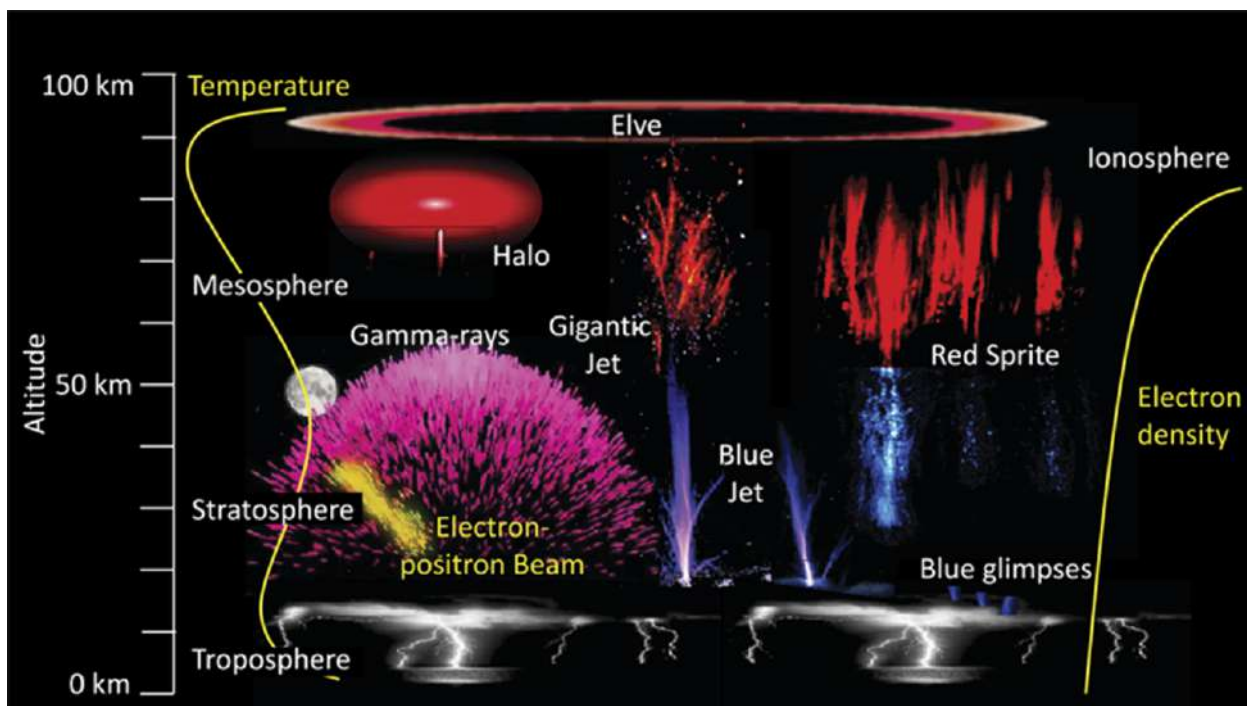


Рис. 4.1: Виды транзиентных атмосферных явлений.

высокоатмосферными транзиентными световыми явлениями (англ. TLE – Transient Luminous Events), внегрозовыми вспышками, механизм образования которых пока неизвестен. Схематически все разнообразие оптических явлений, сопровождающееся также гамма-излучением, представлено на рис. 4.1. К нему можно добавить еще внегрозовые вспышки, которые практически не изучены.

Важным аспектом, который зачастую не учитывается, является сложность и открытость системы, в которой происходят исследуемые процессы. В атмосфере Земли текут крупномасштабные электрические токи и происходит постоянное перераспределение зарядов. В течение долгого времени эти процессы квазистационарны (так называемая «хорошая погода»). Во время гроз за короткое время высвобождается большое количество запасенной электрической энергии. Она, в свою очередь, приводит к разнообразным явлениям как в атмосфере, так и за ее пределами. Разделение электрического заряда обусловлено сложными процессами, происходящими в грозовых облаках, а сопровождающие разряд явления замыкают глобальную электрическую цепь.

Воздействие на атмосферу энергичного ионизирующего излучения – космических лучей – оказывает существенное влияние на эти

процессы. Их влияние имеет как крупномасштабный характер (например, известный факт изменения ионосферного потенциала в связи с 11-летним циклом солнечной активности [130]), который проявляется на уровне мезомасштабных атмосферных структур (формирование облачности и грозových облаков [131]), так может иметь и очень локальное воздействие, например, связанное с ионизацией верхних слоев, высыпающимися частицами из радиационных поясов Земли, и последующим кратковременным оптическим свечением [132].

Некоторые разрозненные наблюдения электрических разрядов над грозами упоминаются и кратко описаны в конце 19 века в ряде работ [133–135]. Однако только после конца 1980-х, начала 1990-х годов целенаправленные и систематические научные исследования, с использованием современных детекторов, в том числе и спутниковых, а также средств компьютерного моделирования, позволили понять их пространственно-временную структуру, некоторые физические свойства и механизмы возникновения (например, [2, 136–140]).

Основными технологическими драйверами развития этой области исследования можно назвать:

1. Появление высокоскоростной оптической техники;
2. Возможность регистрации этих событий с орбиты Земли в космических экспериментах.

Первое позволило проводить исследования тонкой пространственно-временной структуры быстропротекающих атмосферных процессов с микросекундным и суб-микросекундным разрешением. Например, результаты, получаемые с помощью высокочувствительных изображающих фотометров, используемых в данной работе. Второе – проводить глобальные исследования: возможность вести регистрацию по всему Земному шару, что обеспечивает набор большой статистики и наблюдения в разнообразных регионах и условиях. Важным моментом, конечно, является то, что исследуемые высокоатмосферные процессы протекают над облачным покровом и, как правило, не видны при наземном наблюдении. Более того, при измерениях с орбиты Земли

практически нет необходимости учитывать влияние атмосферы (которое является весьма неопределенным без специальных дополнительных метеорологических измерений) на прохождение оптического излучения, т.к. верхняя атмосфера является разряженной и одинаково прозрачной для всех длин волн. Это делает возможным спектральные исследования.

Среди оптических эффектов низковысотной молниевой активности отметим лишь те, которые представляются наиболее интересными для наблюдения с орбиты Земли – внутриоблачные процессы, связанные с перераспределением зарядов. Это так называемые первоначальные пробои (Initial Breakdown, IB в англоязычной литературе) и компактные внутриоблачные разряды, КВР (Compact Intracloud Discharges, CID). Эти явления отражают динамику важных процессов происходящих в грозном облаке. Последние впервые описаны в работе [141] и являются самыми мощными источниками высокочастотного излучения (3–300 МГц). Однако они далеко не всегда сопровождаются последующим молниевым разрядом. Длительность КВР составляет 10–30 мкс, высота возникновения – 8–13 км, а размеры не превышают 1 км. Несмотря на мощное излучение в радиодиапазоне, никогда не наблюдались оптическое и УФ-излучения данных объектов. Вероятно, это связано с высотой их происхождения и спутниковые наблюдения позволят провести их регистрацию. КВР интересны еще и тем, что могут быть причиной возникновения высокоатмосферных транзиентных световых явлений ELVES, имеющих сложную пространственно-временную структуру, например, двойные ELVES. Указание на связь этих явлений содержится в работе [142].

Интересным оказывается распределение по высоте внутриоблачных разрядов. Так, в работе [143], показано, что распределение энергичных внутриоблачных разрядов (EIC events, energetic intracloud events) довольно широкое: от 7 до 20 км. Причем импульсы положительной полярности происходят ниже, чем отрицательной. А для отдельных событий реконструируемая высота получается вплоть до 30 км. Таким образом, эти события происходят в верхних слоях облаков, или даже выше – между верхним зарядовым слоем в облаке и экранирующим слоем заряда над грозой. Косвенным подтверждением таких высотных

мощных электромагнитных импульсов является регистрация двойных эльфов с большим временем задержки между кольцами. Такие события регистрируются в проекте ТУС и обсуждаются далее.

Более подробно остановимся на классе высокоатмосферных явлений, который тесно связан с грозовыми областями. Некоторые из них могут быть обусловлены воздействием заряженных частиц извне атмосферы (т.н. «top-down» модель происхождения TLE, связанная с повышением ионизации D-слоя ионосферы за счет высыпания электронов кэВ-ных энергий, и тем самым, понижения порога возникновения пробоя).

За время исследования TLE сложилась определенная классификация типов этих явлений, основанная на пространственно-временной структуре событий. Все эти явления происходят в верхних слоях атмосферы, над облачным покровом и, так или иначе, обязаны своим происхождением грозовой активности.

Наблюдаемые транзиентные световые явления представляют собой вспышки электромагнитного излучения в верхних слоях атмосферы Земли на высотах от 10 до 90 км. Время их протекания составляет 1–500 мс, а протяженность в высоту 10–100 км. Их характерной особенностью является широкий спектральный диапазон (от инфракрасного и видимого до ультрафиолетового, рентгеновского и даже гамма-излучения). Кратко опишем различные типы транзиентных явлений по существующим экспериментальным данным.

Спрайты (sprites).

Впервые это явление было зафиксировано в 1989 году при тестировании чувствительной камеры для экспериментов на большой высоте [2]. В поле зрения объектива попала гроза вдали. После просмотра записи были обнаружены воронкообразные вспышки света длительностью несколько миллисекунд, примерно в 30 км над облаками, которые были названы спрайтами.

Спрайты образуются почти в любую сильную грозу. Они представляют собой электрический разряд, образующийся на высотах от 40 до 90 км. Зарождаются они, как правило, после положительной

молнии между облаком и землей (которая переносит с облака на землю положительный заряд) [144]. Положительная молния, которая возникает между верхней частью грозового облака и поверхностью Земли, имеет больший зарядовый момент и ток, чем отрицательная, что делает образование спрайта после нее более эффективным [138]. Задержка между родительской молнией и спрайтом составляет в среднем около 30 мс, хотя может достигать значений до 200 мс [145]. Высота образования спрайта обусловлена тем, что в этой области, после молнии, электрическое поле изменяется и становится больше критического поля разряда. На больших высотах расположена, так называемая, диффузная зона спрайта (объемное диффузное свечение газа), ниже – стримерная (разряд развивается по стримерному механизму), а между ними – яркая переходная зона [8]. Общая длина спрайтов достигает 50 км, поперечные размеры 5–30 км, а длительность менее 17 мс [146]. Первые цветные фотографии данного явления были получены в ходе эксперимента Sprite94 [136], в котором наблюдение велось с двух самолетов (рис. 4.2). Спектральная область оптического излучения спрайта изменяется в зависимости от высоты. Это можно объяснить различным давлением, плотностью и составом атмосферы на разных высотах. На больших высотах преобладает красное свечение первой положительной системы молекулярного азота ($1PN_2$), а чем ближе к земле, тем более значительный вклад вносит свечение второй положительной системы молекулярного азота ($2PN_2$), которое происходит преимущественно в синем и УФ-диапазонах. Это связано с различием радиационного времени жизни разных возбужденных состояний азота и изменением плотности (частоты столкновений молекул) с высотой. Присутствие разных линий свечения в спектре обусловлено также распределением электронов, участвующих в процессе разряда, по энергии.

Подробные исследования пространственно-временной структуры спрайта были проделаны в работе [147]. На Рис. 4.3 видна динамика развития явления – зарождение на высоте порядка 70 км, непрерывное объемное диффузное свечение выше точки зарождения и развитие стримерно-лидерного процесса вниз. Временное разрешение (интервал между кадрами) – 200 мкс.

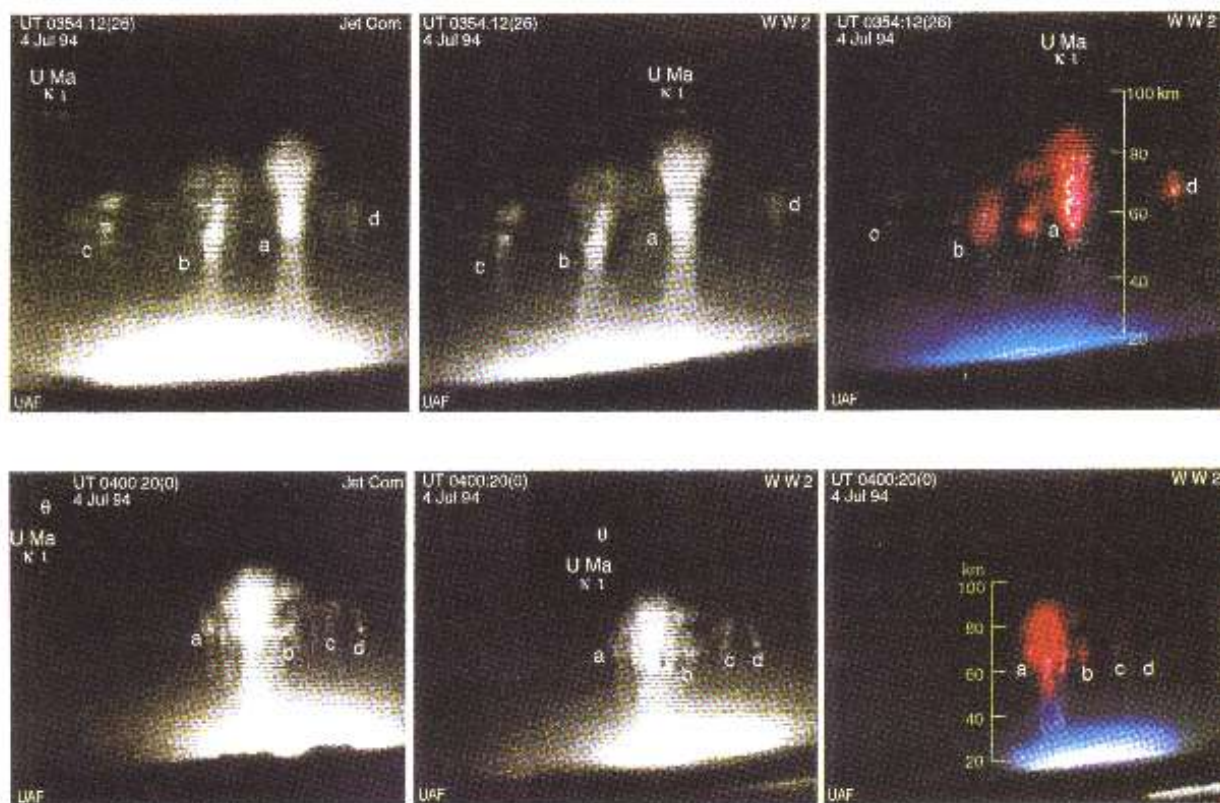


Рис. 4.2: Фотографии спрайтов, полученные в эксперименте Sprite94.

Спрайты чаще возникают сериями из 2–3 разрядов, и наиболее яркие события состоят из множества отдельных спрайтов (верхнее событие на Рис. 4.2). Расстояние между спрайтами в одной группе может составлять 50 км.

В отличие от стартеров, струй и гигантских струй, которые возникают либо глубоко внутри грозового облака, либо вблизи его вершины, и распространяются вверх в средние и верхние слои атмосферы, спрайты зарождаются на гораздо больших высотах, около 70–85 км, и в основном распространяются вниз. Они представляют собой электрические разряды, вызванные внезапным установлением сильного квазиэлектростатического электрического поля над грозовыми облаками из-за интенсивных ударов молний облако-земля [138].

Появление спрайтов над грозовыми облаками было предсказано еще лауреатом Нобелевской премии Ч.Т.Р. Уилсоном 90 лет назад [1]. Он предположил, что сильное электрическое поле может возникать над грозами из-за перераспределения зарядов при вспышках молнии или дисбаланса зарядов во время гроз. В экстремальных условиях

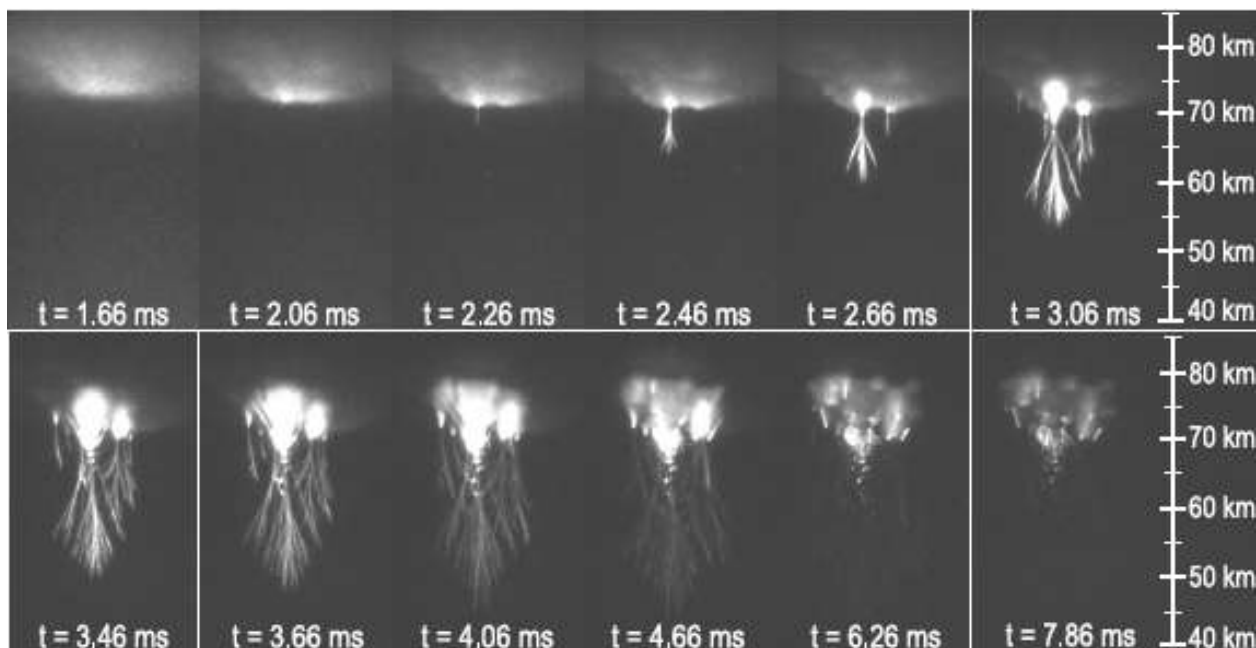


Рис. 4.3: Динамика развития спрайта [147]

электрическое поле может превышать порог электрического пробоя воздуха на больших высотах, что приводит к электрическим разрядам или спрайтам. Рис. 4.4 иллюстрирует эту идею, показывая сравнение высотного профиля электрического поля, создаваемого ударом облако-земля, с пороговым полем обычного электрического пробоя (E_k). До удара электрическое поле над грозовой областью очень мало из-за коллективного действия зарядов в облаке, пространственных зарядов, индуцированных в проводящей атмосфере, и их отображения в земле. Удар молнии быстро нейтрализует определенное количество положительного или отрицательного заряда внутри облака. Это эквивалентно введению такого же количества заряда, но противоположной полярности в том же месте. Простейшей моделью для оценки электрического поля, создаваемого ударом молнии облако-земля, является электрический диполь, состоящий из эквивалентного заряда, переносимого молнией на высоту облака, и его отображения в земле. Сплошная линия на Рис. 4.4 показывает дипольное поле, создаваемое облачным зарядом 100 Кл на высоте 10 км. Поле уменьшается с высотой пропорционально $1/r^3$. Обычное пороговое поле пробоя E_k , с другой стороны, падает экспоненциально с увеличением высоты, потому что оно пропорционально плотности воздуха, которая экспоненциально уменьшается с высотой. Следовательно, на определенной

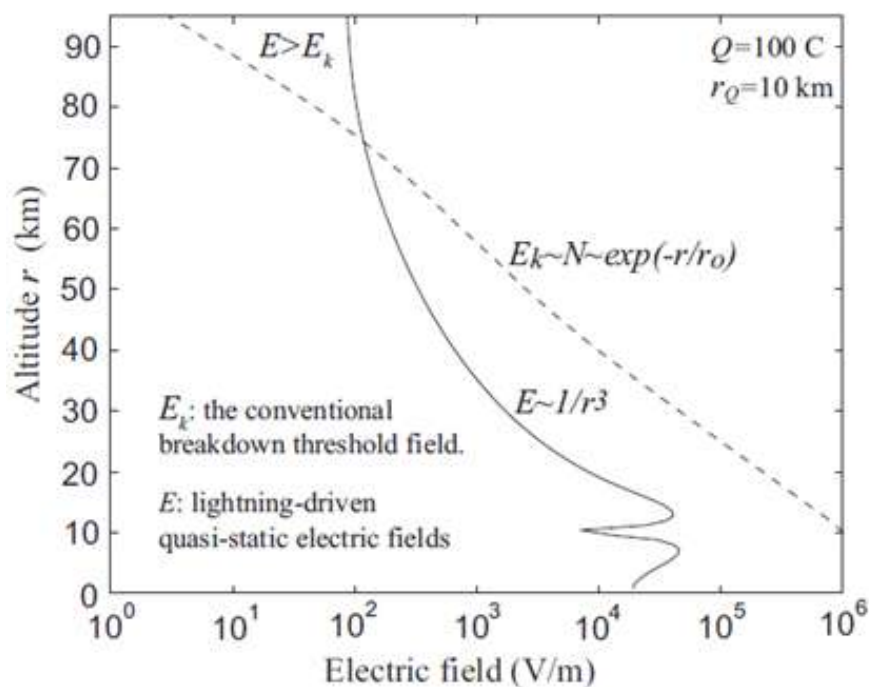


Рис. 4.4: Динамика развития спрайта [147]

высоте электрическое поле превысит пробойное значение, что приводит к электрическим разрядам над грозовыми облаками.

Голубые струи (Blue Jets).

Первое черно-белое изображение подобной вспышки было получено в 1990 году [148] с борта шаттла, производившего измерения над грозами в разных областях Земного шара. В 1994 году американские ученые в ходе эксперимента Sprite94 подтвердили существование таких явлений и назвали их голубыми струями. Первое видео голубой струи было записано во время сильной ночной грозы в Арканзасе (США) с помощью монохроматических и цветных видеокамер с двух самолетов, перемещавшихся вокруг грозы [137].

Голубые струи – более редкое явление, чем спрайты. Они похожи на конусообразные вспышки с углом раствора примерно 15° , распространяющиеся от облака вверх (Рис. 4.5). Голубые струи образуются на высоте 15–20 км, и их вертикальная протяженность примерно 40 км. Длительность составляет около 200 мс, а скорость распространения от облаков вверх достигает 100 км/ч [137].

Интересен тот факт, что в литературе есть указания на то, что

голубые струи не являются прямым следствием молний облако-земля, хотя и образуются в грозовых районах [149].

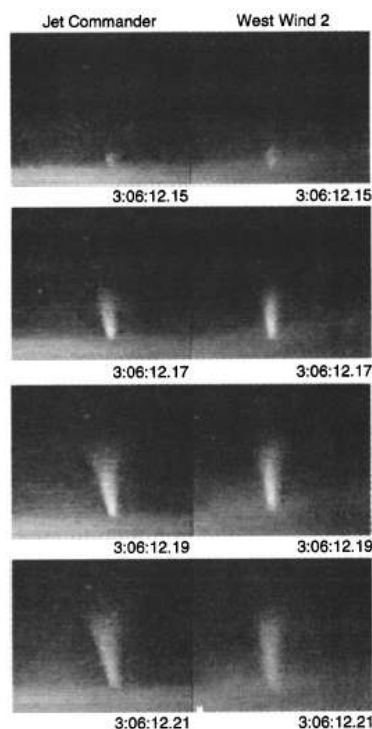


Рис. 4.5: Фотографии голубых струй, полученные в эксперименте Sprite94.

Гало (Halo).

Гало представляют собой однородное диффузное свечение, которое обычно появляется в течение 1–2 мс после интенсивного удара молнии типа облако-земля (CG-молнии) и длится несколько миллисекунд [150–152]. Обычно гало сосредоточены на высоте 75–80 км с протяженностью по горизонтали в десятки километров, а по вертикали в несколько километров. Они могут происходить как отдельное событие, а могут следовать за эльфами и/или спрайтами. Интенсивные удары CG-молний как положительной, так и отрицательной полярности могут эффективно вызывать гало [153, 154].

Эльфы (ELVES).

ELVES (Emission of Light and Very Low frequency perturbations from Electro-magnetic pulse Sources) представляют собой довольно слабое оптическое излучение, имеющее форму расширяющегося кольца, диаметр которого может достигать 400 км. Они возникают на большой высоте

(100 км) и длятся очень короткий промежуток времени – менее 1 мс. Это объясняет, почему они долгое время не наблюдались экспериментально.

Впервые явление типа ELVES было зафиксировано в 1990 году во время сильной грозы у берегов Французской Гвианы [148]. Прошло несколько лет прежде чем удалось повторно обнаружить подобное явление. Большая статистика ELVES была получена только в спутниковом эксперименте ISUAL. Оказалось, что они являются самыми часто встречаемыми из всех типов ТАЯ и 80 % таких событий происходят над океанами [9]. Пример события, зарегистрированного в этом эксперименте, показан на рис. 4.6 [155].

Механизмом образования ELVES является нагрев электронов нижних слоев ионосферы (75–100 км) за счет мощного электромагнитного импульса от обычных молний облако-земля. Измеряемая на экспериментах задержка между молниями и эльфами равна времени распространения электромагнитной волны (около 450 мкс) [155].

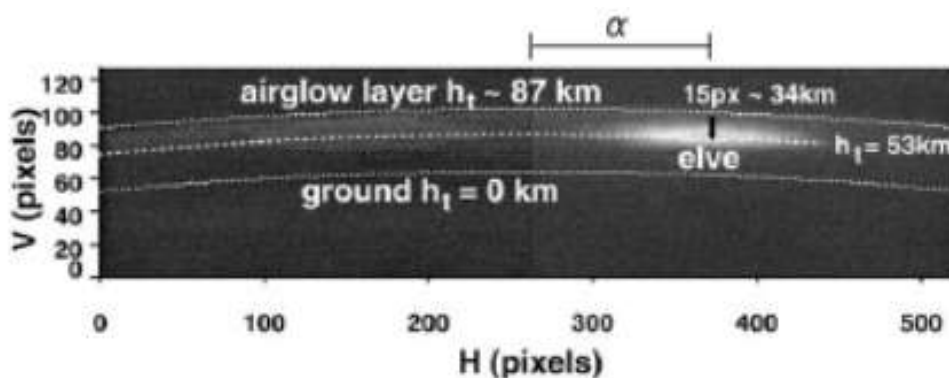


Рис. 4.6: Изображение эльфа, полученное в эксперименте ISUAL.

Важно отметить, что ELVES могут служить индикатором процессов внутри облака, поскольку их структура и яркость свечения напрямую связаны с протекающими процессами, создающими мощный электромагнитный импульс (ЭМИ). Так, например, по задержке между двумя кольцами двойного ELVES можно определить положение источника ЭМИ.

Учитывая, что и ELVES, и гало на видеокамерах выглядят как краткие диффузные свечения в нижней ионосфере, обычно трудно отличить одно от другого на видеозаписях со стандартной частотой

кадров и даже немного выше [156, 157]. Поэтому, значительно более качественную информацию о пространственно-временной динамике дают последние спутниковые наблюдения с помощью высокочувствительных телескопов высокого временного разрешения, в том числе и проекты НИИЯФ МГУ [14, 42, 59].

Гигантские струи (Gigantic Jets).

Первая регистрация гигантских струй была произведена в 2003 году во время грозы над Южно-Китайским морем [3]. Наблюдения велись с помощью наземных камер с низким пороговым уровнем света (low-light-level camera).

Гигантские струи – самые большие, длительные и редкие транзиентные явления – образуются на высоте примерно 20 км, их протяженность составляет 60–80 км, а длительность достигает 500 мс. Скорость распространения в лидерной стадии на порядок выше, чем у голубых струй и сравнима со скоростью лидера в молниевых разрядах облако-земля – около 1000 км/с. Диапазон энергий таких явлений $10\text{--}10^3$ кДж [3].

По структуре гигантскую струю можно разделить на две части. Нижняя напоминает обычную голубую струю, а верхняя имеет древовидную форму. Гигантские струи соединяют облако с ионосферой, занимая все пространство между ними.

Гигантские струи не связаны с конкретной CG-молнией, но связаны с активностью внутриоблачных разрядов [3, 158, 159]. Сопровождающие вспышки внутри облаков хорошо видны на видео, записанных с близкого расстояния. Например, в работе [158] для семи исследованных восходящих электрических разрядов (один стартер, две струи и четыре гигантских струи), частота событий внутриоблачных разрядов по данным NLDN внезапно возрастала на коротком временном интервале 1–2 с, содержащем каждое событие, а вот активность CG-молний была обнаружена NLDN только для одного из событий гигантской струи. Восходящие электрические разряды могут быть как положительной, так и отрицательной полярности в зависимости от полярности иницирующего

восходящего лидера. Для грозовых облаков с нормальной полярностью (т.е. основной слой положительного заряда облака находится над его основным слоем отрицательного заряда), если инициирующий восходящий лидер начинается между основным отрицательным зарядом и верхним положительным зарядом, результирующее событие имеет отрицательную полярность; если оно начинается между верхним положительным зарядом и верхним экранирующим зарядом облака, то результирующее событие имеет положительную полярность. Если облако имеет обратную полярность, полярность события обратная.

По данным эксперимента ISUAL на борту спутника FORMOSAT-2 самыми распространенными транзиентными явлениями являются эльфы: 80 % от всех зарегистрированных TLE. 20 % событий составляют спрайты и гало спрайтов, количество гигантских джетов на два порядка меньше, чем спрайтов [160]. Географическое распределение частоты регистрации транзиентов разного типа приведено на Рис. 4.7. Общая энергия, высвобождаемая в верхней атмосфере за счет транзиентных световых явлений, зарегистрированных в эксперименте ISUAL, составляет ~ 700 МДж/мин [161]. Причем авторы работы оценивают эту цифру как нижнюю границу, и полагают, что эта энергия может быть на два порядка больше, если учесть, что 10 % всех молний производят TLE.

Двумя важными факторами, определяющими динамику TLE, являются величина электрического поля и время его существования в соответствующих областях атмосферы. Ускоренные электроны, приводящие к TLE, получают энергию от электрического поля и теряют энергию в результате столкновений с нейтральными атомами. Плотность воздуха также является важным параметром поскольку в значительной мере определяет частоту столкновений. С другой стороны, продолжительность существования электрического поля зависит от проводимости атмосферы. На рис. 4.8 показаны высотные профили плотности воздуха и проводимости атмосферы от 0 км до 100 км над уровнем моря. Плотность воздуха экспоненциально убывает с высотой. Профиль атмосферной проводимости разбит на две области: область преобладания ионной проводимости ($< \sim 65$

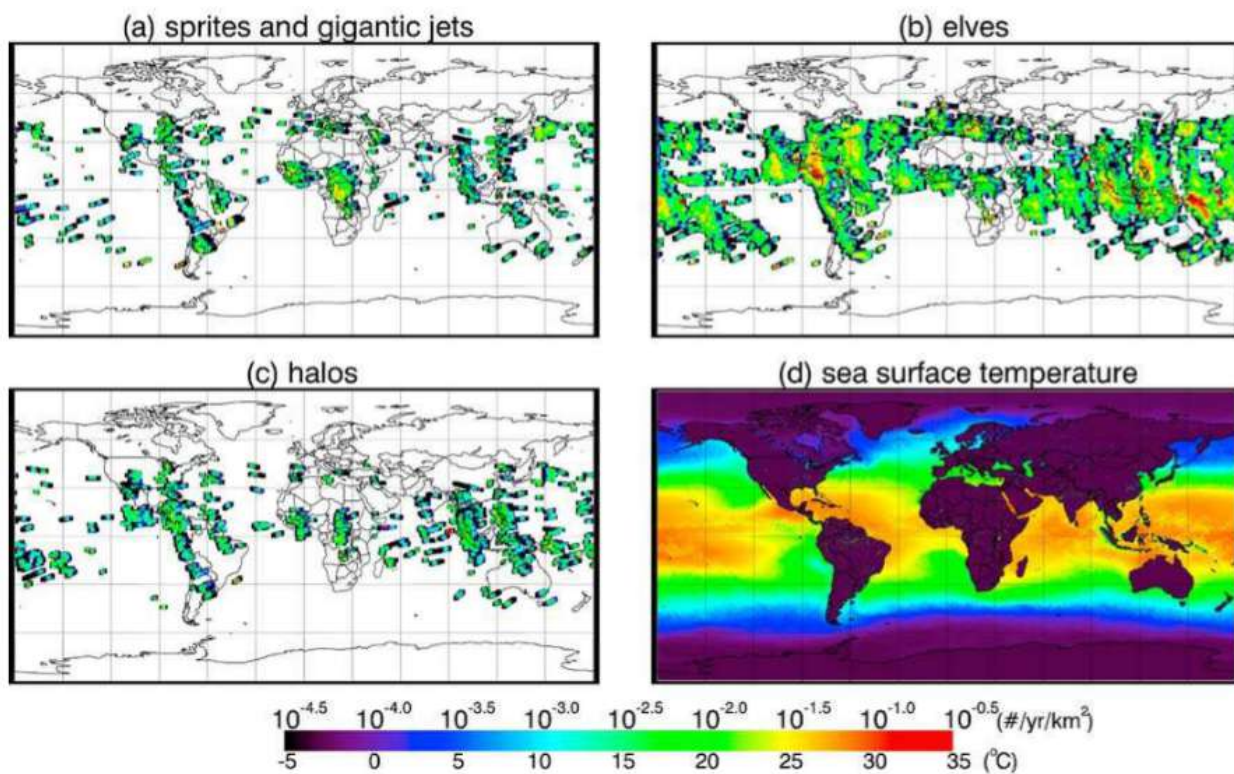


Рис. 4.7: Частота регистрации ТАЯ разного типа в эксперименте ISUAL [160].

км) и преобладания электронной проводимости ($> \sim 65$ км). Время существования электрического поля на определенной высоте примерно равно локальному максвелловскому времени релаксации (ϵ_0/σ , где σ – локальная проводимость, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума). Локальное максвелловское время релаксации, рассчитанное с использованием проводимости, показанной на рис. 4.8, составляет < 1 мс на высоте 80 км, 1–10 мс на высоте 70 км и ~ 1 с на высоте 30 км, и определяет характерное время жизни электрического разряда на этих высотах: < 1 мс для эльфов, ~ 2 мс для гало, 1–10 мс и иногда сотни мс для спрайтов, сотни мс для струй и гигантских струй. Следует отметить, что профиль проводимости ионосферы между высотами 60 и 90 км существенно меняется от дня к ночи и от низких широт к высоким. Профиль, показанный на рис. 4.8, – это лишь пример типичного профиля, используемый в исследованиях TLE.

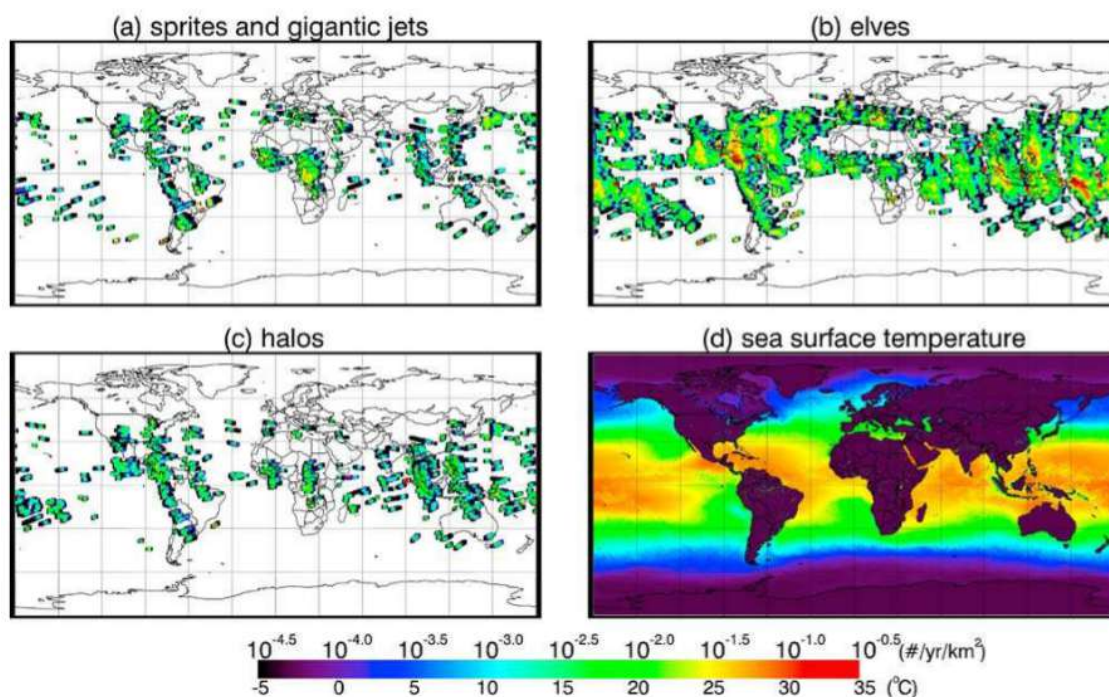


Рис. 4.8: Высотные профили плотности нейтральной атмосферы и проводимости.

4.2. Транзиентные атмосферные явления типа ELVES

ELVES являются наиболее удобным типом TLE для наблюдения с орбиты Земли в направлении на лимб. Их характерный пространственно-временной паттерн – расширяющееся кольцо свечения – позволяет их легко идентифицировать, а также вычислять кинематические характеристики с целью определения местоположения источника ЭМИ. В наземных наблюдениях регистрация события типа ELVES ведется под углом к горизонту (в направлении в зенит ELVES скрыт облачным покровом), поэтому выглядит он как расширяющееся диффузное свечение на горизонте, а временная структура сигнала – два последовательных широких импульса, соответствующих ближнему и дальнему, от наблюдателя, полукольцам [162].

Детекторы УФ-излучения на спутниках «Татьяна», «Татьяна-2» и «Вернов» не обладали пространственным разрешением, и идентификация типов ТАЯ была крайне затруднительна. В этом, приборы следующего поколения (ТУС и «УФ атмосфера») существенно отличаются. Пространственное и высокое временное разрешение позволило

провести наблюдения отдельных видов TLE, в частности, событий типа ELVES.

За время экспозиции детектора ТУС $1,2-1,4 \cdot 10^3$ км² ср год ожидалась регистрация нескольких десятков таких событий. Всего в экспериментальных данных было обнаружено 26 событий типа ELVES [14]. В поле зрения детектора попадает лишь дуга (часть кольца), а центр кольца указывает направление на молниевый разряд. На рис. 4.9 представлен пример регистрации события типа ELVES 23.08.2017 над Тихим океаном ($8,03^\circ$ с.ш., $131,34^\circ$ з.д.). Приведены изображения в три момента времени, разнесенные на 32 мкс друг от друга, и осциллограммы сигналов в трех каналах фотодетектора.

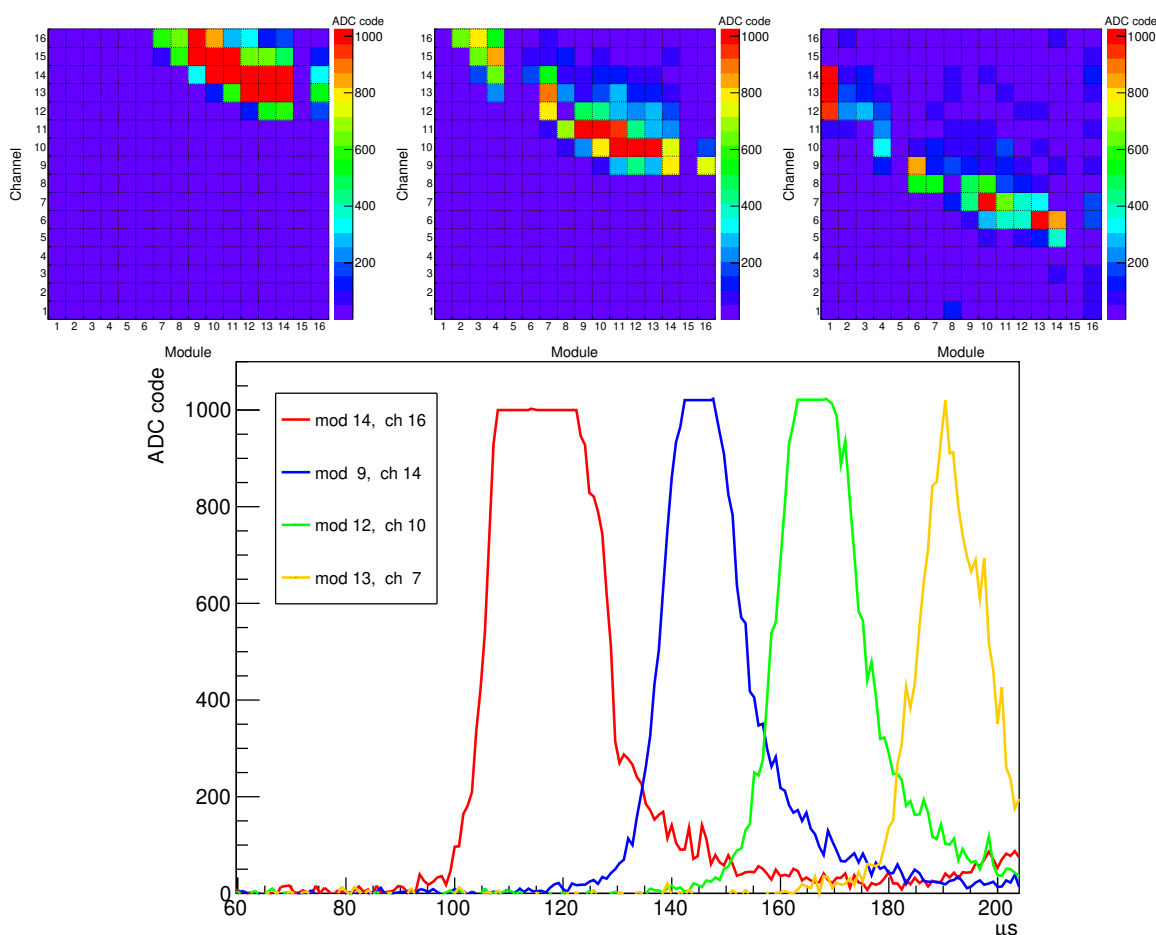


Рис. 4.9: Пример события типа ELVES, зарегистрированного детектором ТУС 23.08.2017. Сверху: Изображения события (карты каналов фотоприемника) для трех последовательных моментов регистрации события (136 мкс, 168 мкс и 200 мкс от начала записи). Снизу: кривая свечения нескольких каналов фотоприемника.

Яркость ELVES пропорциональна мощности молний (пиковому

значению тока обратного удара). В процессе генерации обсуждается наличие порогового эффекта. Так, в работе [163] экспериментально показано, что молниевые разряды с силой тока более 57 кА всегда сопровождаются событиями типа ELVES, тогда как при разрядах менее 30 кА вероятность генерации ELVES не превышает 50 %. Однако это может быть простым следствием недостаточной чувствительности аппаратуры к слабому сигналу ELVES от молнии с малым током обратного удара. Поэтому происхождение эльфов малой мощности, зарегистрированных над океаном, представляет особый интерес. Благодаря применению оптической системы с огромной апертурой – на 4 порядка больше, чем в традиционных видеокамерах – детектор ТУС позволяет регистрировать ELVES малой яркости. Например, для события, показанного на рис. 4.9, по данным наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 [164, 165], зарегистрировано 2 молнии со значениями тока обратного удара -28 кА и $+34$ кА, а для другого события, зарегистрированного 15.08.2017 в 14:49:24 UTC, координаты $41, 46^\circ$ ю.ш.; $115, 9^\circ$ в.д., значение пикового тока обратного удара молнии и вовсе составило $-10,5$ кА.

Всего, для 16 событий типа ELVES были доступны данные наземной сети Vaisals GLD360. Сводная информация представлены в таблице 4.1 Приведено число молний в течение минуты (N_l), расстояние до ближайшей молнии (d) и значение максимального пикового тока обратного удара.

Для сравнения с другими экспериментами оценим яркость этого события. Оценку общего количества фотонов можно провести по суммарному сигналу всех сработавших пикселей во время записи. Сумма всех кодов АЦП за вычетом среднего уровня фона – $\sim 2,5 \cdot 10^6$. Это число соответствует $\sim 10^7$ фотонов на поверхности фотодетектора во время события. Учитывая высоту орбиты спутника (~ 500 км), площадь зеркала и, предполагая, изотропность излучения в источнике, получаем число фотонов, испускаемых в атмосфере: $N_{ph} = 10^{18}$. В этом расчете не учтены поглощение и рассеяние атмосферы, полагая, что ELVES развивается на высоте 80–90 км и прозрачность остаточной атмосферы близка к 1 даже в УФ-диапазоне длин волн. Оцененное число фотонов получилось на 4 порядка меньше, чем измерено в предыдущих экспериментах по

Таблица 4.1: Данные сети Vaisala GLD360 о молниевой активности для 16 событий типа ELVES, зарегистрированных детектором ТУС.

№	Дата	Время (UTC)	Широта; Долгота	N_l	d, км	Полярность и значение пикового тока, кА
1	07.09.2016	09:51:35	-11,62; -161,69	8	163,6	+64,5
2	18.09.2016	22:06:48	9,66; 17,14	19	125,2	-135,1
3	18.10.2016	13:20:11	15,07; 149,26	1	218,3	-327,4
4	12.12.2016	15:20:20	-11,74; 115,30	9	137,2	+101,3
5	14.12.2016	01:55:08	-21,60; -44,78	5	217,3	-210,3
6	10.04.2017	13:06:59	-5,68; 148,404	20	90,7	-161,7
7	05.05.2017	17:23:10	-0,462; 84,791	9	243,5	-217,1
8	07.06.2017	19:29:38	17,181; 55,166	2	248	-171,7
9	14.06.2017	22:27:38	42,033; 14,909	7	165	-192,5
10	07.07.2017	15:13:12	7,794; 117,74	20	175,1	+132,4
11	04.08.2017	16:26:20	24,747; 101,527	5	96,6	-286,1
12	10.08.2017	10:42:09	-10,47; -177,163	7	275	+43,2
13	15.08.2017	14:49:24	-41,47; 115,897	1	92,4	-10,5
14	19.08.2017	17:31:58	-4,23; 81,087	4	389,2	-204,2
15	22.08.2017	05:03:24	21,698; -88,373	10	235,1	-120,2
16	23.08.2017	07:47:47	8,03; -131,34	2	115	-28

регистрации эльфов [9]. Большая апертура оптической системы детектора ТУС позволяет измерять слабое излучение TLE, таких как ELVES, создаваемых разрядами молний с низким значениями пикового тока обратного удара. Ранее подобные «тусклые» события не наблюдались из-за относительно высоких порогов регистрации.

Другим интересным объектом, зарегистрированным детектором ТУС являются двойные и многократные ELVES. Ранее эти события регистрировались в наземных экспериментах [157]. Двойной ELVES – это отклик ионосферы на мощные компактные внутриоблачные разряды (КВР) [166], которые происходят в верхней части облака, имеют длительность 20–30 мкс и производят мощный электромагнитный импульс (ЭМИ). Прямое излучение создает первую волну ионизации и кольцевое свечение, а отраженное от Земли – второе. Детектор ТУС впервые наблюдал с орбиты Земли такие события: в течение длительности развертки осциллограмм 200 мкс наблюдаются два кольца и больше, следующих одно за другим с разрывом во времени около 50–60 мкс, с общим центром. Пример события показан на рис. 4.10. На карте каналов отчетливо видны два отдельных кольца. Эти кольца соответствуют двум пикам на осциллограммах, показанных в правой части рисунка (для сравнения приведены сигналы двух каналов). Первый пик ярче. Он соответствует взаимодействию ионосферы с прямой электромагнитной волной от молнии. Второй пик вызван электромагнитным излучением молнии, которое отражается от поверхности Земли.

Время задержки между двумя кольцами определяется геометрически и позволяет провести оценку высоты источника ЭМИ [111, 167].

$$c\Delta t = [L^2 + (H + h_{\text{EMP}})^2]^{1/2} - [L^2 + (H - h_{\text{EMP}})^2]^{1/2},$$

где L – расстояние между центром поля зрения пикселя и проекцией положения источника на землю, H – высота слоя ионосферы, где развивается ELVES, а h_{EMP} – высота источника ЭМИ.

Если измерить Δt , то возможно определить h_{EMP} , имея информацию о H и L . Оценка H хорошо известна из многочисленных наблюдений

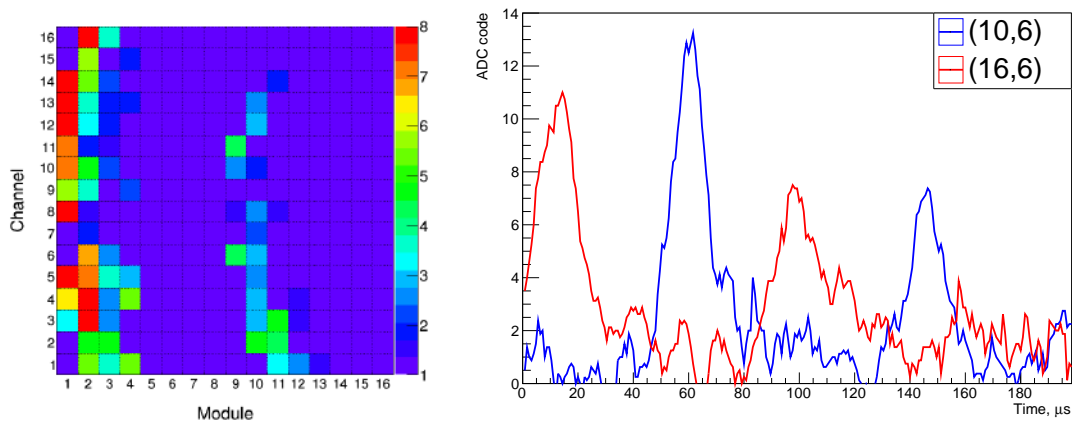


Рис. 4.10: Двойной ELVES, зарегистрированный детектором ТУС 10 апреля 2017 года. Слева: карта каналов, видны два ярких кольца. Справа: осциллограммы сигналов двух каналов (10,6) и (16,6) (синяя и красная линии), каждый из которых состоит из двух пиков с временной задержкой ~ 85 мкс.

ELVES. Например, в [168] продемонстрировано, что высота ELVES колеблется от 83 км до 93 км со средним значением 87,1 км. Неопределенность L намного больше. Грозы имеют значительную площадь (более 100 км в диаметре), что означает и большую площадь облачности. В этом случае трудно точно определить L . Оценку L можно получить из данных наземных сетей регистрации молний, например, Vaisala GLD360, в момент измерения двойного эльфа.

Оценки высоты ЭМИ были сделаны для событий, зарегистрированных детектором ТУС, и для некоторых из них получены достаточно большие значения (>20 км), что довольно необычно, поскольку находится выше тропопаузы. В частности, для события, показанного на рис. 4.10 $h = 25 \pm 7$ км. Однако возможность таких значений высоты разряда подтверждается некоторыми измерениями других групп [143, 169], но требует дальнейшего исследования. В частности, эта работа продолжена в космическом эксперименте «УФ атмосфера». За 4 года работы на орбите зарегистрировано порядка 30 событий типа ELVES, среди которых 9 двойных (2 кольца), один тройной и 3 события имеют 4 кольца [170–172].

4.3. УФ-вспышки (BLUES)

Особый интерес вызывают наблюдения, проводимые в синем и ближнем УФ-диапазоне, поскольку этот спектральный диапазон ассоциируется с внутриоблачными и надоблачными процессами, которые могут иметь важное значение в механизме зарождения и формирования молниевых разрядов.

Пожалуй, одними из первых наблюдения необычных разрядов были сделаны в ходе кампании наземных оптических наблюдений STEPS (Severe Thunderstorm Electrification and Precipitation Study) [134]. Было зарегистрировано 17 компактных (не более 200 м в диаметре и 1 км в высоту, длительность 33–136 мс) восходящих вспышек. При этом еще 83 более компактные вспышки, в отдельных пикселях фотоприемника произошли в течение 20 минут наблюдений. Эти вспышки все происходили на поверхности конвективной зоны. Длительность отдельных вспышек не более 16 мс. В отличие от уже описанных голубых струй и стартеров, они более компактные, происходят непосредственно у верхней границы облака, и чтобы отличить их, авторы дали им название «gnomes» («гномы»). На рис. 4.11 показаны примеры наблюдения таких событий.



Рис. 4.11: Слева: один из 17 зарегистрированных разрядов типа «гном» из [134]. Справа: схематическое расположение коротких (< 16 мс) вспышек света, которые появились над той же конвективной зоной, что и «гномы».

Совместные оптические наблюдения и локация электромагнитных импульсов в УКВ диапазоне с помощью системы LMA (Lightning Location Array) продемонстрировали, что короткие вспышки излучения над облаками (типа стартеров или гномов) являются биполярными разрядами, которые возникают между верхней областью положительного заряда

и отрицательным экранирующим зарядом на вершине облака [173]. Отрицательный пробой распространяется вниз, в сторону слоя положительного заряда в облаке, в то время как положительный пробой распространяется вверх, примерно на 1 км, пока не выходит из верхней части облака в виде лидероподобных каналов со стримерными зонами.

Появлению оптического излучения над облаком предшествуют как молния облако-земля, так и множественные внутриоблачные разряды. Внутриоблачные разряды, по-видимому, ограничивали значение положительного заряда верхнего слоя облака, что не позволило развиваться полноценному голубому джету.

В орбитальных экспериментах синие разряды (BLUES) были зарегистрированы при наблюдении на лимб в проекте ISUAL на спутнике FORMOSAT-2 [174], и впервые показана их возможная взаимосвязь с узкими биполярными событиями (Narrow Bipolar Events, NBE).

С борта Международной космической станции (МКС), в эксперименте Thor, были сфотографированы различные синие разряды, в том числе разряды километрового масштаба в верхнем слое облаков на высоте ~ 18 км, голубые стартеры и пульсирующие голубые джеты, распространяющиеся в стратосферу [175].

Самые последние измерения УФ-транзиентов проведены в космическом эксперименте ASIM на борту МКС. В составе научной аппаратуры работает прибор MMIA (Modular Multispectral Imaging Array), который предназначен для оптических и спектральных исследований атмосферных грозных явлений. Прибор включает в себя две камеры с частотой кадра 12 Гц и светофильтрами 337 ± 4 нм и 777 ± 5 нм и скоростные фотометры на основе ФЭУ с теми же светофильтрами, но частотой дискретизации 100 кГц. Это позволяет одновременно производить измерения как пространственной структуры событий с разрешением порядка 400 м/пиксель, так и временной с разрешением 10 мкс [176].

На основе данных MMIA разработан алгоритм офф-лайн отбора т.н.

BLUES, т.е. событий, в которых есть сигнал в канале фотометра 337 нм и отсутствует в 777,4 нм.

Проведен статистический анализ и получены глобальные карты событий типа BLUES. В целом, они напоминают распределения грозовой активности и совпадают с распределением всех регистрируемых аппаратурой ISS-LIS (Lightning Imaging Sensor), вспышек (см. рис. 4.12) [177]. Всего (на суше и в океане) ~ 11 BLUES событий происходит по всему Земному шару каждую секунду, в полночь по местному времени.

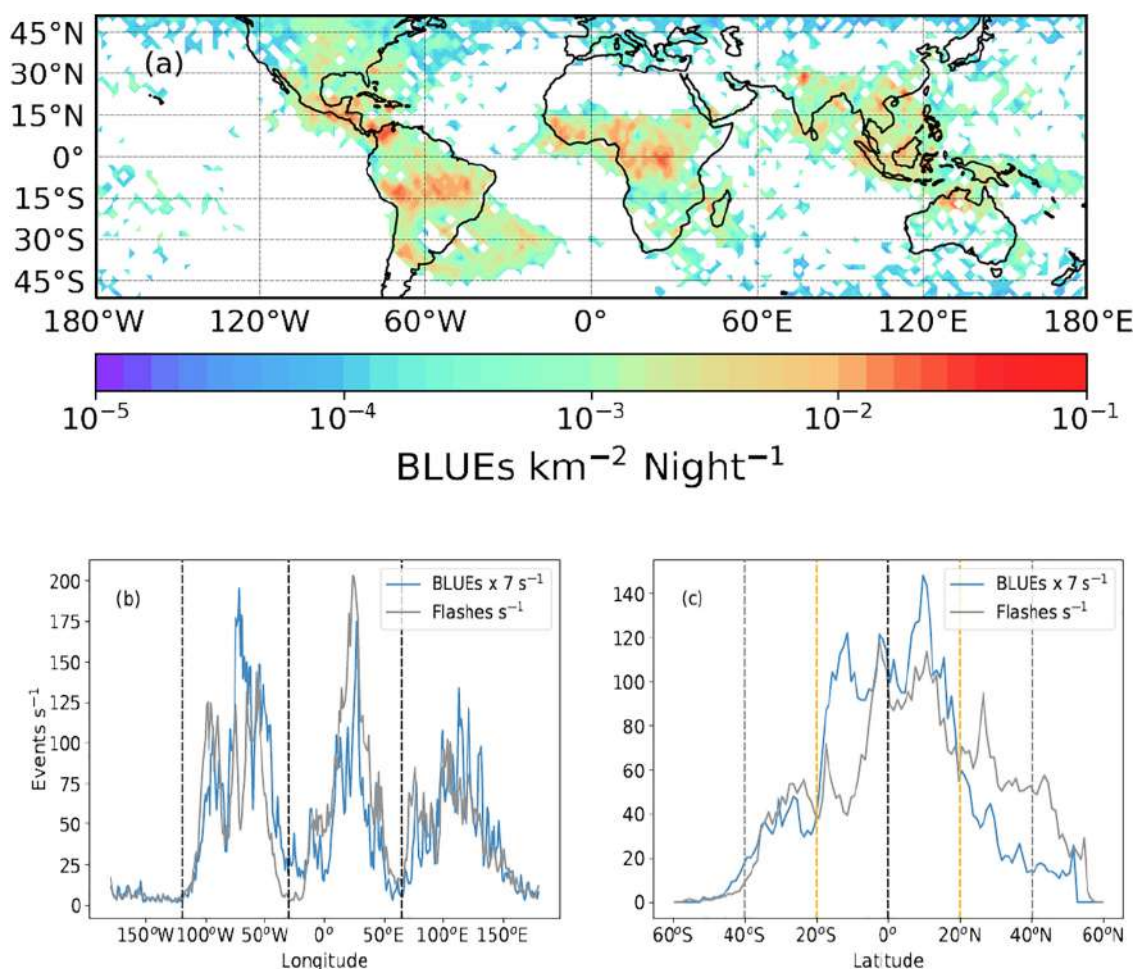


Рис. 4.12: (а): среднее за два года (с сентября 2018 г. по август 2020 г.) распределение глобальной электрической активности Blue Luminous Event (BLUE) в грозовых облаках. (b, c): Годовой цикл (за исследуемый период) глобальной частоты вспышек BLUES в ночное время ASIM-MMIA (синяя линия) и глобальной частоты вспышек ISS-LIS в ночное время (серая линия), представленных в меридиональном (b) и зональном (c) сечении. Рисунок из работы [177].

Но еще более интересны исследования взаимосвязи BLUES и NBE, т.к. NBEs могут быть связаны с возникновением молнии, а

механизмы их образования остаются неизвестны. NBE представляют собой короткий (10–30 мкс) импульс электромагнитного радиоизлучения, с биполярной структурой в ОНЧ диапазоне, и как правило, сопровождающийся излучением в УКВ. Они называются также компактными внутриоблачными разрядами (КВР) или TIPP (Transionospheric Pulse Pairs). События NBE (или КВР или TIPP), наблюдаемые в диапазоне ОНЧ/НЧ, обычно в 10 раз мощнее, чем излучения обычных грозовых разрядов на высоких частотах (ВЧ) (3–30 МГц) [178].

В [179] описано наблюдение 30 BLUES и их анализ, совместно с регистрацией NBE. Они наблюдаются в узкой синей полосе с центром на 337 нм без одновременной активности на 777,4 нм, которая считается сильной линией излучения молнии. Из радиоволновых измерений с поверхности Земли обнаружено, что 7 из 10 одиночных BLUES можно идентифицировать как положительные NBE. Высоты источников, оцененные по оптическим и радиосигналам, согласуются и указывают на то, что источники голубых вспышек расположены между $\sim 8,5$ и ~ 14 км в облаке. Наблюдения позволяют предположить, что одиночные импульсы синих вспышек происходят от волн холодной ионизации, так называемых стримеров, и что положительные NBE представляют собой коронные разряды, образованные множеством стримеров.

Как было сказано в самом начале главы, в этом диапазоне длин волн работали детекторы на спутниках «Татьяна-1», «Татьяна-2», «Вернов», «Ломоносов», и работают до сих пор «УФ атмосфера» и детекторы серии «АУРА» на спутниках «ДЕКАРТ», «Сатурн» и «ВДНХ-80». При этом, частота регистрации вспышек, например, в эксперименте «Татьяна-2», превышала частоту регистрации TLE в эксперименте ISUAL, причем существенная доля событий не имела сигнала в красном канале. По всей видимости, эти события можно отнести к описанному выше классу вспышек BLUES, а значит считать их первыми наблюдениями BLUES с орбиты Земли.

Далее следует описание результатов, полученных при измерении

вспышек УФ излучения на спутниках МГУ. В основном представлены данные спутника «Вернов», т.к. на нем получена наибольшая статистика.

4.4. Энергетическое распределение УФ вспышек

Одним из важных результатов исследования TLE на спутнике «Вернов» является распределение атмосферных вспышек по их энергии (числу фотонов, производимых во время события в атмосфере). Получение этого распределения («спектра» по числу фотонов) является одной из задач, выполненной в ходе работы. Это распределение имеет как важное значение с точки зрения исследования атмосферных УФ-явлений, поскольку по его характерным особенностям можно ввести дополнительные критерии классификации событий (в случае обнаружения особенностей в спектре), так и методическое значение для планирования будущих орбитальных миссий по регистрации космических лучей предельно высоких энергий, таких как «КЛПВЭ», JEM-EUSO. Для получения этого распределения необходимо: 1) провести проверку калибровки детектора в ходе полета и возможное отклонение от параметров, измеренных в ходе предполетной подготовки; 2) произвести корректный учет времени экспозиции детектора с разным порогом по регистрации (порог изменяется в виду подстройки кода высокого напряжения и измерения чувствительности детектора) и 3) учесть влияние триггерной системы детектора, поскольку регистрируется определенная выборка событий (максимальное по коду АЦП за 4.5 с измерений), а не все УФ-вспышки.

Для проверки и уточнения калибровки детектора ДУФ на спутнике «Вернов» использовались данные по интенсивности постоянного фонового свечения атмосферы в тех областях, где оно было измерено в предыдущем эксперименте на спутнике «Татьяна-2», на котором был установлен аналогичный прибор, и общая форма зависимости интенсивности от измеряемых параметров (кода АЦП N и кода высокого напряжения M): $I = \frac{A \cdot N}{M^B}$. Для расчета коэффициента A и B использовались значения интенсивности при пролетах в безлунные ночи над определенными городами, где в ходе обоих экспериментов наблюдались стабильные

измерения с постоянной интенсивностью ($I = 2 \cdot 10^8$ фотон/см²ср с – в эксперименте «Татьяна-2»), и в безлунные ночи над самыми темными регионами ($I = 3 \cdot 10^7$ фотон/см²ср с), которые расположены либо над океаном, либо в малонаселенных регионах над материком (центральная часть Африки). Координаты наименее ярких регионов на поверхности Земли, которые использовались в этой работе, были определены по географическому распределению интенсивности свечения в атмосфере, также полученному в эксперименте на борту спутника «Татьяна-2», представленному на рисунке 4.13. Пример понижения значения кода M , вызванного увеличением интенсивности при пролете спутника над городами в Японии, показан на рисунке 4.14. Зная интенсивность в указанных регионах, которым соответствуют разные коды высокого напряжения, можно восстановить однозначное соответствие между интенсивностью свечения и измеряемыми кодами. Данный метод не является качественной калибровкой прибора, однако, позволяет контролировать параметры детектора и их возможные изменения в ходе орбитального полета, с течением времени в отсутствии калибровочных источников на борту космического аппарата, используя естественное излучение атмосферы. Оказалось, что за 4 месяца работы поведение аппаратуры было достаточно стабильным, а полученные значения коэффициентов находятся в согласии с предполетными значениями.

Рассчитанные, описанным способом, величины коэффициентов:
 $A = 4,6 \cdot 10^{24}$ фотон/см²ср с; $B = 8,3$.

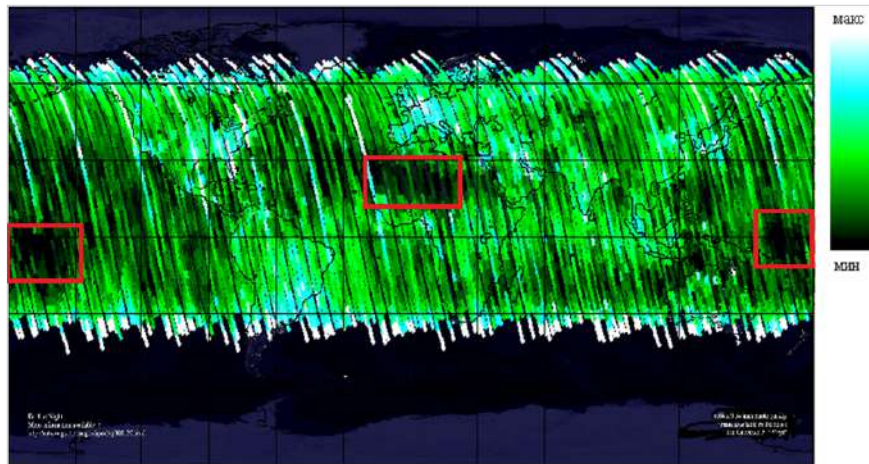


Рис. 4.13: Распределение интенсивности свечения в атмосфере по данным спутника «Университетский-Татьяна-2» (красными прямоугольниками выделены области с минимальной интенсивностью свечения).

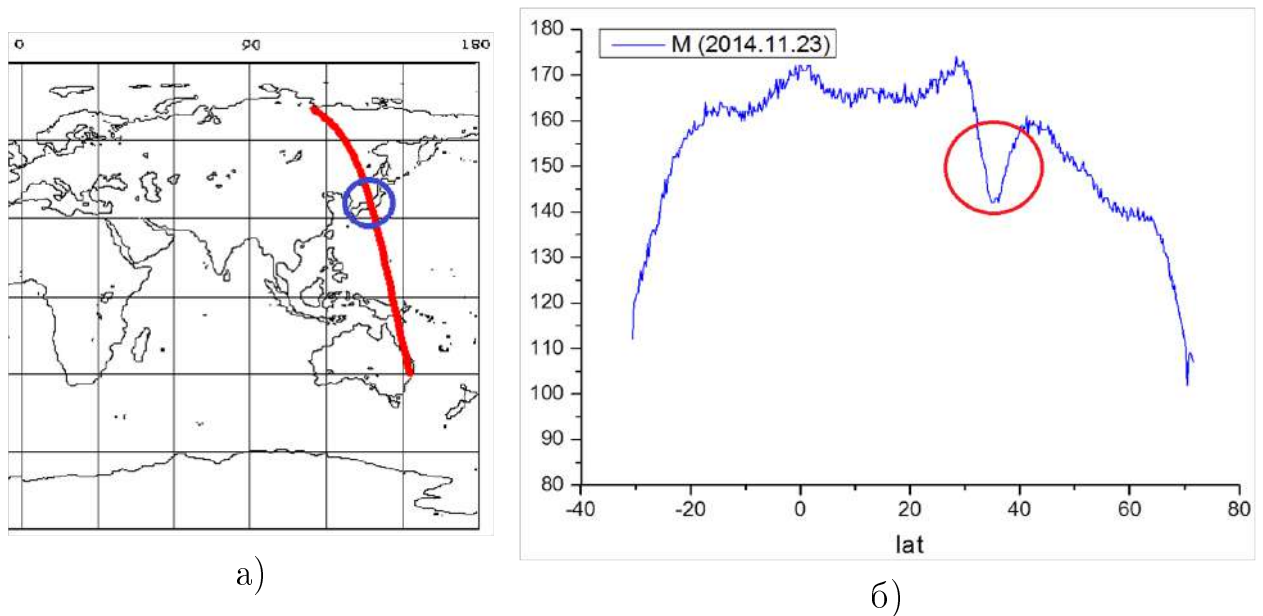


Рис. 4.14: Пример пролета спутника «Вернов» над городом в Японии в безлунную ночь: а) карта с траекторией пролета спутника, б) изменение кода M в течение одного витка спутника вокруг Земли.

Используя полученные коэффициенты, был выполнен расчет интенсивности регистрируемого свечения атмосферы в разных областях и числа фотонов (Q_a) в каждом событии (УФ-вспышке) [12]. Последнее определялось как сумма значений числа фотонов, падающих на входное окно детектора в одном шаге АЦП за всю длительность осциллограммы

(256 тактов):

$$Q_a = 4\pi H^2 \Omega \tau \frac{A}{M^B} \sum_{i=1}^{256} N_i, \quad (4.1)$$

где H – высота орбиты спутника, Ω – телесный угол поля зрения детектора, τ – шаг АЦП по времени, N_i – коды АЦП в i -й такт измерения. В этом случае расчет числа фотонов во вспышке производится в предположении, что событие произошло в центре поля зрения детектора, имеет малые размеры относительно всего поля зрения, а излучение в источнике изотропно. Как было сказано выше, помимо расчета энергии, для получения распределения событий по числу фотонов, необходимо учесть время экспозиции детектора, но для каждого порога регистрации. Для этого был проведен анализ времени наблюдения детектора при различных кодах высокого напряжения M . Для каждой энергии события рассчитано соответствующее ей пороговое значение кода – M_{thr} , при котором возможна регистрация и отбор данного события относительно шума, по описанному выше критерию, а необходимое значение времени наблюдения для данного порога определяется суммарным временем регистрации, при котором $M > M_{thr}$. Таким образом, число событий с определенной энергией было отнесено к времени измерения, в течение которого такие события вообще могли быть зарегистрированы детектором. В результате было получено распределение событий по числу фотонов, которое показано на рисунке 4.15. Отдельно показано распределение для всех событий, коротких (длительность менее 5 мс) и длинных. Очевидно, что максимальную суммарную энергию имеют длинные события, и они определяют форму распределения при больших числах фотонов. В целом, форма спектра согласуется с более ранними измерениями на спутнике «Университетский-Татьяна» [180].

Важно отметить, что в данном распределении приведены минимальные оценки энергии событий, поскольку:

1. предполагается, что события произошли в центре поля зрения (эффективная площадь детектора максимальна в этом направлении);

2. не учтена особенность триггерной системы – отбор максимального события за один период регистрации (4,5 с).

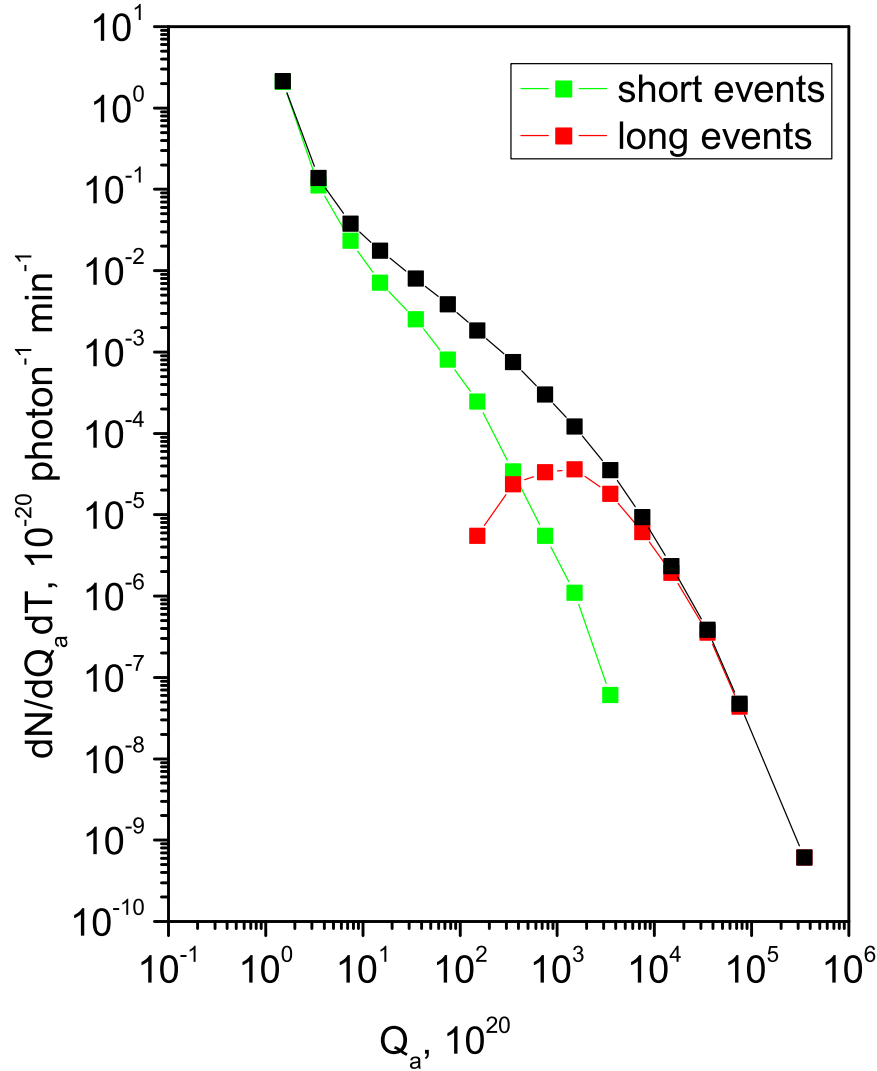


Рис. 4.15: Распределение УФ-вспышек по числу фотонов по данным спутника «Вернов» с учетом времени экспозиции ($M > M_{thr}$). Черным цветом показаны все зарегистрированные события, зеленым – короткие события длительностью менее 3 мс, красным – длинные.

Приведенная выше оценка числа фотонов в событии не учитывает некоторых особенностей работы детектора.

Важным параметром в определении энергии события является эффективная площадь детектора, которая зависит от угла падения

излучения. Коллиматор, ограничивающий поле зрения, представляет собой углепластиковую пластину с отверстиями. Толщина пластины – 2,2 мм, количество отверстий – 57, диаметр отверстий – 0,8 мм. Были проведены измерения чувствительности детектора, в зависимости от зенитного угла, которые показали, что эффективная площадь детектора уменьшается с увеличением угла падения. Эта зависимость имеет максимум при нормальном падении и практически равна нулю при углах больше 20°. Аналогичный результат дают и расчеты эффективной площади из геометрических соображений. Таким образом, для расчета числа фотонов в атмосферной вспышке необходимо ввести поправочный фактор, учитывающий угол прихода излучения. Тогда

$$Q = \frac{S_{eff}(0^\circ)}{S_{eff}(\theta)} Q_a, \quad (4.2)$$

где Q – число фотонов во вспышке, $S_{eff}(0^\circ)$ – эффективная площадь детектора при нормальном падении, $S_{eff}(\theta)$ – эффективная площадь детектора при падении излучения на коллиматор под углом θ .

Еще один фактор, оказывающий сильное влияние на распределение зарегистрированных атмосферных вспышек по энергии, – это триггерная система детектора. Важным параметром для количественной оценки такого влияния является число вспышек n , происходящих в поле зрения детектора за время отбора максимального по амплитуде события (4,5 с). При $n > 1$ возможна ситуация, при которой в память детектора будет записана более слабая вспышка, произошедшая в центре поля зрения, в то время как вспышка с большей интенсивностью свечения в атмосфере может создать меньший отклик в детекторе, если она попала на край поля зрения. Поскольку основная доля регистрируемых явлений связана с грозовой активностью, то число n определяется количеством молниевых и высокоатмосферных разрядов в поле зрения прибора за время 4,5 с.

Для оценки влияния, описанных факторов, на спектр УФ-вспышек, в ходе данной работы было проведено моделирование отклика детектора на вспышки в атмосфере, основывающееся на следующих предположениях:

1. Все зарегистрированные вспышки связаны с грозовой активностью.

2. Размер вспышек мал, по сравнению, с полем зрения детектора.
3. Число фотонов в атмосферных вспышках распределено по степенному закону.

Процесс моделирования включал в себя несколько этапов:

1. В поле зрения детектора помещалось n вспышек. Угол падения излучения на детектор θ распределялся равномерно от 0° до $\theta_{max} = 20^\circ$.
2. Для каждой вспышки рассчитывалось число фотонов в детекторе с учетом эффективной площади для ее расположения в поле зрения $q = \frac{S_{eff}(\theta)}{4\pi H^2} Q$.
3. Из n вспышек выбиралась одна, имеющая максимальное значение q . Именно её бы и зарегистрировал детектор в аналогичных условиях.

Моделирование производилось для $N = 10^6$ измерений. После проведения сеансов моделирования для разных значений параметра n была обнаружена сильная зависимость эффективного поля зрения детектора от числа вспышек, происходящих в поле зрения. На рисунке 4.16 приведены результаты такого моделирования для $n = 1, 2, 5, 10, 20$. Видно, что с увеличением числа пропускаемых вспышек (а из всех вспышек в поле зрения регистрируется только одна!) наиболее вероятный угол прихода излучения уменьшается (т.е. при одинаковых энергиях детектор «выберет» вспышку ближе к центру поля зрения). То есть можно сказать, что с увеличением числа n поправочный фактор для расчета энергии вспышки в атмосфере приближается к единице, и мы точнее можем оцениваем число фотонов в зарегистрированном событии.

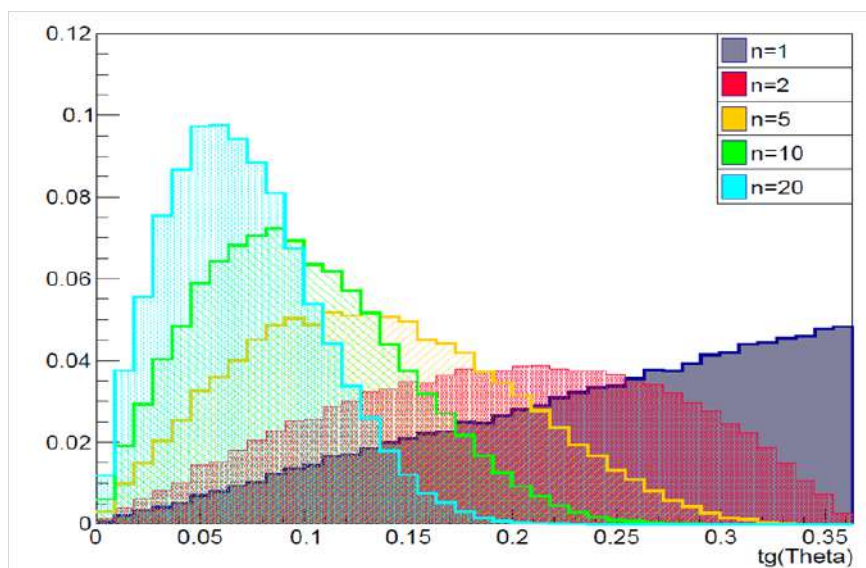


Рис. 4.16: Функция распределения угла падения на коллиматор при разных значениях n .

Характерные значения n можно оценить по числу молний, происходящих в поле зрения детектора за время срабатывания триггера (4,5 с). Такие расчеты были произведены по данным двух наземных сетей регистрации молний – всемирной WWLLN² и европейской EUCLID³. Были проанализированы данные сетей за период работы спутника «Вернов» и показано, что $n \leq 5$ для WWLLN и $n \leq 16$ для EUCLID. Такое различие в максимальном значении числа вспышек, попадающих в поле зрения, объясняется значительно более высокой эффективностью локальной европейской сети регистрации молний (но при этом, она охватывает своими измерениями только небольшой регион). Однако в ходе этого расчета так же выяснилось, что даже с использованием высокоэффективной сети EUCLID для 35 % зарегистрированных спутником «Вернов» вспышек $n = 0$. С одной стороны, это является следствием того, что эффективность наземных сетей регистрации молний довольно мала (для WWLLN – порядка 30 %), с другой, что реальная площадь зрения детектора превышает рассчитанные геометрическим способом (за счет рассеяния в атмосфере и отражения от стенок коллиматора). Однако важным следствием этих оценок можно считать, что число n варьируется в достаточно больших пределах, а для большого числа случаев и вовсе

²WWLLN (World Wide Lightning Location Network):<http://wwlln.net/new/>

³EUCLID (EUropean Cooperation for LIghtning Detection):<http://www.euclid.org/>

равно 0. Это приводит к тому, что от случая к случаю эффективное поле зрения детектора сильно меняется, что существенно затрудняет расчет энергии событий. Это может привести к существенному изменению спектра и в первую очередь к его смещению в область больших энергий.

После анализа результатов проведенного моделирования можно сделать следующие выводы:

1. Реальное распределение атмосферных вспышек по числу фотонов (энергии) в УФ-диапазоне сильно зависит от эффективной площади детектора, которая определяется углом падения излучения.
2. Наиболее вероятный угол регистрации излучения (эффективная площадь обзора) зависит от числа вспышек, которые произошли в поле зрения детектора.
3. При малом числе вспышек в поле зрения, энергия события может быть существенно больше рассчитанной в предположении приосевого расположения источника, а следовательно, спектр УФ-вспышек должен быть смещен в область больших энергий.
4. Для последующих исследований УФ-вспышек в атмосфере и оценки их энергии необходимо использовать детекторы с пространственным разрешением. Примерами такого эксперимента может служить детектор ТУС на борту спутника «Ломоносов» [21] или «УФ атмосфера» на МКС [42].

Необходимо отметить, что энерговыделение в отдельных вспышках в верхней атмосфере длительностью 1–100 мс превышает энергию полярных сияний на два порядка за то же короткое время, на более длительных масштабах энерговыделения сопоставимы. Это сравнение показывает, что транзиентные события являются важным фактором, определяющим состояние верхних слоев атмосферы на коротких временных масштабах. Наиболее интенсивные события (серии TLE) выделяют энергию до сотен МДж, что указывает на их важную роль в энергетическом балансе верхней атмосферы по сравнению с другими эффектами космической погоды, особенно в низких широтах вблизи экватора [181].

4.5. Спектральная методика определения типа атмосферной вспышки. УФ-вспышки (BLUES) по данным спутника «Вернов»

4.5.1. Определение высоты вспышек по данным детектора ДУФ на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов»

Измерения в ближнем УФ и в красном каналах могут быть эффективно использованы для определения типа атмосферного явления или его высоты. Так, в работе [28, 37] предложена методика оценки высоты вспышки по соотношению сигнала в красном и синем каналах в предположении спектра свечения молекулярного азота. Так, применительно к электрическим разрядам в атмосфере, в свечении которых доминирует излучение первой и второй положительных систем молекулярного азота ($1PN_2$ и $2PN_2$), отношение излучения в этих диапазонах может быть рассчитано по формуле:

$$P = \frac{I_{IR}}{I_{UV}} = \frac{q_{1PN_2}^*}{q_{2PN_2}^*} \cdot \frac{1 + (\nu_d \tau_r)_{1PN_2}}{1 + (\nu_d \tau_r)_{2PN_2}} \quad (4.3)$$

где q^* – скорости возбуждения соответствующих переходов, которые определяются сечениями возбуждения и функцией распределения электронов по энергиям. Согласно расчетам на основе решения кинетического уравнения для электронов в электрическом поле, непосредственно выше порога пробоя ($E/N \sim 100$ Td) характерное значение отношения $q_{1PN_2}^*/q_{2PN_2}^* \sim 10$; $\tau_r(1PN_2) \sim 8 \cdot 10^{-6}$ с и $\tau_r(2PN_2) \sim 9 \cdot 10^{-8}$ с – радиационные времена жизни возбужденных состояний [182], $\nu_d = \sigma V_T n_m(z)$ – частота дезактивирующих столкновений (σ – сечение дезактивации принято равным газокинетическому ~ 10 – 15 см²), $V_T(z) = (4/3) \cdot [8kT(z)/\pi m]^{1/2}$ – скорость относительного теплового движения молекул (z – высота), m – масса молекул, равная ~ 30 массам нуклона, $n_m(z) = 1,8 \cdot 10^{15} \cdot \exp[-(z - 70)/H]$ – плотность молекул, $H = 7$ км – характеристическая высота экспоненциальной атмосферы; принято также, что температура атмосферы $T(z)$ линейно уменьшается с высотой от 273 °К на высоте 50 км до 173 °К на высоте 80 км. Результаты

расчета показаны на рис. 4.17 слева. А справа показано экспериментальное распределение событий, зарегистрированных на спутнике «Татьяна-2» по этому отношению (белая гистограмма – для коротких вспышек (менее 5 мс), штрихованная – для длинных). Видно, что максимумы в распределении соответствуют диапазону высот от 50 до 65 км.

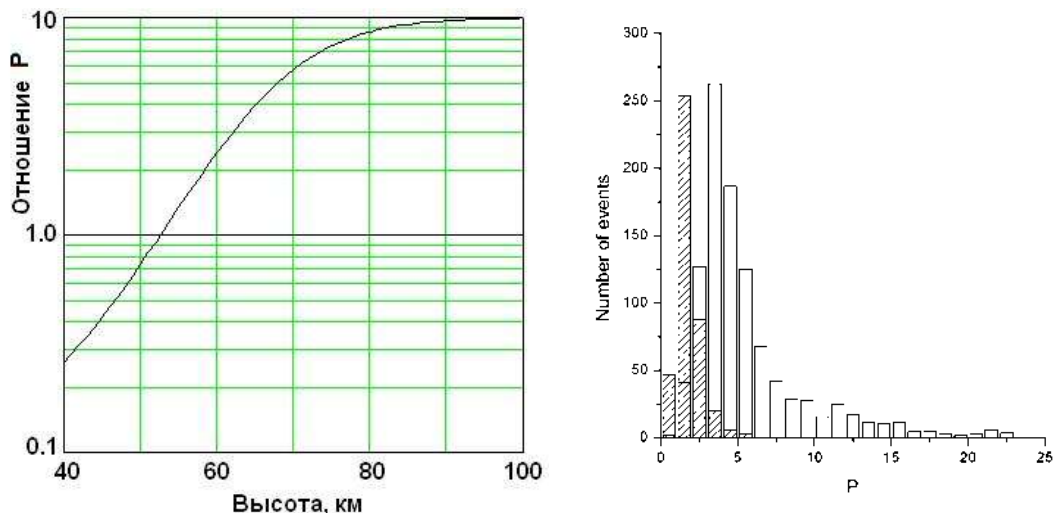


Рис. 4.17: Слева: Зависимость отношения R от высоты в атмосфере (расчет). Справа: Распределение вспышек по отношению числа фотонов в красном диапазоне к числу фотонов в УФ-диапазоне.

Аналогичные исследования были проведены для спутника «Вернов» (расчет производится для фотоэлектронов, т.к. это учитывает также все спектральные характеристики детектора (светофильтры, фотокатод). Сравнение распределений по числу фотоэлектронов для двух детекторов приведено на рис. 4.18.

Чтобы получить приблизительную оценку соотношения числа фотонов, можно просто увеличить значение P_e в 10 раз (поскольку средняя квантовая эффективность катода ФЭУ на порядок ниже в ИК-диапазоне, чем в УФ-диапазоне).

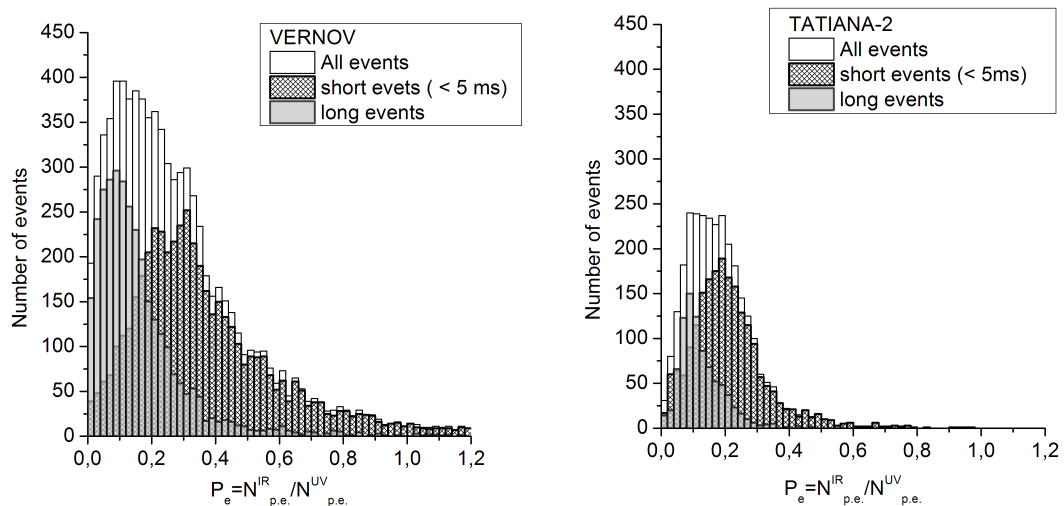


Рис. 4.18: Слева: Распределение вспышек по отношению $P_{p.e.}$ числа фотоэлектронов в красном диапазоне к числу фотоэлектронов в УФ-диапазоне для спутника «Вернов». Справа – тоже самое для спутника «Татьяна-2».

4.5.2. О возможности различения молниевых разрядов от высокоатмосферных транзиентов по данным детектора ДУФ на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов»

Однако не правильно будет полагать, что регистрируются только высокоатмосферные TLEs. Для выяснения возможного вклада молниевых разрядов, был проведен расчет ожидаемой величины P_e , для сравнения с аналогичной величиной для спрайтов. Для молниевых разрядов спектр в источнике полагался в соответствии со спектрами приведенными в работе [183], а спектр спрайта был взят из моделирования [184]. Для преобразования этих спектров в сигнал детектора были учтены следующие параметры, зависящие от длины волны: квантовая эффективность ФЭУ Hamamatsu R1463 $\varepsilon(\lambda)$, коэффициент прозрачности атмосферы $\eta(\lambda)$ и коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ соответствующих стекол (фильтров) на детекторах. Зависимость квантовой эффективности ФЭУ от длины волны представлена на рис. 4.19. Заметно, что для ИК диапазона квантовая эффективность значительно меньше, чем для УФ. Зависимости их коэффициентов пропускания от длины волны изображены на рис. 4.20. Видно, что КС11 пропускает только в диапазоне длин волн больше 600 нм, а коэффициент пропускания детектора УФ-излучения близок к 1 в

диапазоне 250–350 нм, но при этом достигает 0,5 в красной области спектра (700–800 нм). Для явлений, в спектре которых наблюдается большая интенсивность в красной части спектра, это приведет к значительной доле этого сигнала в УФ-детекторе.

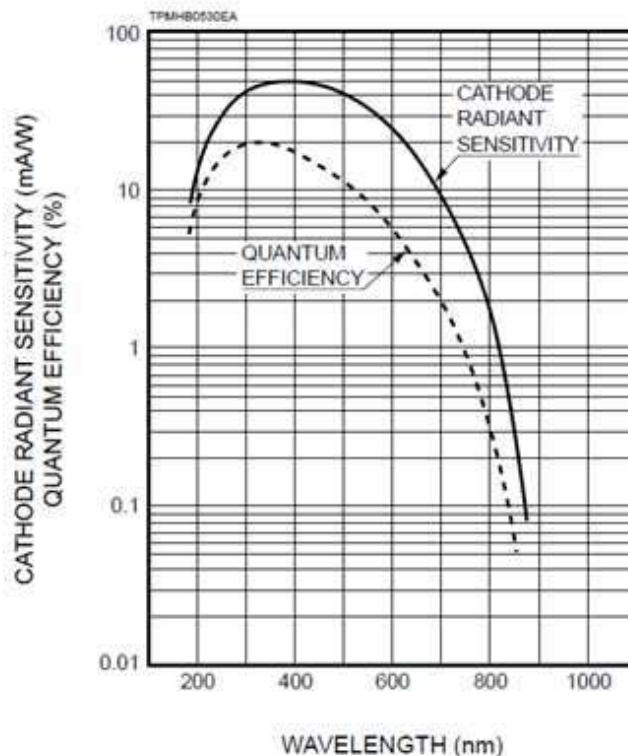


Рис. 4.19: Зависимость квантовой эффективности ФЭУ Hamamatsu R1463 от длины волны.

При расчете прозрачности атмосферы учитывалось только рассеяние Рэлея, т.к. именно оно оказывает самое существенное влияние на спектр в области малых длин волн (в УФ-диапазоне). Более корректный расчет, с использованием модели атмосферы MODTRAN⁴, существенно не меняет результатов, что будет показано в дальнейшем при анализе данных со спутника «ДЕКАРТ».

В результате описанной процедуры, рассчитывалось число фотоэлектронов в каждом канале: $N_{p.e.} = N_{ph} \cdot \eta(\lambda)\tau(\lambda)\varepsilon(\lambda)$ и их отношение P_e . Для молнии эта величина оказалась равной 0,49 (0,62), для разных молний в статье [183], а для спрайта – 0,07. Таким образом, отличие существенное, но важно, что доля молний в распределении на рис. 4.18 мала.

⁴<http://modtran.spectral.com/>

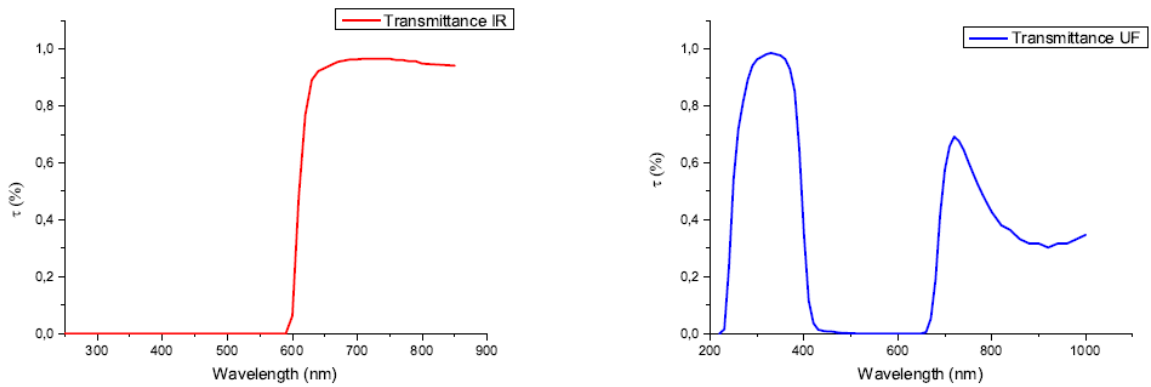


Рис. 4.20: Зависимость коэффициента пропускания стекла КС11 детектора ИК излучения (слева) и стекла УФС1 детектора УФ-излучения (справа).

4.5.3. События типа BLUES

Другая важная особенность распределений, приведенных на рис. 4.18 – это большая доля УФ-событий, т.е. вспышек, где сигнал в красном канале, превышающий уровень фона, отсутствует (первый бин в распределении). Эти события представляют наибольший интерес, т.к. очевидно, являются событиями типа BLUES (джеты или стартеры, которые не могут быть прямым следствием молниевых разряда [149], или внутриоблачные разряды, которые развиваются, не приводя к пробою). Количество таких событий составляет 10 %, от числа всех зарегистрированных вспышек.

Был проведен дополнительный анализ этих «синих» вспышек, с целью определения их связи с молниевой активностью, при этом основное внимание уделялось слабым вспышкам.

Для поиска таких событий (слабых УФ-вспышек в грозовой области, но не сопровождающихся молнией) была проделана следующая процедура:

- Отобраны все вспышки, в которых сигнал в красном канале не превышает 3σ относительно уровня фона.
- Проведено сравнение с данными наземной сети регистрации молний WWLLN для двух временных интервалов относительно момента измерения события: в течение 1 часа (чтобы отобрать период во время грозы, т.е. в течение 1 часа должны быть молниевые разряды) и 10 с (без молний в момент срабатывания триггера).

- Дополнительное сравнение с более эффективной сетью Vaisala GLD360 для подтверждения отсутствия молний для выбранных УФ-вспышек.

Географическое распределение всех синих вспышек, зарегистрированных спутником «Вернов» и отобранных по первому критерию, показано на рис. 4.21. Видно, что события в основном регистрируются в грозовых районах, за исключением Южно-Атлантической аномалии, где прибор выключали, или он был перегружен короткими вспышками от заряженных частиц. Интересно отметить, что, благодаря полярной орбите, зарегистрированы вспышки даже в полярных широтах над Антарктидой.

Сравнение с данными WWLLN показало, что около 90 % вспышек происходит в грозовых регионах (имеются молниевые разряды, измеренные WWLLN в радиусе 1000 км вокруг вспышки в течение 1 ч) при наличии облаков. Оставшуюся часть событий (вне грозовой области) можно объяснить эффективностью измерения грозы WWLLN, которая составляет около 80 % [185], но они были исключены из дальнейшего анализа. Среди этих 90 % грозовых событий были выделены вспышки, не имеющие соответствующей молнии в течение $\pm 4,5$ с (период команды триггера спутника «Вернов»; см. описание детектора в главе 1) в поле зрения детектора по данным WWLLN. Эти события, составляющие около 30 %, рассматриваются как кандидаты в необычные УФ-вспышки. Затем эти вспышки сравнивались с сетью локации молний Vaisala GLD360 [164, 165], чтобы подтвердить отсутствие молний. Эти условия были соблюдены для 20 % событий, выбранных после анализа с WWLLN. Несколько примеров таких типичных событий показаны на рис. 4.22. Основными особенностями таких вспышек являются:

1. Отсутствие сигнала, превышающего фоновый уровень в красном канале детектора.
2. Большая длительность со сложной временной структурой (занимают всю осциллограмму длительностью 128 мс и имеют по несколько пиков длительностью единицы – десятки миллисекунд).

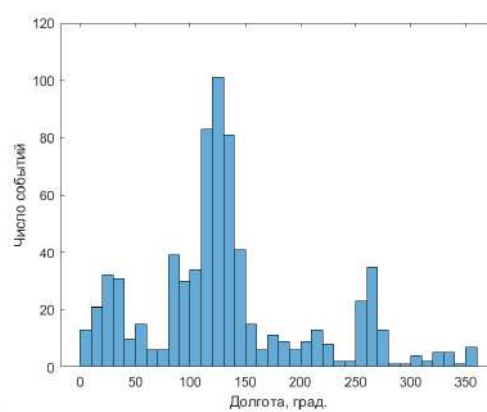
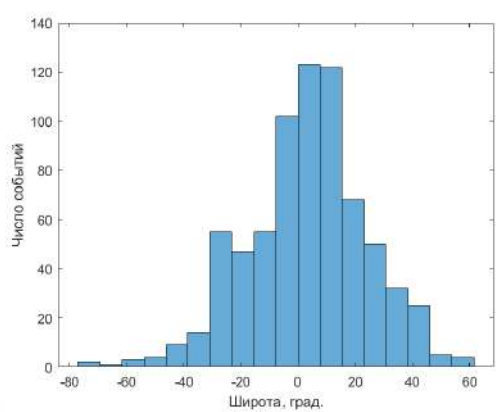
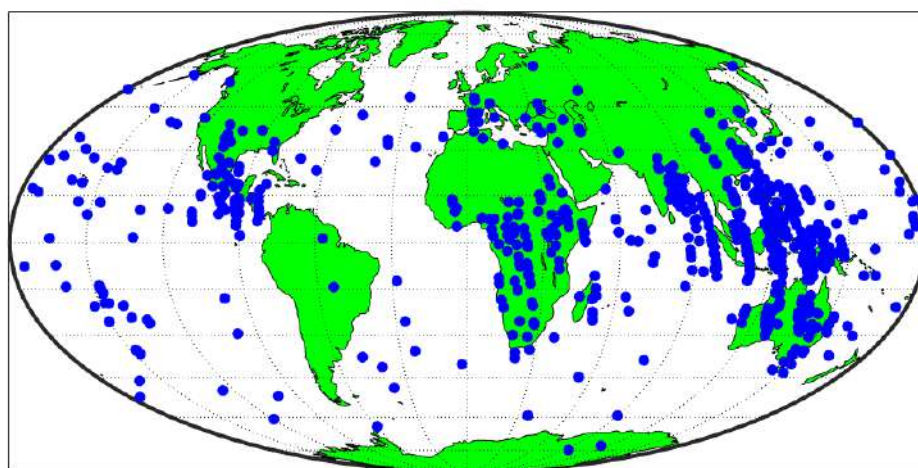


Рис. 4.21: Географическое распределение синих вспышек по данным спутника «Вернов». Сверху: карта вспышек. Снизу: распределения по широте и долготе.

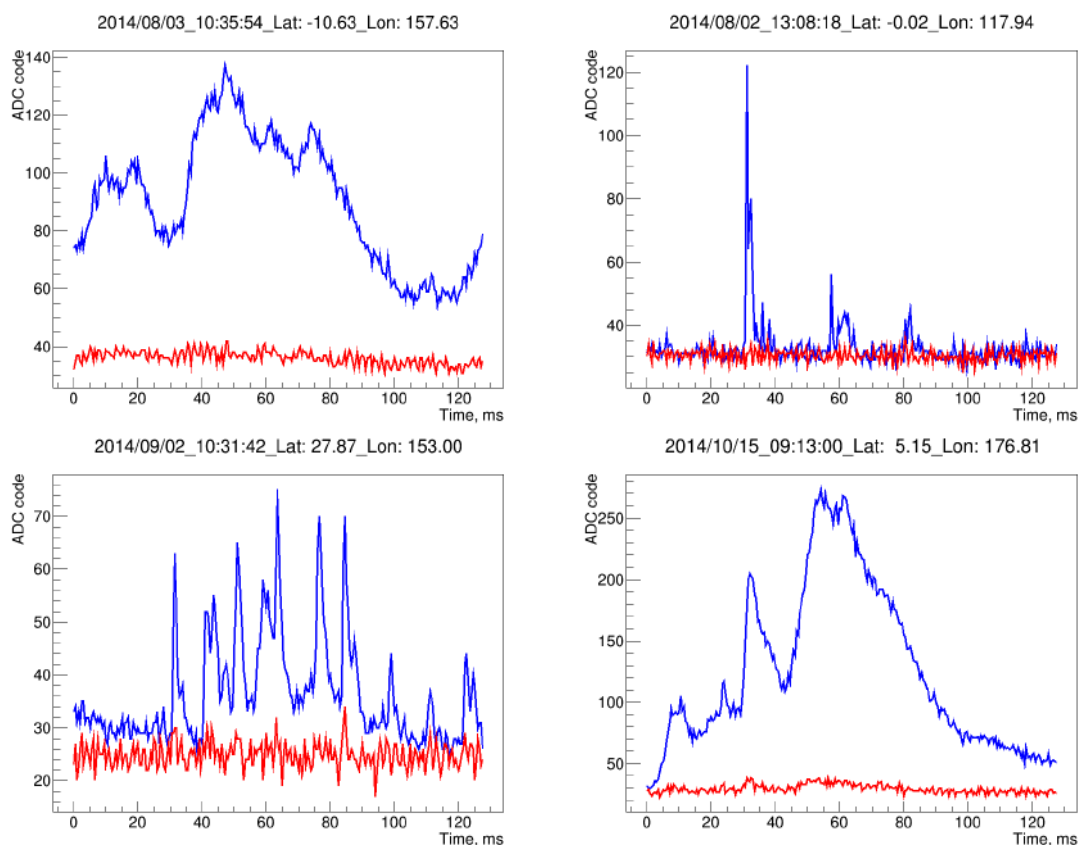


Рис. 4.22: Примеры синих всплесков по данным спутника «Вернов» с разной временной структурой сигнала.

3. Малая интенсивность свечения (не более 300 кодов АЦП при динамическом диапазоне 1024).
4. Возникновение в грозовой области, в присутствии облаков (по данным метеорологических спутников), но без регистрации молнии двумя наземными сетями (WWLLN и Vaisala GLD360) непосредственно в момент возникновения вспышки.

4.5.4. О возможности определения типа всплесков по данным детектора «АУРА» на спутнике «ДЕКАРТ»

В детекторе «АУРА-2» на спутнике «ДЕКАРТ» использовались светофильтры УФС1 и FF01-375/110. Основная цель работы состояла в проверке работоспособности и стабильности фильтра FF01-375/110, и возможности его использования в изменениях ШАЛ поскольку в его спектре пропускания отсутствует красная часть, а в УФ-части полоса уже и лучше соответствует спектру флуоресценции молекулярного азота.

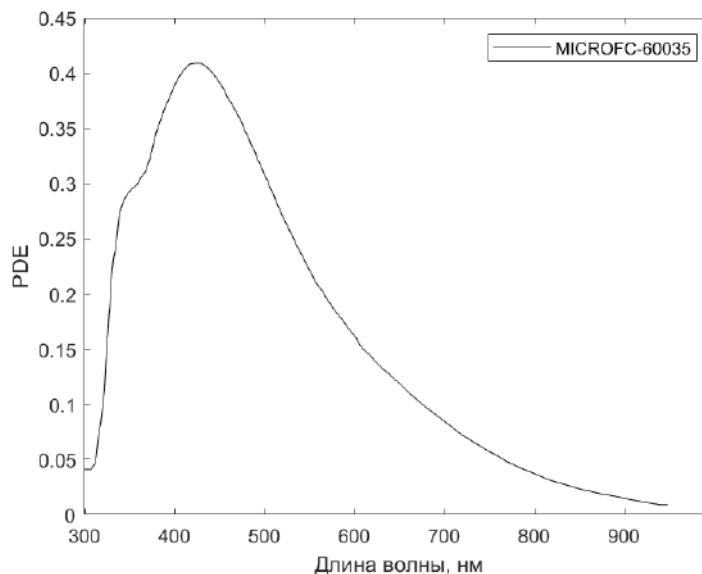


Рис. 4.23: Зависимость эффективности фоторегистрации SiPM MICROFC-60035 от длины волны.

Но использование двух разных фильтров делает потенциально возможным проводить различать вспышки разной природы. Для анализа такой возможности было проведено моделирование с использованием тех же спектров молний и спрайтов, который были использованы при моделировании отклика детектора ДУФ на спутнике «Вернов» ([183] и [184]), зависимость эффективности регистрации SiPM от длины волны (показана на рис. 4.23), спектральные характеристики фильтров (см. рис. 4.24) и спектральная прозрачность атмосферы, полученная с помощью модели MODTRAN [186, 187] для разных условий (пример спектра пропускания приведен на рис. 4.25).

Результаты расчетов спектров показаны на рис. 4.26. Слева – для исходного спектра спрайта (черная линия), красная и синяя линии показывают спектр после прохождения атмосферы, SiPM и фильтров (УФС1 и FF01-375/110, соответственно). Отношение сигналов для данных входных параметров получается 1,42 для спектра молнии и 0,78 для спектра спрайта.

Затем было проведено варьирование различных параметров в модели атмосферы, чтобы проверить устойчивость результата и его зависимость от содержания водяного пара, CO_2 , толщины озонового слоя. Было показано, что рассчитанные отношения для двух каналов регистрации меняются, но

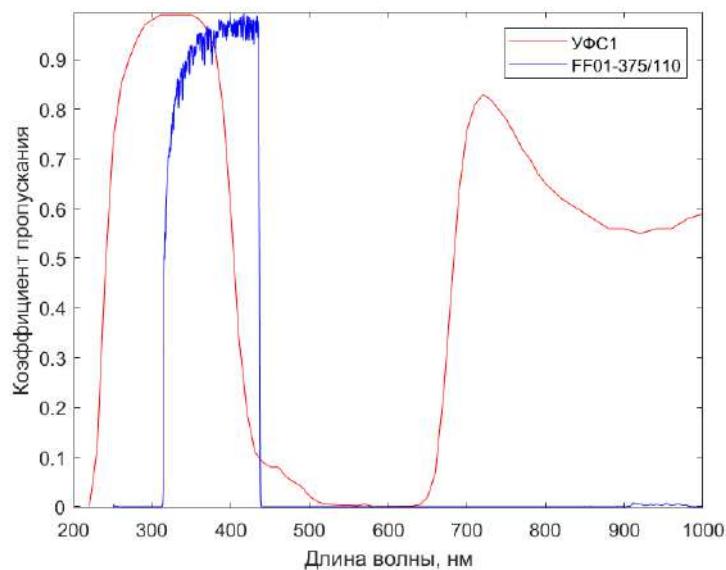


Рис. 4.24: Зависимость Коэффициента пропускания фильтров УФС1 и FF01-375/110 от длины волны.

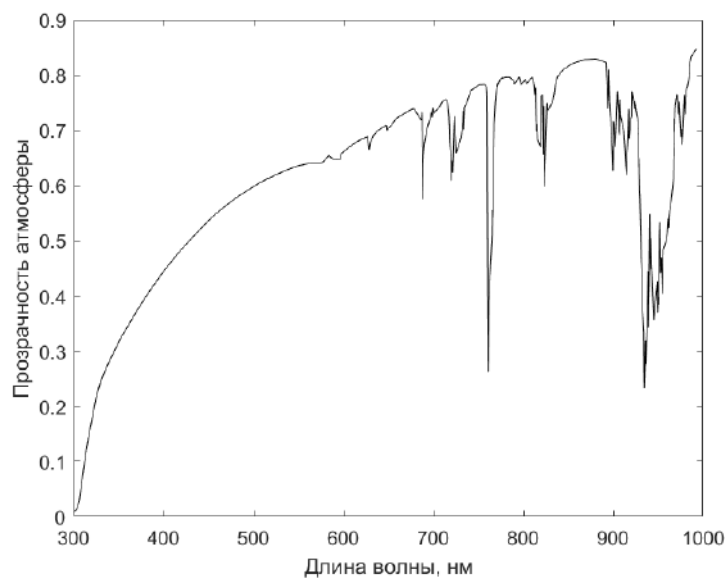


Рис. 4.25: Прозрачность атмосферы в зависимости от длины волны, полученная с помощью программного кода MODTRAN для модели тропической атмосферы.

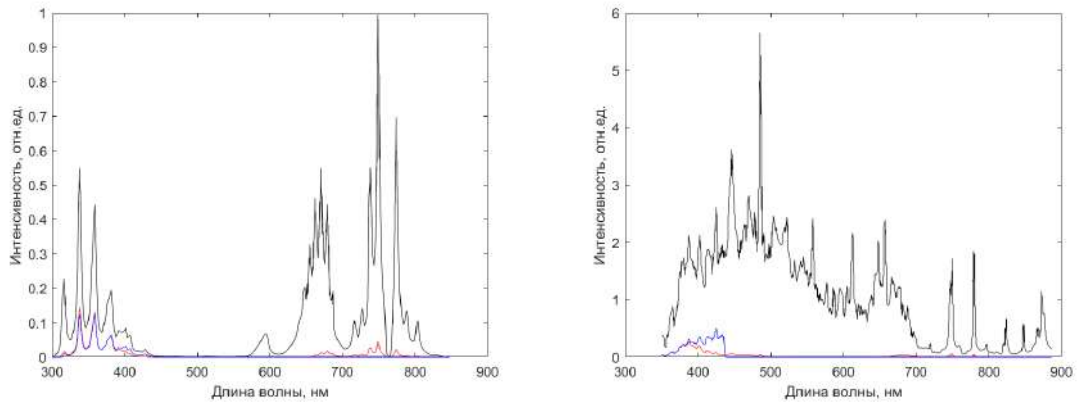


Рис. 4.26: Слева: спектр спрайта, справа: спектр молнии. Черные линии – исходные спектры, красные – после трассировки через атмосферу и фильтра УФС1, синие линии – после трассировки через атмосферу и фильтра FF01-375/110.

в незначительных диапазонах. Для молнии отношение лежит в диапазоне 1,4 – 1,5, а для спрайта 0,7 – 0,8.

Включения прибора «АУРА» на спутнике «ДЕКАРТ» происходили дважды: 13.09.2021 и 09.12.2021. Во время второго включения были зарегистрированы серии вспышек на которых можно было получить соотношения в двух каналах регистрации и проверить результаты моделирования. Первая серия вспышек приведена на рис. 4.27. На нем показаны осциллограммы сигналов двух SiPM. Видна последовательность вспышек, первая из которых выделяется своей амплитудой. Ее длительность нельзя оценить, так как его структуру определяет лишь одна точка в пике. Поскольку временное разрешение детектора составляет 10 мс, то это верхняя оценка длительности вспышки. Длительность же послесвечения составляет около 130 миллисекунд и можно пронаблюдать его структуру.

Таблица 4.2: Характеристики первой серии вспышек

Номер пика					
	1	2	3	4	5
Значение АЦП в пике					
SiPM-1	1334	856	860	769	784
SiPM-2	1538	818	694	679	653
$I_i - I_0$					
SiPM-1	627	149	153	62	77
SiPM-2	995	275	151	136	110
I_R/I_U					
	1,59	1,85	0,99	2,2	1,43

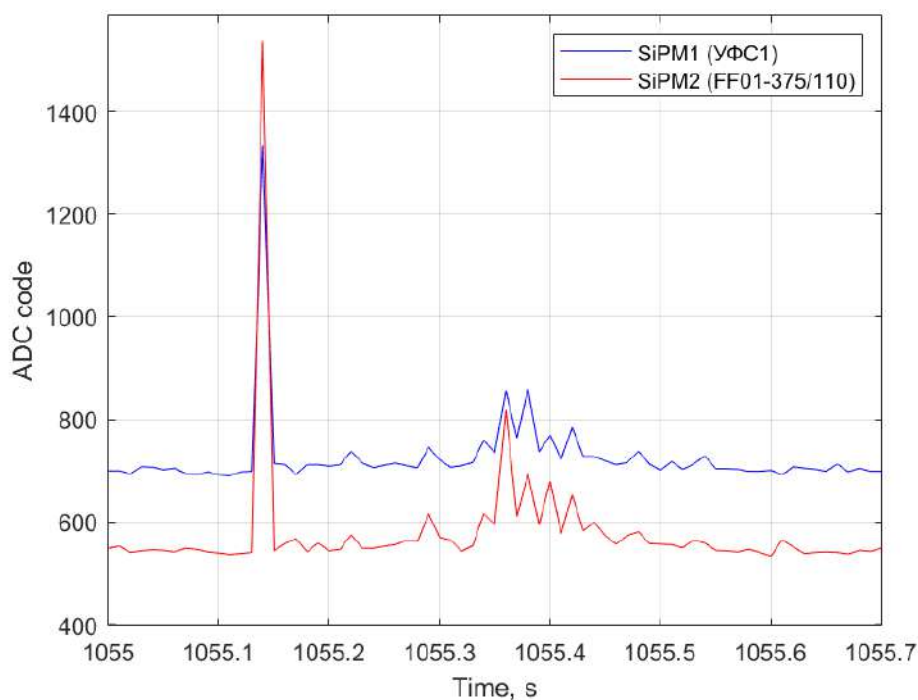


Рис. 4.27: Серия вспышек, наблюдавшихся в 14:15:40 UTC; $-6, 89^\circ$; $166, 96^\circ$. На рисунке время отложено от момента включения прибора.

Амплитудные характеристики вспышек и полученные отношения представлены в таблице 4.2. Видно, что все значения соответствуют ожидаемым от молний. Для другой серии вспышек, наблюдавшихся позже, значения отношения еще больше (около 2 и 3), т.е. они также не могут быть отнесены к типу TLE «спрайт».

4.6. Особенности географического распределения УФ-транзиентов

На рис. 4.28 показаны карты зарегистрированных вспышек в экспериментах «Татьяна-2» и «Вернов». В целом, эти распределения не являются удивительными: наблюдается очевидная корреляция с материками и известными крупными грозовыми регионами (над Латинской Америкой, Африкой и Индонезией). Это области, которые дают максимальный вклад в частоту происхождения молний. Однако более детальное исследование особенностей регистрации УФ-вспышек показывает ряд интересных наблюдений.

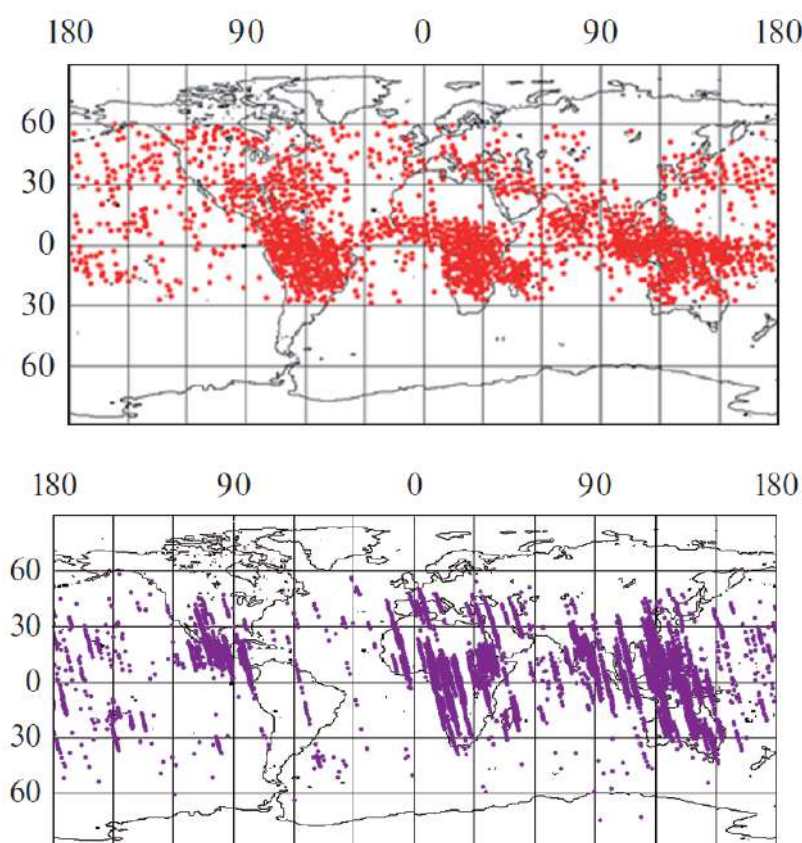


Рис. 4.28: Географическое распределение транзиентов. Сверху: по данным спутника «Татьяна-2». Снизу: по данным спутника «Вернов».

4.6.1. Зависимость распределения от энергии вспышек

Если разбить регистрируемые вспышки на диапазоны по энергиям, то оказывается, что энергичные вспышки коррелируют с грозовыми

областями, но чем меньше энергии, тем более равномерным становится распределение вспышек по поверхности Земли. На рис. 4.29 приведены карты вспышек, зарегистрированных на спутнике «Татьяна-2» для трех диапазонов энергии (числа фотонов): $> 5 \cdot 10^{23}$, $5 \cdot 10^{21} - 10^{23}$ и $< 5 \cdot 10^{21}$. Это говорит о том, что к мощным событиям грозовой природы добавляются световые явления другого происхождения.

4.6.2. Серии вспышек

Вспышки зачастую регистрируются длительными сериями (более трех событий подряд). Причем, эти серии могут длиться долго, по несколько минут. Впервые это было замечено по данным спутника «Татьяна-2», измерения на этом аппарате записывались один раз в минуту [28]. Поэтому, даже при наличии серии, оставался вопрос о том, что происходит внутри каждой минуты. На спутнике «Вернов» интервал измерений был уменьшен до 4,5 с и оказалось, что в некоторых случаях минуты целиком заполнена вспышками. На рис. 4.30 приведен пример длительной серии вспышек. Длительность составила 8 минут (спутник за это время пролетел почти 4000 км), количество вспышек более 100. По оси ординат отложен максимальный код АЦП для каждой осциллограммы.

Интересно, что серии вспышек коррелируют с грозовыми районами, а вот одиночные распределены практически равномерно (см. рис. 4.31).

Было замечено, что в длинных сериях, при пролетах над облачным, а затем безоблачным районом, регистрация серии вспышек не прерывается, как это следовало бы ожидать при отборе только молниевых разрядов в грозовых районах [37]. Эти данные указывают на существование оптических вспышек, не связанных с грозовой активностью (внегрозовые события). Поиск событий вдали от грозовых областей показал, что доля внегрозовых событий может достигать $\sim 10-20$ % от регистрируемых УФ-вспышек.

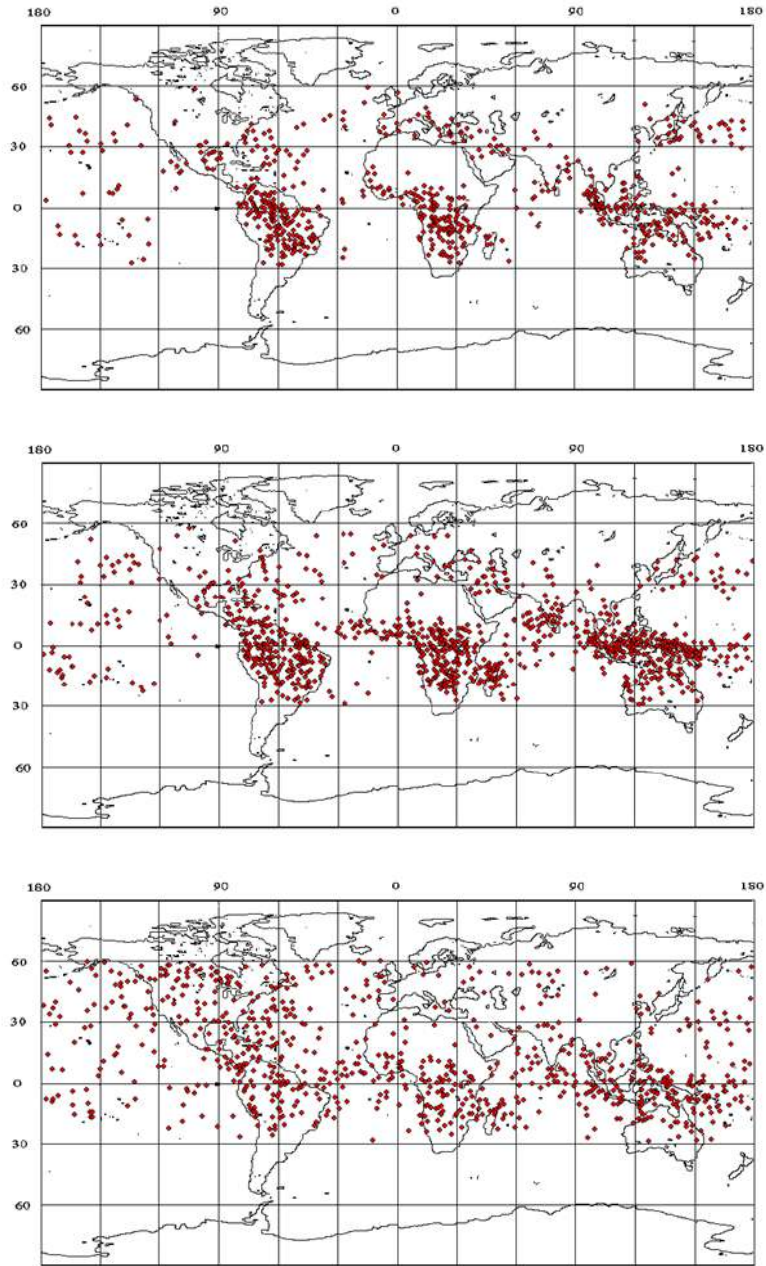


Рис. 4.29: Географическое распределение транзиентов для разных энергий. Сверху: $N_{ph} > 5 \cdot 10^{23}$. В центре: $5 \cdot 10^{21} < N_{ph} < 10^{23}$. Снизу: $N_{ph} < 5 \cdot 10^{21}$.

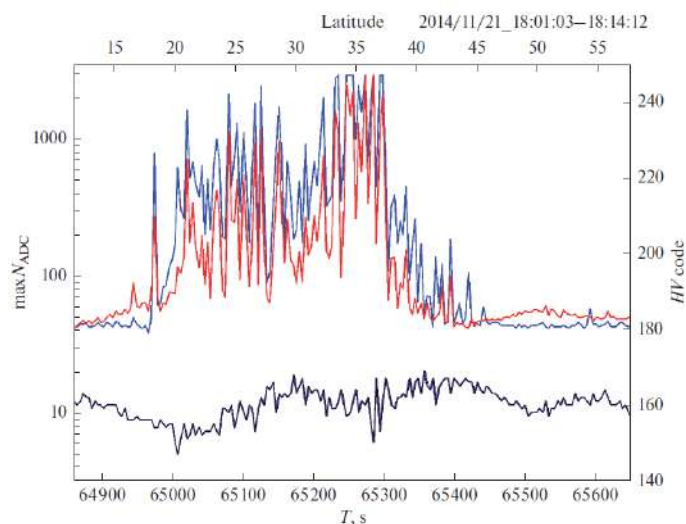


Рис. 4.30: Серия вспышек УФ (синяя линия) и красного света (красная линия) по данным ИСЗ «Вернов». Показаны значения максимального сигнала за 0,5 мс (в кодах АЦП) для каждой осциллограммы, следующей через 4,5 с (ось у). Нижняя кривая – код высокого напряжения M .

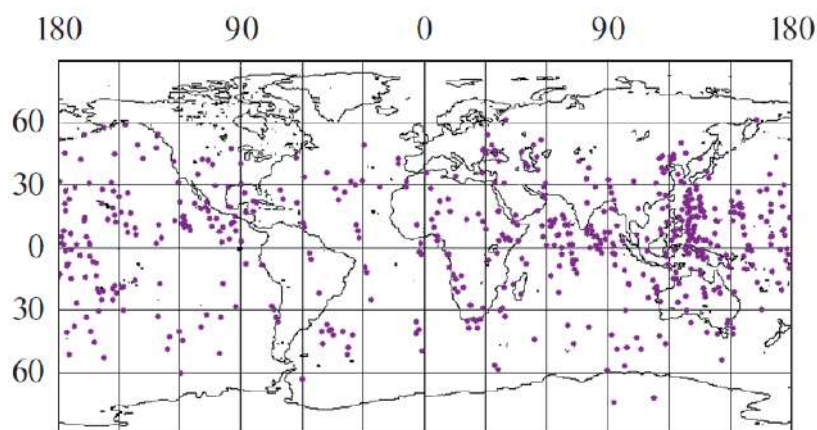


Рис. 4.31: Одиночные события, регистрируемые на ИСЗ «Вернов».

4.7. Внегрозовые транзиентные явления

Одной из нерешенных загадок физики атмосферы является возникновение так называемых внегрозовых оптических транзиентных явлений. Эти явления разнообразны по длительности, спектральному составу излучения, географии возникновения и пр. Регистрация таких вспышек как правило происходит в районах, для которых не характерно активное грозообразование, на высоких широтах. Предлагаются различные механизмы, но пока ни один из них не является доказанным. Не исключен и антропогенный фактор. В связи с этим задача накопления

экспериментальных данных с целью набора статистики, обобщения наблюдаемых характеристик явлений, их возможной взаимосвязи с факторами космической погоды и геомагнитной активности является актуальной. При таких наблюдениях важно обеспечить глобальный охват Земного шара, включая высокие широты, авроральную и полярную области, а также непрерывность наблюдений в мониторинговом режиме.

4.7.1. Обзор экспериментальных данных

Одна из первых работ, в которой обсуждается регистрация внегрозовых световых явлений – статья [188]. В работе описаны быстрые атмосферные пульсации, обнаруженные в ясную погоду во время наземных измерений с помощью системы фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), рассчитанных на регистрацию излучения в диапазонах 320–430 нм и 430–650 нм. Измерения проводились в течение двух лет в Анкаре (Турция). Авторы выделяют следующие характерные особенности таких явлений: длительность порядка 1 мс, преимущественное направление прихода – с юга (относительно места наблюдения), образование групп по 5–6 вспышек (длительность одной группы ~10 мин). Такие пульсации были зарегистрированы в 46 % ночей, когда происходили наблюдения.

Также подобные быстрые атмосферные пульсации регистрировались авторами работы [189]. Наблюдения велись в ясные безлунные ночи с помощью трех фотометров. Большая часть событий была идентифицирована авторами работы, как рассеянное излучение далеких молниевых разрядов, благодаря одновременной регистрации оптического излучения и электромагнитных импульсов. Однако среди всех событий были выделены две вспышки длительностью более 20 мс, которые не удалось проассоциировать ни с одной молнией. Одной из гипотез образования таких вспышек является высыпание частиц радиационных поясов Земли (РПЗ), которые дают флуоресцентное свечение в атмосфере. Однако длительность зарегистрированных явлений существенно меньше характерной длительности событий (более 100 мс), связанных с высыпанием частиц, измеренной в эксперименте [190].

Другое событие, опубликованное в работе [16], было

зарегистрировано в эксперименте (MEIDEX sprite Campaign, январь 2003) на борту шаттла Columbia. Было зарегистрировано «необычное» транзиентное световое явление в красном спектральном диапазоне (860 ± 40 нм), которое авторы назвали TIGER (Transient Ionospheric Glow Emission in Red). Оно было зарегистрировано южнее острова Мадагаскар над Индийским океаном. Длительность события составила менее 33 мс, а ближайшая молния была зафиксирована за 0,23 с и более чем в 1000 км от места регистрации события. Авторы показали отсутствие молнии также и в области сопряженной точки геомагнитного поля Земли. Кроме того, не было зарегистрировано электромагнитного импульса («вистлера»), который мог бы вызвать высыпание частиц из РПЗ.

Аналогичные быстрые атмосферные пульсации длительностью порядка 1 мс наблюдались и в более ранних экспериментах, описанных в работах [191, 192]. Не удалось найти связь с грозowymi регионами и для четырех более длительных оптических вспышек (60–400 мс) в работе [193].

Таким образом, в ряде экспериментов наблюдаются разнообразные короткие оптические явления длительностью от 1 до 30 мс с разным спектральным составом излучения, которые происходят вдали от грозowych районов. В этих работах обсуждаются четыре возможные гипотезы происхождения TLE вдали от грозowych регионов:

1. Рассеяние света от очень удаленных молний. Данная гипотеза представляется наиболее простой и естественной, однако она требует наличия молнии на расстоянии до 1000 км, что выполняется далеко не всегда в приведенных выше работах. Более того, рассеянный сигнал далекой молнии должен быть сильно ослаблен.
2. Свечение атмосферы при высыпании релятивистских электронов из радиационных поясов Земли. Высыпания электронов РПЗ, при взаимодействии с электромагнитным импульсом молниевозряда, наблюдались экспериментально (так называемые Lightning-induced electron precipitation – LEP). Однако эти явления относительно медленные (порядка 100–500 мс) для типичных энергий электронов РПЗ – 100 кэВ.

3. Ускорение электронов молниевыми разрядами в сопряженной точке геомагнитного поля с их последующим проникновением в атмосферу. Эта гипотеза предлагается и обсуждается в работе [132].
4. Возможным источником оптических всплесков могут быть микровсплески высыпающихся электронов. Длительность таких микровсплесков лежит в диапазоне от единиц до сотен миллисекунд, энергии частиц от единиц кэВ до нескольких МэВ. Максимум частоты возникновения таких всплесков приходится на $L=6$ (субавроральная зона), хотя наблюдаются вплоть до $L=3,5$. Более того, имеются публикации о спутниковых измерениях, свидетельствующие о наблюдении микровсплесков потоков электронов и в средних широтах: $L=2-3$ [194]. Данная гипотеза обсуждается в работе [195], где показано, что такие короткие высыпания могут сопровождаться видимыми оптическими вспышками).

Тем не менее ни одна из гипотез пока не подтверждена достаточным набором экспериментальных данных.

4.7.2. Внегрозовые вспышки по данным спутника «Вернов»

Для данных со спутника «Вернов» был осуществлен специальный поиск внегрозовых событий по максимально жестким критериям, чтобы отсеять все возможные грозовые транзиенты и приборные эффекты. Найденные внегрозовые события были подробно проанализированы [196].

За время работы спутника «Вернов» детектором ДУФ было зарегистрировано около 8,5 тысяч атмосферных вспышек. Большая их доля связана с грозовой и молниевой активностью. Для анализа корреляции зарегистрированных событий, с молниевой активностью и выделения «необычных» безгрозовых и безмолниевых транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ), были использованы данные наземных сетей регистрации молний WWLLN и Vaisala GLD360.

Для первого этапа совместного анализа с наземными сетями регистрации молний использовались данные сети WWLLN. Вспышки регистрировались детектором ДУФ с точностью по времени 4,5 с, а

их географические координаты с точностью до размера поля зрения (круг с радиусом $R \approx 250$ км на поверхности Земли или угловое расстояние $\Delta \approx 2,2^\circ$). Таких временных и пространственных точностей оказывается недостаточно для поиска совпадений зарегистрированных спутником вспышек и отдельных молниевых разрядов. Для обеспечения большей надежности отбора безмолниевых событий и исключения эффекта пропуска молний сетью WWLLN был применен критерий, реализующий кластерный подход к анализу имеющихся данных (поиск совпадения с большими по размеру грозовыми районами, на большей площади и за большее время). Диаметр типичной грозовой области в среднем составляет около 100 км, а средняя продолжительность грозы около 30 минут. Поэтому был проведен поиск совпадений событий из баз данных спутника «Вернов» и сети WWLLN для временного интервала ± 30 минут от момента записи осциллограммы вспышки (т.е. в течение одного часа) и в пределах большой пространственной области, задаваемой угловым размером $\Delta \approx 10^\circ$ (1100 км на поверхности Земли). Если для события не находилось ни одного совпадения с молниями в области с угловым размером Δ и временем регистрации в пределах ± 30 минут, то оно засчитывалось как безгрозовое событие. Важно отметить, что в таком случае эффективность сети WWLLN по регистрации грозы существенно выше эффективности измерения отдельной молнии (более 80 %) [197].

Из всех событий ТАЯ, зарегистрированных спутником «Вернов», в 47 событиях не нашлось совпадений с молниями в сети WWLLN по описанному выше критерию. Эти события были разделены на 4 типа по виду временного профиля УФ и ИК сигналов:

1. короткие всплески излучения < 3 мс в УФ-диапазоне. Значимый сигнал, выше уровня 3σ не зарегистрирован в ИК канале детектора — 34 события;
2. один и более всплеск излучения < 3 мс в УФ и ИК канале — 7 событий;
3. излучение длительностью 30 мс. Отсутствует значимый сигнал в ИК диапазоне длин волн — 3 события;
4. события с длинной временной структурой. Свечение в УФ-диапазоне

превышает уровень 3σ в течение более 120 мс. Отсутствует значимый сигнал в ИК диапазоне — 3 события.

Из выделенных событий, 3 и 4 классы представляют наибольший интерес:

1. их длительность более 10 мс и они имеют временную структуру, эти события не могут быть следствием одиночных сбоев регистрирующей аппаратуры;
2. по той же причине они не могут быть следствием попадания заряженных частиц в стеклянные части фотодетектора (фильтр, фотокатод ФЭУ). Важно отметить, что в детекторе ТУС на спутнике «Ломоносов» такие имитации хорошо выделяются за счет характерного трека в фотоприемнике, состоящем из матрицы ФЭУ и фильтров [113]. После анализа первых данных детектора ТУС стало ясно, что большая доля слабых событий длительностью в один такт, на спутнике «Вернов» являются следствием этого же эффекта — прямого попадания частиц низких энергий (протонов от 100 МэВ) в фотоприемник;
3. в этих событиях полностью отсутствует сигнал в ИК диапазоне, где существенный вклад в интегральный сигнал дает характерная линия атомарного кислорода 777,4 нм [183]. Эта линия как правило используется для идентификации молниевых разрядов в спутниковых оптических наблюдениях (см. например, [198]).

Таких событий нашлось всего 6. Их временные профили показаны на рис. 4.32. Три из них (а, б, в) имеют длительность около 30 мс, оставшиеся три события длятся больше 120 мс.

Был проведен дополнительный анализ отобранных событий с данными высокоэффективной наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 (средняя по всему Земному шару эффективность составляет 57 %, в Северном полушарии > 80 % [165]). Этот анализ подтвердил отсутствие гроз и молниевых разрядов в области образования этих событий.

Для каждого события, помимо грозовой активности в области

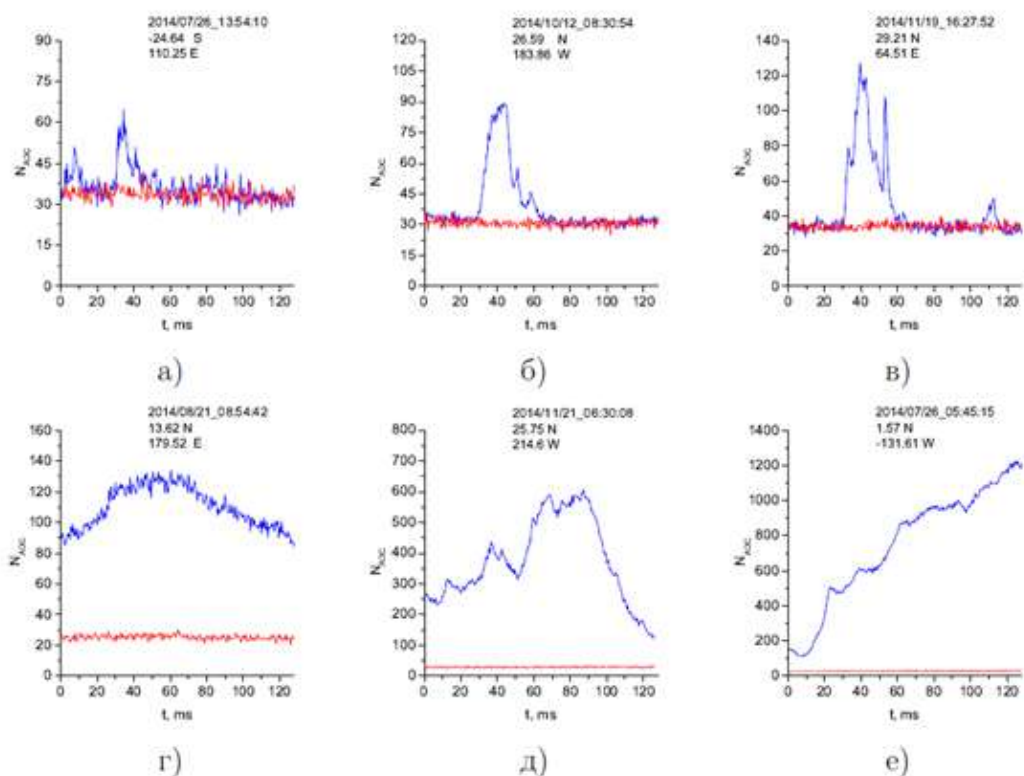


Рис. 4.32: Временные профили внегрозовых событий с длительностью более 10 мс из базы данных спутника «Вернов» в УФ (синяя кривая) и ИК (красная кривая) диапазонах длин волн.

регистрации, было также проверено наличие облачного покрова, для подтверждения внегрозовой природы явления. Были рассмотрены инфракрасные снимки земной поверхности геостационарных спутников GOES из базы данных CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System⁵). Показано, что в случае наличия облаков, они не являются грозовыми.

Дополнительно для данных событий было проведено исследование грозовой активности в сопряженной точке геомагнитного поля с целью проверки гипотезы [132], связанной с проникновением заряженных частиц, ускоренных в грозовой области в сопряженной точке. Было показано, что, например, для события, произошедшего 19.11.2014 в 16:27:52, не было грозовой активности как в месте регистрации, так и в сопряженной точке в области площадью $\sim 10^6$ км². В то же время, для события, произошедшего 21.11.2014 в 06:30:08, наблюдались молнии вблизи сопряженной точки

⁵<https://www.class.ngdc.noaa.gov/saa/products/welcome>

геомагнитного поля, однако, ближайшая молния для этого события была обнаружена более чем за 2 минуты до измерения события и через 5 минут после него, причем на расстоянии более 500 км.

Таким образом, в данных УФ-детектора на борту спутника «Вернов» обнаружены вспышки излучения в земной атмосфере вдали от грозных районов и молниевой активности. Эти внегрозные транзиенты можно считать новым типом УФ-транзиентов в атмосфере, не связанным с наличием грозной активности в районе наблюдений. Механизм возникновения таких транзиентных явлений пока неясен.

4.7.3. Необычные события, наблюдаемые в эксперименте ТУС

Ряд необычных событий, которые до сих пор не нашли объяснения, наблюдалось в эксперименте ТУС на спутнике «Ломоносов». Одно из таких необычных событий было отобрано триггером ШАЛ над Индийским океаном, в 150 км от континента Австралии (широта $-26,95^\circ$, долгота $112,05^\circ$) 26.04.2017 [199]. Зарегистрировано событие вдали от гроз и в безоблачных условиях. По данным наземной сети регистрации молний Vaisala GLD360 расстояние до ближайшей грозы составило примерно 500 км к северо-западу от события. Спутниковые данные об облачности в зоне события указывают на отсутствие грозных облаков. Это событие имеет специфическую пространственно-временную динамику развития (см. рис. 4.33). Оно начинается с мгновенной и мощной вспышки с центром яркости в ячейке (3,6), которая затем находится в насыщении все время записи. В других пикселях (модули 2, 3 и 4) наблюдается перемещение максимума сигнала во времени. Скорость перемещения сигнала по матрице фотоприемника настолько велика, что можно сделать предположение, что источник движется в поле зрения телескопа с релятивистской скоростью (скоростью света). В этом случае, зенитный угол трека относительно оси зрения телескопа составляет около 80° . Движение объекта происходит по направлению к Земле, что оставляет возможность астрофизического происхождения события. Амплитуды сигналов в той части события, где наблюдается перемещение максимума свечения, на порядок больше ожидаемых от ШАЛ с энергией 100 ЭэВ. В конце осциллограмм сигналы

в ячейках достигают некоторого уровня, который намного выше уровня шума до начала события. Это означает, что часть УФ-сигнала продолжает излучаться в течение более 100 мкс.

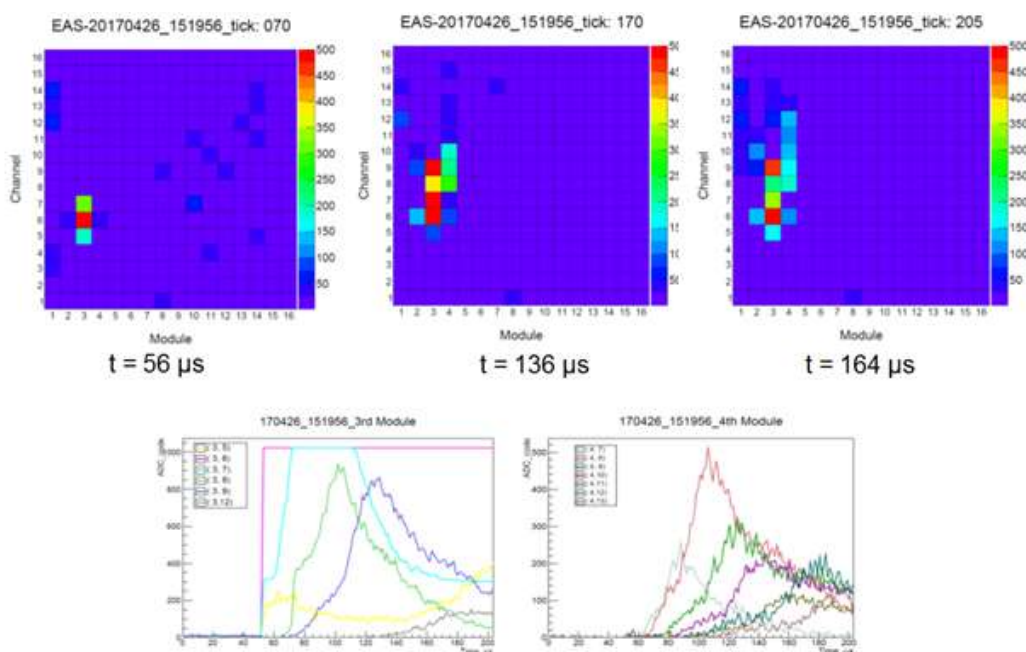


Рис. 4.33: Карты каналов для трех моментов времени (сверху) и осциллограммы сработавших пикселей модулей 3 и 4 (снизу) для необычного события зарегистрированного детектором ТУС 26.04.2017.

Еще целый ряд других событий (более 50), также произошедших в спокойных условиях (вдали от гроз), зарегистрирован детектором ТУС. Большая часть событий имеет схожую временную структуру сигнала. Характерные особенности этих событий — резкий фронт нарастания сигнала (за 1 мкс детектор практически выходит в насыщение) с последующим быстрым перемещением источника излучения в поле зрения прибора. Одно из событий зарегистрировано над Атлантическим океаном (31,5 с.ш., 22,5 з.д.) 28 июля 2017 года в режиме ШАЛ [14]. Для этого события по данным Vaisala GLD360 отсутствуют удары молний в радиусе 1000 км от места наблюдения в течение целого часа. В начале события виден очень крутой пик (код АЦП увеличивается в сотни раз менее чем за 1 мкс) и гораздо более медленное послесвечение, продолжающееся в течение 20–40 мкс (рис.4.34). Яркость первого пика настолько велика, что сигнал появляется во всех пикселях фокальной поверхности (это связано с рассеянием света на шероховатостях зеркала). Был проведен

анализ облачного покрытия вблизи поля зрения детектора ТУС по данным геостационарных спутников. На рис. 4.35 приведены данные спутника GOES-13 о верхней температуре облаков. Только низкие теплые облака находятся рядом с полем зрения детектора или отсутствуют вовсе. Эти облака не характерны для гроз и не могут производить разрядов молнии.

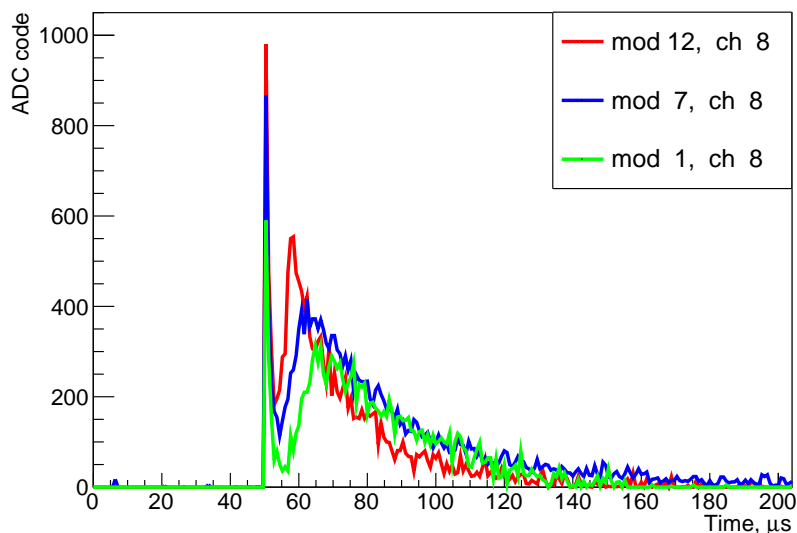


Рис. 4.34: Оциллограммы трех каналов фотоприемника для события 28.07.2017, зарегистрированного детектором ТУС.

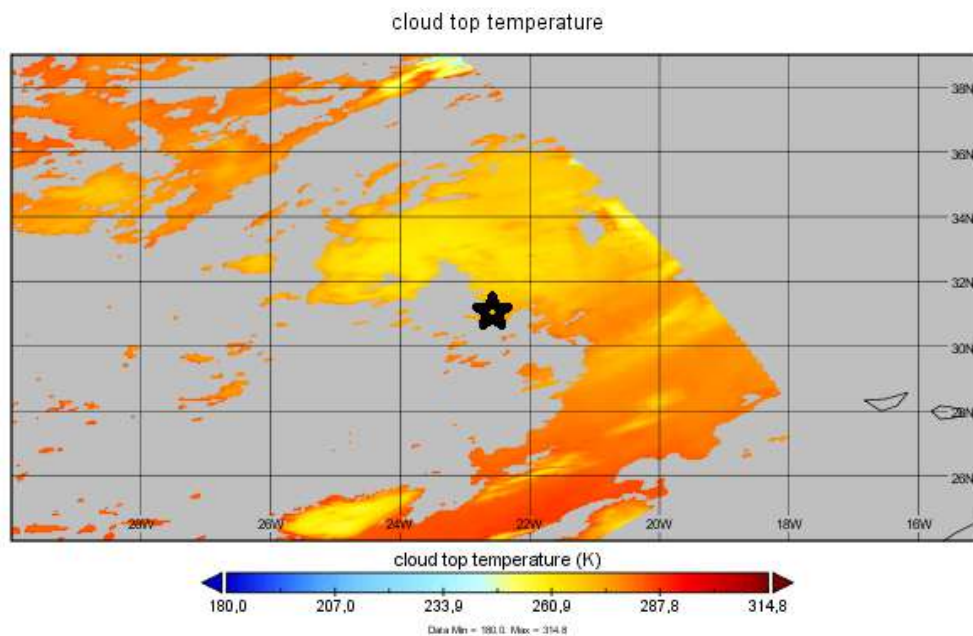


Рис. 4.35: Температура верхней границы облаков по данным спутника GOES-13 в районе события детектора ТУС от 28.07.2017 (черная звезда на рисунке).

Аналогичные, но менее яркие, события были зарегистрированы в высоких широтах: над Баренцевым морем и над Антарктидой. Похожие события регистрируются и детектором «УФ атмосфера» (результаты пока не опубликованы), что исключает методическую природу явлений, поскольку детекторы используют разные режимы измерений сигнала в ФЭУ.

В заключении раздела стоит отдельно сказать о тех особенностях, которые были выявлены в ходе исследования транзиентных атмосферных явлений на спутниках МГУ и обсуждении их интерпретации в литературе.

Вспышки излучения в ближнем УФ-диапазоне можно условно разделить на яркие (“luminous”), для которых суммарное число фотонов (N_{ph}) в источнике более 10^{23} и тусклые (“dim”, $N_{ph} < 10^{23}$). Эти вспышки различаются по географическому распределению (тусклые распределены более равномерно по поверхности Земли), длительности (тусклые вспышки как правило короче) и спектральному составу: длинные вспышки более синие. При этом, яркие вспышки лежат в диапазоне интенсивностей, соответствующих известным типам транзиентным световых явлений (TLEs). Вспышки излучения регистрируются длительными сериями, выходящими за пределы грозовых областей. С одной стороны, более 80 % УФ-вспышек регистрируется в грозовых районах, но не связаны с определенной родительской молнией [12], а с другой – обнаружен отдельный класс вспышек заведомо внегрозовой природы [196].

Для объяснения совокупности наблюдательных данных в работе [200] рассматривается механизм возникновения разрядов в верхних слоях атмосферы, не связанных с грозовыми процессами в тропосфере.

На высотах 50–70 км при определенных метеорологических условиях могут существовать области усиления электрического поля, превышающего пробойные значения. Это реализуется в случае появления объемных зарядов, связанных либо с естественными флуктуациями, либо пониженной проводимостью атмосферы, либо сочетанием этих двух факторов, и, возможно, некоторых других.

В условиях низкой проводимости эти области могут существовать

относительно длительное время. В районе неоднородностей распределения плотности объемного заряда электрическое поле может быть достаточным для возникновения пробоя. Т.е. выполнено условие $\nu_i = \nu_a$, где ν_i – частота ионизации, ν_a – частота диссоциативного прилипания электронов.

Длительность импульсов зависит от высоты пробоя, и наилучшее совпадение с данными спутника «Вернов» реализуется на высотах 60–70 км, учитывая, что длительность свечения должна превышать время развития пробоя на второй стадии и существовать еще до 100 мс на этапе релаксации. Энергия пробоя от десятых долей до нескольких МДж, что с учетом эффективности конверсии в УФ-излучение попадает в диапазон энергий вспышек, измеренных детектором ДУФ.

Таким образом, несмотря на некоторые существенные упрощения и приблизительное совпадение расчетов с результатами эксперимента на спутнике «Вернов», предложенная в работе [200] модель мезосферного разряда является единственной, которая качественно объясняет УФ-вспышки внегрозовой природы.

4.8. Выводы по главе 4.

Результаты, полученные в ходе исследования транзиентных УФ-вспышек в атмосфере Земли по данным спутниковых экспериментов МГУ, можно сформулировать таким образом:

1. Обнаружен класс транзиентных атмосферных явлений в ближнем УФ диапазоне, обладающие следующими характеристиками: распределение по энергии, выделяемой в ближнем УФ диапазоне (10^{20} до 10^{26} фотон/событие), географическое распределение событий с большой энергией соответствует грозovým областям и регистрируются длительными сериями вдоль траектории космического аппарата, события с меньшей энергией имеют относительно равномерное географическое распределение и не связаны с молниевой активностью.
2. Выделен новый класс УФ-транзиентных явлений внегрозовой природы, характеризуемые следующими параметрами: длительность вспышки порядка 30 мс, отсутствует излучение в красном диапазоне

спектра (более 600 нм), энергия излучения не более 3 кДж. Эти события не связаны с грозовой активностью как в месте регистрации, так и в сопряженной точке магнитного поля Земли.

3. Разработаны методики оценки типа и высоты разряда на основе спектральных измерений для детекторов ДУФ и АУРА.
4. Показано, что транзиентные световые явления типа ELVES образуются при максимальном токе обратного удара родительской молнии менее 30 кА.
5. Исследование событий типа ELVES с борта ИСЗ может быть эффективным средством зондирования внутриоблачных процессов.

Глава 5. Тонкая пространственно-временная структура аврорального свечения¹

5.1. Пульсирующие полярные сияния

Пульсирующие полярные сияния (ППС) – это квазипериодические ($T \sim 2\text{--}20$ с) модуляции интенсивности аврорального свечения, вызванные высыпаниями энергичных электронов. ППС имеют разнообразную протяженную форму и состоят, как правило, из отдельных пятен светимости с квазипериодическими изменениями яркости во времени [201].

Первое описание событий такого типа приведено в работе [202]. Последующие оптические наблюдения ППС выявили ряд особенностей их пространственно-временной структуры и позволили провести феноменологическую типологизацию. Каждое пятно обычно представляет собой серию пульсаций, которая, как правило, длится несколько минут, а амплитуда и форма остаются постоянными в течение всего времени [201, 203]. Пульсация каждого пятна некогерентна с соседними пятнами: период пульсации и фаза разных пятен не связаны друг с другом [204]. Различают «чистые» пульсации постоянного размера и формы, расширяющиеся пульсации, потоковые (streaming), распространяющиеся с севера на юг, вспыхивающие (flashing) и др. [205]. Размеры и формы пульсирующих авроральных свечений существенно различаются. Например, пульсирующие авроральные дуги имеют ширину порядка 1–10 км и длину 1000 км; квазилинейные формы имеют ширину того же порядка, что и дуги, но длину порядка 100 км. Пульсирующие пятна обычно имеют размеры 10–200 км в поперечнике [206, 207].

¹Глава 5 написана на основе следующих работ из списка публикаций автора по теме диссертации: А35, А38, А41–А43, А46, А47.

Как было сказано выше, типичный период пульсаций светимости находится в диапазоне от нескольких до нескольких десятков секунд. Это основные пульсации (main pulsations), развивающиеся по схеме включено/выключено. Длительность фазы включено лежит, как правило, в пределах двух типичных диапазонов: 0,2–0,5 с и 2–6 с [205]. Частота основных пульсаций антикоррелирует с размером пульсирующих структур и коррелирует с интенсивностью излучения [208]. В большом количестве случаев (50 %) наблюдается так называемая «внутренняя модуляция», представляющая собой более быстрые (около 3 Гц) пульсации на фазе «включено» основных пульсаций [209].

С точки зрения временной структуры различают также мерцающее полярное сияние, которое имеет тенденцию развиваться в пределах дискретных продольных дуг и модулируется в диапазоне 6–8 Гц, а иногда и гораздо более высоких частот [210].

Механизмы образования пульсирующих полярных сияний до сих пор недостаточно изучены. В работе [211] проведено прямое сравнение пульсирующих полярных сияний, наблюдаемых с земли на станции Syowa в Антарктике и на борту спутника FAST (The Fast Auroral Snapshot satellite) и показано, что исходные области генерации или модуляции энергичных частиц находятся выше, чем FAST, в области от $2 R_E$ до $6 R_E$ от спутника. В то же время многие работы связывают как основные периоды модуляции, так и тонкую структуру пульсирующих сияний с ОНЧ сигналами (квазипериодическими и хоровыми излучениями) [212–214].

Характерная высота пульсирующего свечения соответствует нижнему E-слою ионосферы и составляет около 90–110 км [215]. Это свидетельствует о том, что авроральные пульсации генерируются высыпанием электронов с энергией 10–40 кэВ (см, например, Turunen et al., 2009 [216]). Причиной этих высыпаний считается взаимодействие магнитосферных электронов с электромагнитными ОНЧ волнами [212, 217]. С другой стороны, в работе [218] продемонстрировано, что и ППС, и микровсплески релятивистских электронов являются продуктами взаимодействия хоровых волн с частицами, т.е. микровсплески релятивистских и субрелятивистских электронов являются

высокоэнергетическим (>100 кэВ) хвостом пульсирующих электронов полярного сияния. Эти электроны высыпаются существенно глубже в атмосферу и повышают уровень ионизации до 70 км [219, 220]

Для исследования тонкой временной структуры пульсирующих и мерцающих сияний требуется временное разрешение выше, чем то, которым обладают большинство, используемых в настоящее время, авроральных камер, работающих в мониторинговом режиме. Технологические достижения последних десятилетий расширили возможности измерения полярных сияний, например, камеры стали более чувствительными и имеют более высокую частоту кадров. В последнее время для измерения полярных сияний используются EMCCD (Electron multiplying charge coupled device) устройства. Такие камеры использовались в работе [75] для наземной мультиспектральной высокоскоростной съемки мерцающего полярного сияния и являлись важной частью проекта PWING [221] – высокоскоростного устройства регистрации изображений полярных сияний (частота дискретизации – 100 Гц). Скоординированные наблюдения спутника Arase и проекта PWING за пульсирующим полярным сиянием [222] обнаружили быструю модуляцию интенсивности пульсирующего полярного сияния в масштабе времени в десятки миллисекунд и его возможную связь с последовательными дискретными элементами хорových волн и с их внутренними структурами.

Еще одним примером успешного использования EMCCD для наблюдения за полярным сиянием является The Multispectral Observatory Of Sensitive EMCCDs (MOOSE) – система камер, которая была развернута в Poker-Флэт, Аляска. Она состоит из пяти камер Andor Ixon DU-888 EMCCD, каждая из которых имеет фотосенсор размером 1024×1024 пикселей [223, 224]. Для уменьшения теплового шума ПЗС необходимо охлаждать изнутри до -70° С. Другим возможным решением, использованным в данной работе, является многоанодный ФЭУ с квантовой эффективностью около 40 %, коэффициентом усиления более 10^6 и низким уровнем шума, практически не зависящим от температуры.

Высококочувствительные фотометры на основе матриц ФЭУ или МАФЭУ с миллисекундным временным разрешением оказались

эффективным инструментом для исследования пульсирующих полярных сияний. В данном разделе диссертационной работы приведены результаты исследований пространственно-временного распределения ППС по результатам космического эксперимента «ТУС», а также первые результаты работы системы изображающих фотометров на Кольском полуострове – RAIPS.

5.2. Исследования УФ-пульсаций в космическом эксперименте «ТУС»

Как было сказано выше, детектор «ТУС» представляет собой высокочувствительный телескоп-рефлектор, направленный в надир (см. раздел 1 диссертации). Пульсации УФ-свечения в полярной области, описанные далее, были зарегистрированы в режиме с временным разрешением 6,6 мс. В этом режиме прибор работал три непродолжительных периода: 26 декабря 2016–10 января 2017; 28 февраля 2017–21 марта 2017; 8–15 ноября 2017 (более подробная информация представлена в таблице 5.1). Всего за эти периоды было измерено около десяти тысяч событий, из них 2575 на высоких широтах (более 50°) в северном полушарии. В Южном полушарии спутник освещался Солнцем на высоких широтах (полярный день).

Таблица 5.1: Время работы и количество событий в режиме с временным разрешением 6,6 мс.

№	Даты	Общее число событий	Число событий с пульсациями
1	26.12.2016 – 10.01.2017	3501	32
2	28.02.2017 – 21.03.2017	4368	2
3	08.11.2017 – 15.11.2017	2225	32
		10094	66

Различные типы событий имеют разную форму осциллограмм и пространственную структуру. Наиболее распространенные типы событий:

1. Стационарный шум. В этом случае все осциллограммы представляют собой флуктуации сигнала при относительно равномерной засветке всех пикселей.

2. Стационарный источник на поверхности Земли. В этом случае имеет место явное перемещение изображения в фокальной плоскости со скоростью, соответствующей скорости спутника. Максимум сигнала перемещается от пикселя к соседнему за ~ 100 временных интервалов. Это может быть город, и в этом случае наблюдается модуляция сигнала промышленной частотой (100 Гц), или облака, более эффективно отражающие лунный свет.
3. События с высокой интенсивностью свечения. Эти события измеряются в зоне перехода день/ночь и над самой яркой частью овала полярного сияния. В эти периоды срабатывает автоматическая система регулировки усиления, которая снижает высокое напряжение, когда интенсивность измеряемого света становится большой. Время подстройки составляет 105 мс, таким образом, в данном случае видны очевидные 16 «ступенек» в осциллограмме. Детектор в этом режиме работы значительно менее чувствителен и может измерять только яркие события.
4. События с медленным и монотонным изменением сигнала.
5. События с пульсациями сигнала ближнем УФ. В этом случае наблюдаются вариации сигнала, не связанные с движением спутника. Эти пульсации могут возникать в ряде соседних пикселей или во всем поле зрения. Именно такие события отбирались и рассматривались отдельно [225]

Характерный пример события с пульсациями в ближнем УФ-диапазоне показан на рис. 5.1. На левой части рисунка представлена карта каналов (пространственная структура события) с разрешением 4 км на высоте 100 км через 430 мс от начала записи. На правой панели показан сигнал одного пикселя (модуль 7, канал 14). Наблюдается нарастание сигнала в течение 1,2 с с пульсацией. Период пульсаций около 0,3 с, амплитуда составляет 10 % от фонового уровня.

Анализ географического распределения

Отобранные события имеют характерное географическое распределение. На карте, показанной на рис. 5.2, хорошо видно, что

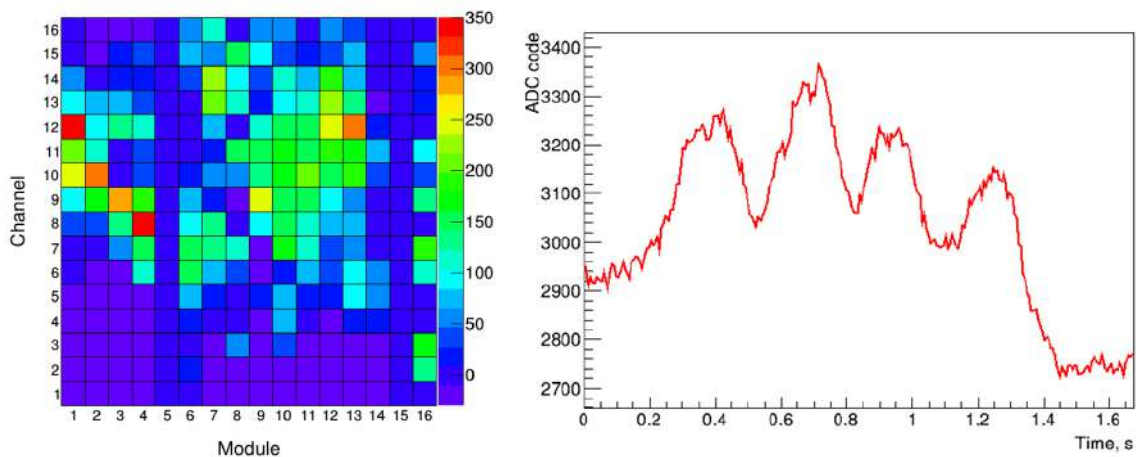


Рис. 5.1: Пример события с пульсациями, измеренными детектором ТУС 10 ноября 2017 г. в 13:31 UTC.

пульсации расположены в северном полушарии вдоль овала полярных сияний от 52° до 71° с.ш. и равномерно распределены по долготам. Они регистрируются как над сушей, так и над океаном, что указывает на то, что источники событий не являются антропогенными. Цветовая диаграмма на карте показывает распределение всех событий, зарегистрированных детектором ТУС за указанные промежутки времени. Отчетливо видны участки антропогенной и грозовой активности, так как они вызывают частые срабатывания триггерной системы.

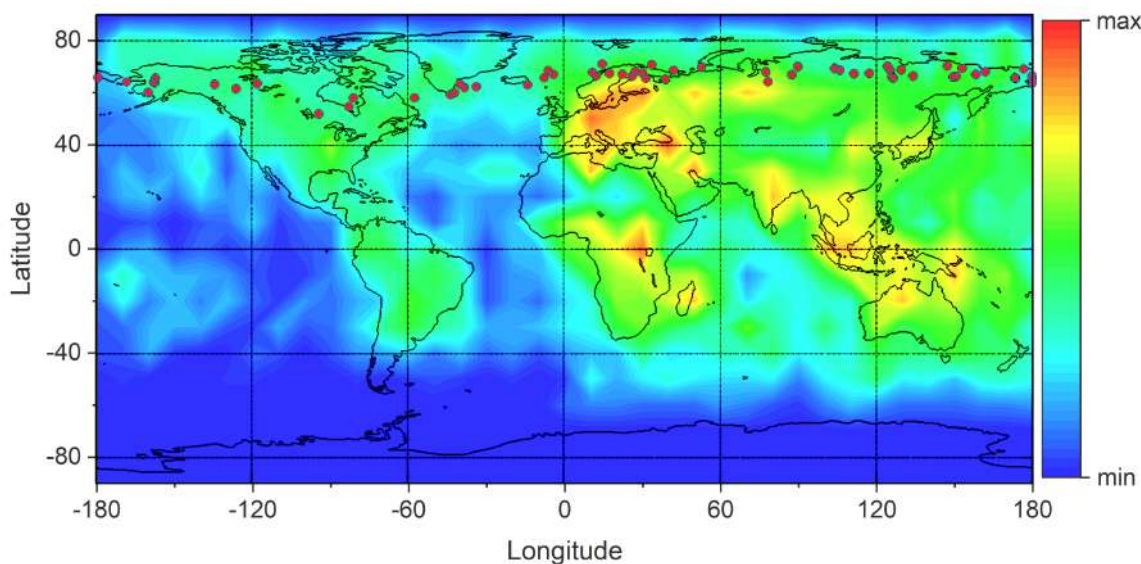


Рис. 5.2: Карта событий с УФ-пульсациями (красные точки). Цветная диаграмма показывает распределение всех событий, зарегистрированных детектором.

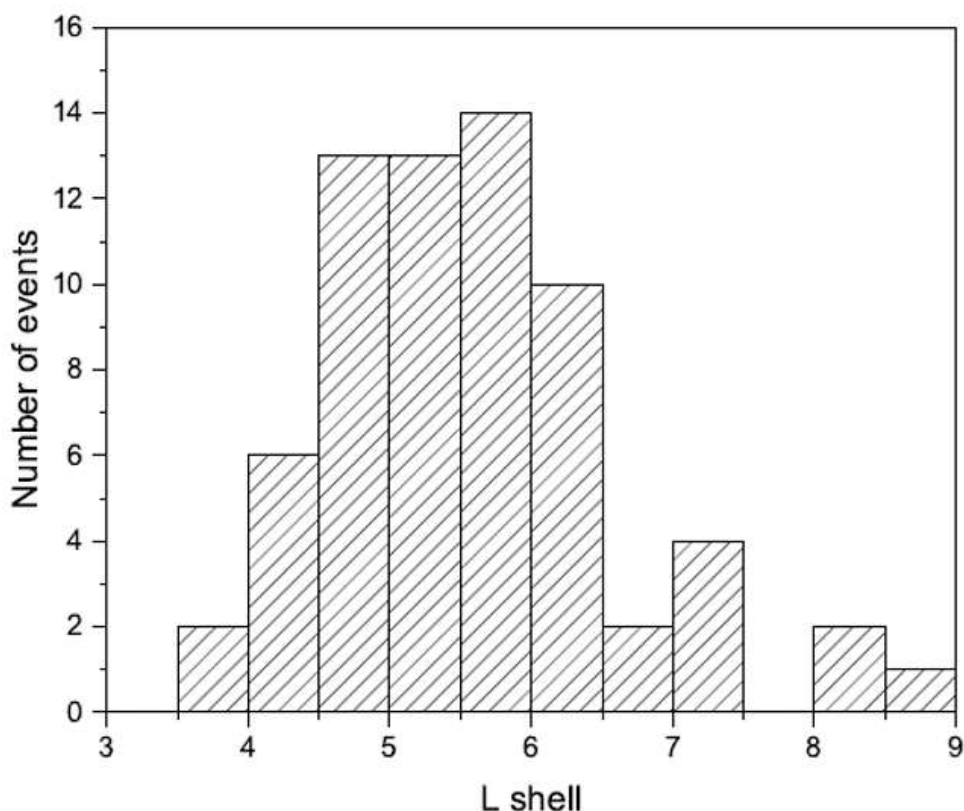


Рис. 5.3: Распределение событий с УФ-пульсациями по L-оболочке.

Распределение этих событий по L-оболочке показано на рис. 5.3. Оказалось, что большинство событий измерено (67 %), когда спутник находился между L равными 4 и 6, где, как правило, расположена экваториальная кромка аврорального овала и полярная граница внешнего радиационного пояса Земли.

Над самым овалом средняя интенсивность излучения довольно высока, и детектор ТУС регулирует усиление ФЭУ для снижения чувствительности, что может быть причиной отсутствия этих событий прямо над овалом. Но также нет таких событий в полярной шапке или полярной границе овала полярных сияний, где ТУС работает с максимальным коэффициентом усиления ФЭУ.

Анализ геомагнитной обстановки

AE-индекс использовался для оценки уровня геомагнитной активности на момент измерения события. Данные взяты из Мирового центра данных по солнечно-земной физике в Москве². В левой части

²<http://www.wdcb.ru>

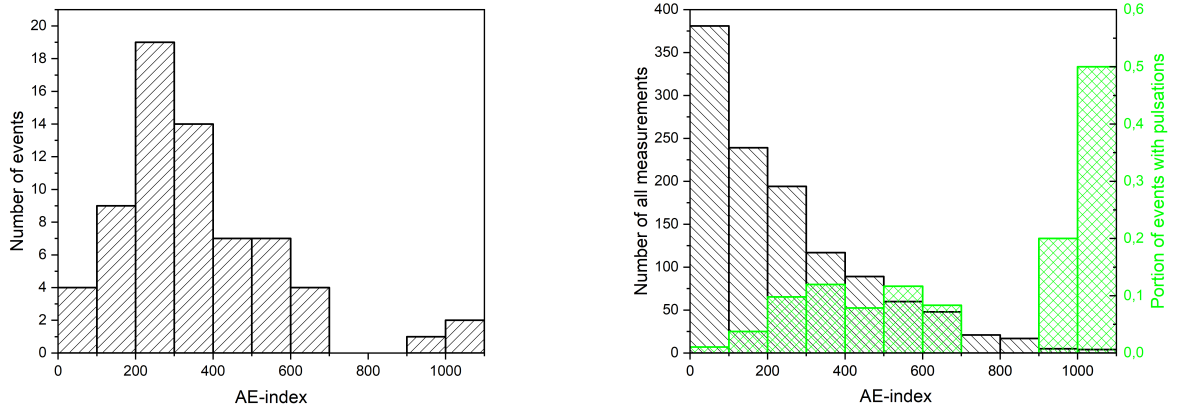


Рис. 5.4: Слева: распределение событий с пульсациями по АЕ-индексу. Справа: распределение всех измерений в высоких широтах по АЕ-индексу (черная гистограмма) и доли событий с пульсациями (зеленая).

рисунок 5.4 показано распределение числа событий с пульсациями по АЕ-индексу. Видно, что максимальное количество событий (33) измерено между 200 и 400 нТл. Для получения реальной частоты появления событий в различные периоды геомагнитной активности необходимо учитывать экспозицию измерения в различных условиях. Черная гистограмма на правой панели рисунка 5.4 показывает распределение времени наблюдения по АЕ-индексу. Частота событий, нормированная на время наблюдения для данного АЕ-индекса, показана на зеленой гистограмме. Видно, что эффективная доля событий во время сильных геомагнитных возмущений становится значительно больше.

Положение и общая интенсивность аврорального излучения сильно зависят от геомагнитной активности. В частности, это наблюдалось в эксперименте на спутнике «Вернов», в котором УФ-излучение атмосферы регистрировалось без пространственного разрешения однопиксельным широкоугольным детектором с малой апертурой [30]. На рис. 5.5 показаны два примера измерений спутником «Вернов». Представлена интенсивность УФ-излучения вдоль траектории спутника на ночной стороне орбиты. Быстрое уменьшение сигнала в самом начале осциллограммы и увеличение в конце – переход с дневной на ночную сторону орбиты. Видно, что при более высоком АЕ-индексе интенсивность УФ-излучения в авроральной

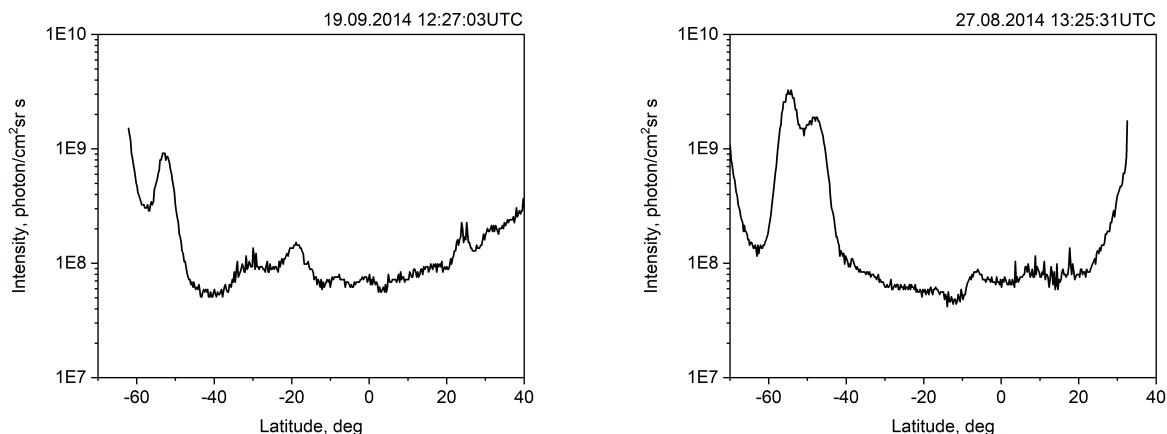


Рис. 5.5: Вариации интенсивности УФ-излучения, измеренные спутником «Вернов» вдоль траектории для промежутков с разной геомагнитной активностью: $AE \sim 100$ на левой панели, $AE \sim 1000$ на правой.

области становится вдвое больше, экваториальная граница смещается в сторону низких широт более чем на 10° и появляются два пика свечения.

Таким образом, можно ожидать, что местоположение событий с УФ-пульсациями также будет меняться в зависимости от геомагнитной активности и перемещаться к экватору во время геомагнитных возмущений. Проанализировав широтное распределение событий и величину AE -индекса, обнаружено отсутствие корреляции между местоположением событий и геомагнитными условиями. Это может свидетельствовать о том, что их происхождение не соответствует высыпанию частиц из хвоста магнитосферы и может быть связано с более устойчивыми структурами в магнитосфере Земли (например, внешним радиационным поясом).

Анализ пространственно-временной структуры

Измеряемые события имеют разнообразную временную структуру: различную интенсивность, количество пульсаций и их период. Для изучения характерных частот пульсаций в рассматриваемых событиях были выбраны каналы с различной временной структурой и проведен Фурье-анализ. Для каждого события определялись пики на спектрограмме, соответствующие частотам пульсаций. Распределение осциллограмм по частоте колебаний приведено на рис. 5.6. Наиболее часто регистрируемые

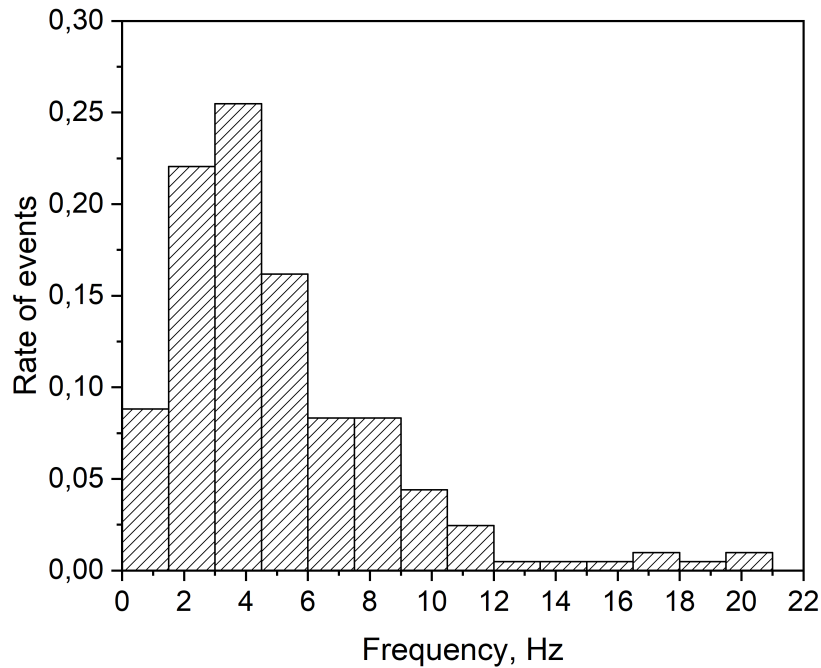


Рис. 5.6: Распределение событий по частоте.

пульсации лежат в области 3–5 Гц. Встречаются события с частотой до 20 Гц.

Важно также определить размер области, в которой возникают пульсации свечения. Поле зрения одного пикселя прибора составляет 10 мрад, что соответствует 5 км на поверхности Земли (и 4 км на высоте 100 км). Однако функция рассеяния точки зеркала (ФРТ) создает изображения размером более одного пикселя. ФРТ измерялась во время предполетных испытаний зеркала для разных углов падения [226]. Типичный среднеквадратичный радиус пятна варьируется примерно от 7–8 мм для приосевых пучков и до 8–10 мм на краю поля зрения (при 4, 5°). Таким образом, даже от точечного источника сигнал будет распределяться между несколькими соседними пикселями (размер пикселя 15 мм).

Для оценки размера области свечения анализировались изменения временной структуры сигнала по пикселям фотоприемника. Если осциллограммы схожи во всех пикселях, это означает, что процесс одинаков во всем поле зрения, а размер пространственной структуры превышает 80 км. Наблюдение различных временных структур в разных частях (группах пикселей) фотоприемника свидетельствует о том, что свечение

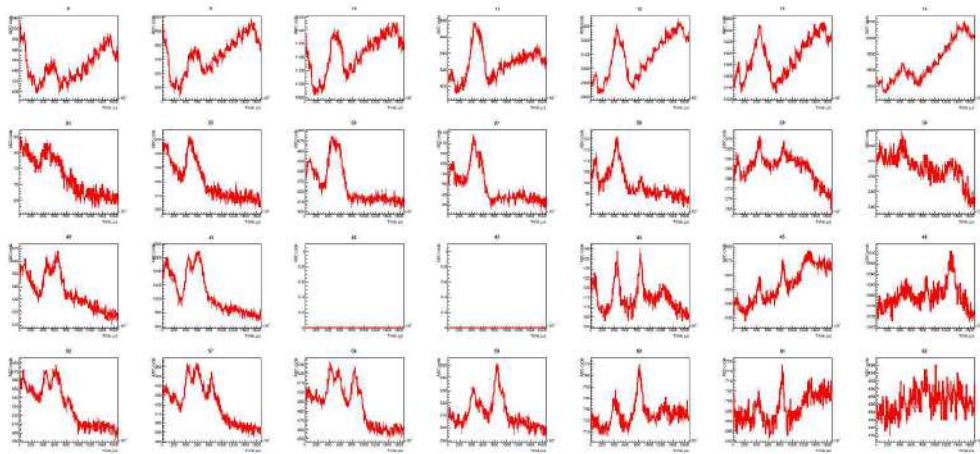


Рис. 5.7: Осциллограммы для пикселей части фотоприемника. Событие измерено 26 декабря 2016 г. в 22:47 UTC над Швецией.

и вызывающий его процесс носят локальный характер в горизонтальном направлении. В большинстве случаев наблюдаются события второго типа, т.е. небольшие группы соседних пикселей имеют отличную от остальных пикселей временную структуру.

Один из примеров показан на рисунке 5.7, где изображена часть фотодетектора (сигналы 28 соседних пикселей). Хорошо видно, что в верхней части фотодетектора имеется только единичный пик, в правом нижнем — измеряются два остроконечных пика, а в левом нижнем — какая-то сложная структура сигнала. Есть два пикселя с нулевым сигналом. Это неработающие пиксели.

Форма и распределение сигнала определяются пространственной структурой источника и ФРТ зеркала. Но наблюдаемые изменения структуры от пикселя к пикселю показали, что типичный горизонтальный размер источника составляет около 10 км.

Таким образом, эти события обладают следующими характерными особенностями:

1. Наличие вариаций интенсивности свечения с амплитудой 10–20 % относительно среднего уровня яркости аврорального свечения. Частота наблюдаемых пульсаций находится в диапазоне от 1 до 10 Гц.
2. Области свечения локализованы в пространстве и имеют характерный

размер порядка 10 км, причем одновременно в поле зрения детектора может наблюдаться несколько областей с различными временными структурами.

3. Частота регистрируемых событий возрастает с ростом геомагнитной активности (АЕ-индексом).
4. Пульсации расположены вдоль экваториальной границы аврорального овала в диапазоне широт от 52° с.ш. до 71° с.ш.
5. 67 % событий зарегистрировано в области L-оболочек 4–6, где, как правило, расположена экваториальная кромка аврорального овала и полярная граница внешнего радиационного пояса Земли.

Данные события могут быть связаны с высокоэнергетической частью высыпающихся электронов, вызывающих слабое пульсирующее излучение в авроральной области на высотах порядка 70 км. Это подтверждается тем, что, во-первых, детектор ТУС проводил измерения свечения в диапазоне длин волн 300–400 нм, что соответствует первой отрицательной системе излучения азота N_2^+ , которое преобладает глубоко в атмосфере. Во-вторых, относительно низкая геомагнитная широта событий, соответствующая внутренней магнитосфере (т.е. область радиационных поясов), и отсутствие связи положения с уровнем геомагнитной активности, показывают, что эти события возможно связаны с высокоэнергетической частью высыпающихся электронов.

Более того, с помощью компьютерного моделирования было показано, что и пульсирующее полярное сияние, и микровсплески релятивистских электронов являются одним и тем же продуктом взаимодействия хорových волн и частиц, а микровсплески релятивистских электронов являются высокоэнергетическим хвостом пульсирующих электронов полярного сияния [218]. Поток субрелятивистских электронов с энергией $\sim 0,5$ МэВ составляет $1-10 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}\text{кэВ}^{-1}$. Этот поток будет производить около 10^3 фотонов на входном зрачке телескопа за такт измерения детектора ТУС. Это излучение довольно слабое, но измеримое телескопом ТУС. Поток электронов с энергией 100–200 кэВ на два порядка больше, и УФ-излучение будет давать значительный сигнал в детекторе.

5.3. Корреляция УФ-пульсаций и магнитосферных потоков электронов высокой энергии

Для подтверждения этой гипотезы (связи УФ-пульсаций с потоками высокоэнергичных электронов) необходимы одновременные измерения УФ-пульсаций и потоков заряженных частиц. На спутнике «Ломоносов» была реализована уникальная возможность одновременного наблюдения полярных сияний детектором ТУС и сопутствующих потоков энергичных частиц при помощи детектора «ДЭПРОН» (Дозиметр Электронов, ПРОтонов, Нейтронов) [227]. «ДЭПРОН» предназначен для регистрации высокоэнергичных частиц космического излучения и для измерения поглощенных от них доз радиации. Прибор представляет собой систему из двух кремниевых полупроводниковых детекторов и двух гелиевых газоразрядных счетчиков тепловых нейтронов. Порог регистрации электронов составляет около 1 МэВ.

Проведен анализ событий ППС, зарегистрированных детекторами ТУС и «ДЭПРОН» с 1 по 10 января 2017 года (первый период работы детектора с временным разрешением 6,6 мс).

Данный период пришелся на фазу восстановления умеренной геомагнитной бури (SYM/H индекс не превышал значения -60 нТл), при этом в течение нескольких дней наблюдалась высокая суббуревая активность (см. рис. 5.8. Такие периоды, когда в течение двух и более дней значение AE-индекса не падает ниже 200 нТл, а пиковые значения доходят до 1000 нТл, получили название High-Intensity, Long-Duration, Continuous AE Activity (HILDCAA) Events [228].

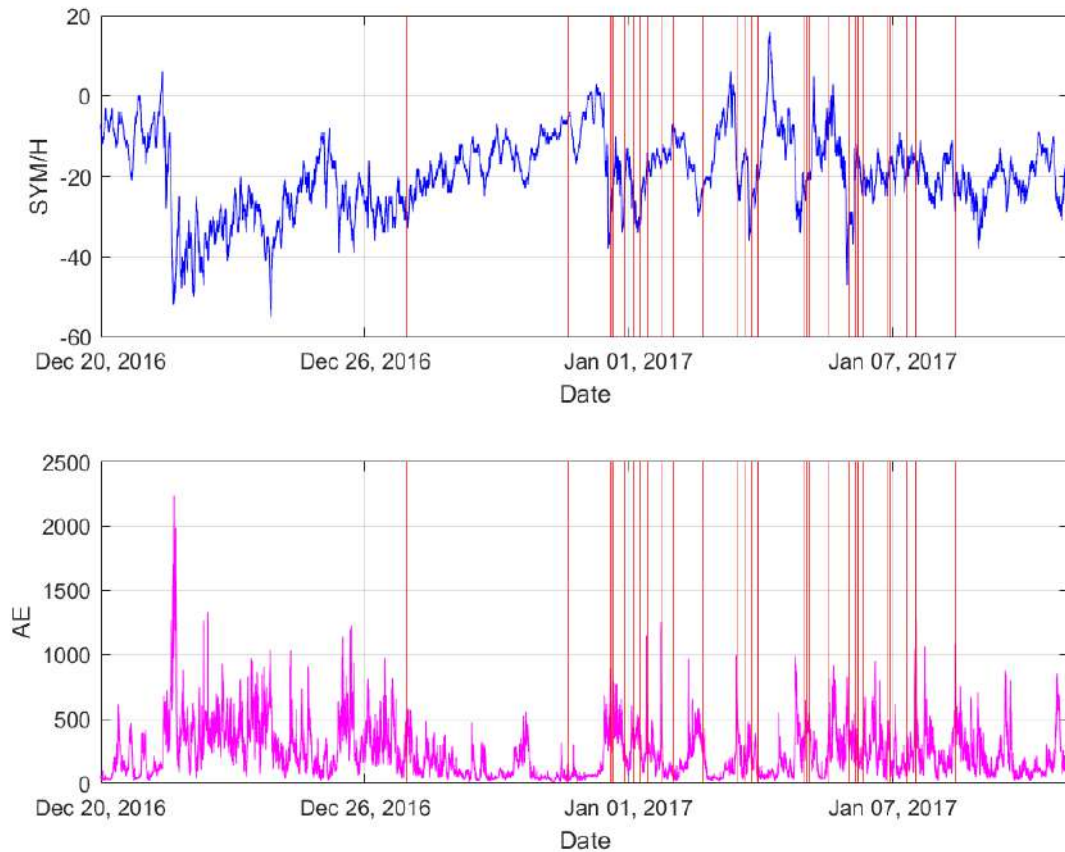


Рис. 5.8: Геомагнитная обстановка в декабре 2016 – январе 2017. Сверху – SYM/H индекс, снизу AE-индекс. Вертикальные красные линии показывают моменты регистрации событий с УФ-пульсациями детектором ТУС.

Было произведено двадцать пять совместных измерений, среди которых значительное увеличение потоков заряженных частиц было зарегистрировано для 15 пульсирующих событий. Наблюдается два характерных случая: (1) положение УФ-события совпадает с максимумом потока частиц внешнего РПЗ (или находится между максимумом и полярной границей РПЗ) — 10 измерений, (2) увеличение потоков заряженных частиц появляется в области к полюсу от высокоширотной границы РПЗ, и УФ-пульсации совпадают с этим «выступом» — 5 измерений. На рисунке 5.9 показаны примеры обоих типичных случаев. Можно увидеть расположение УФ-пульсаций во время пересечения внешнего радиационного пояса. Таким образом, около 60 % событий измерено в тесной связи с РПЗ в периоды усиления потоков быстрых электронов.

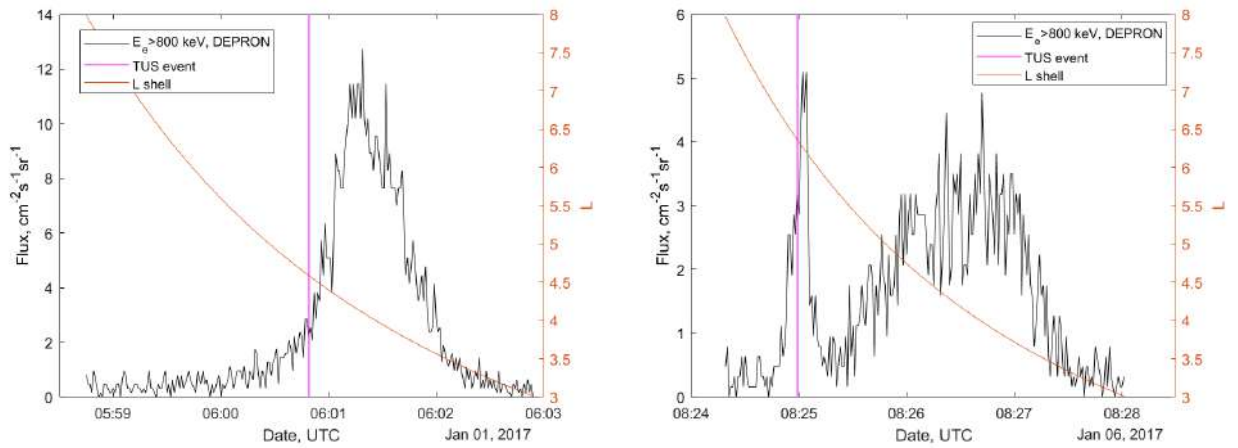


Рис. 5.9: Данные измерений детектора ДЭПРОН во время двух событий с пульсациями: 01.01.2017, 6:00:49 UTC; 06.01.2017, 08:24:59 UTC. Вертикальными линиями показаны моменты регистрации событий телескопом ТУС.

Как было сказано выше, взаимодействие волны с частицей является одним из основных механизмов, влияющих на динамику внешнего радиационного пояса. Он может быть источником как ускорения, так и рассеяния захваченных электронов. В качестве примера, данные частотного спектра прибора EMFISIS [229] на борту спутников RBSP представлены на рис. 5.10 за два периода, соответствующих наблюдениям телескопа ТУС. Видно, что в эти периоды развивались активные процессы генерации хоровых волн. События с пульсациями, измеренные 07 января 2017 в 12:39:14 UTC (L-оболочка события 4,4, MLT = 23.3) и 08 января 2017 в 10:38:19 UTC (L = 4,9, MLT = 23,1) лежат внутри этих периодов. В моменты измерений события с пульсациями детектором ТУС спутники RBSP находились приблизительно в тех же областях геомагнитного поля, что и Ломоносов: спутник RBSP-B находился на L = 4,55 и MLT = 23,5, а RBSP-A - на L = 5,5, MLT = 23,1. Видна интенсивная волновая активность с частотой близкой к гирочастоте электронов f_c (несколько кГц, обозначено на рисунке верхней белой линией) во время наблюдаемых УФ-пульсаций.

Для второго промежутка времени (ноябрь 2017), когда детектор ТУС производил измерения с временным разрешением 6,6 мс, а «ДЭПРОН» был выключен, использовались данные космического аппарата «Метеор-М2». Спутник «Метеор-М2» имеет на борту систему регистрации частиц различной энергии (от долей кэВ до нескольких МэВ), позволяющую

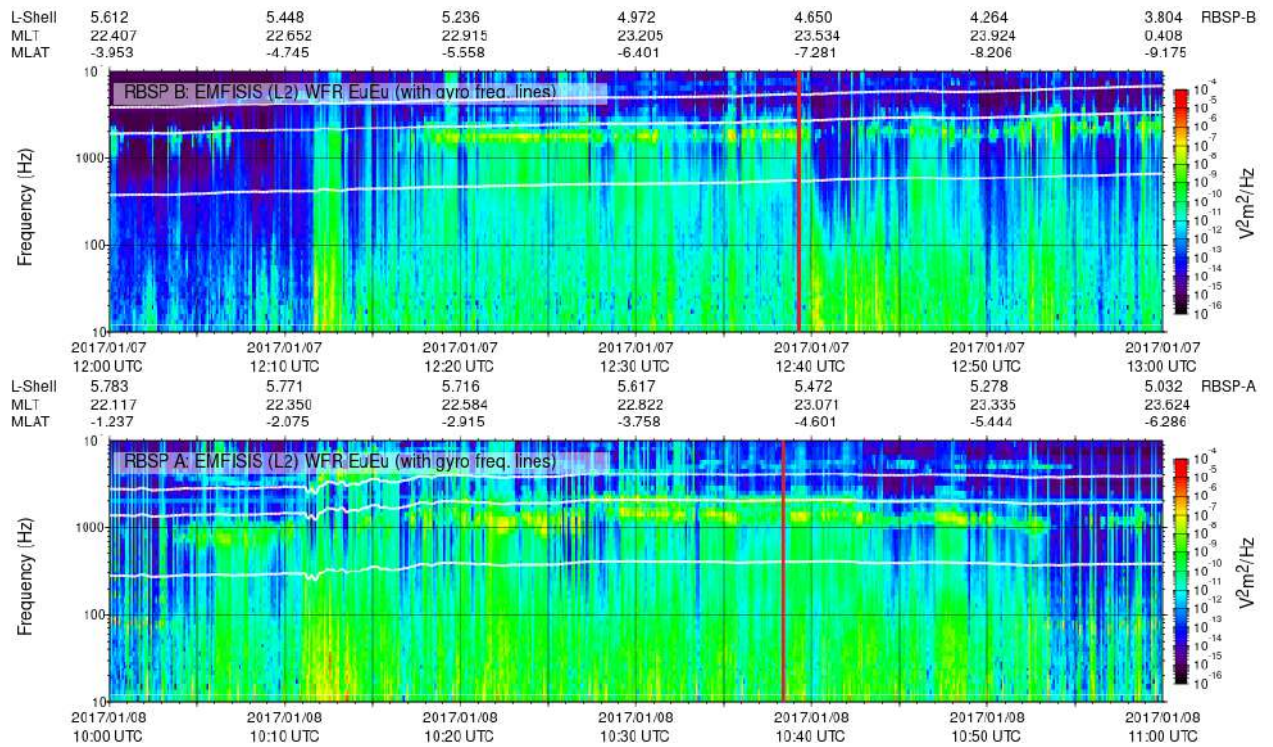


Рис. 5.10: Данные EMFISIS RBSP во время двух измерений событий детектора ТУС с пульсациями. Верхняя панель — 7 января 2017 г., 12:39:14 UTC, нижняя — 8 января 2017 г., 10:38:19 UTC. Белые линии показывают гирочастоту электронов f_c (верхняя линия), $0,5f_c$ (средняя линия), $0,1f_c$ (нижняя линия). Красные вертикальные линии показывают моменты регистрации событий с пульсациями детектором ТУС.

определять направления потоков, тип частиц (протоны или электроны) и их энергии. Детекторы системы дают возможность разделить потоки в двух направлениях: часть детекторов направлена в зенит, часть – вдоль вектора тангенциальной скорости [230].

Геомагнитная обстановка была схожа с первым периодом наблюдений: фаза восстановления умеренной геомагнитной бури (SYM-H в максимуме бури составлял -90 нТл), высокая суббуревая активность (см. рис. 5.11).

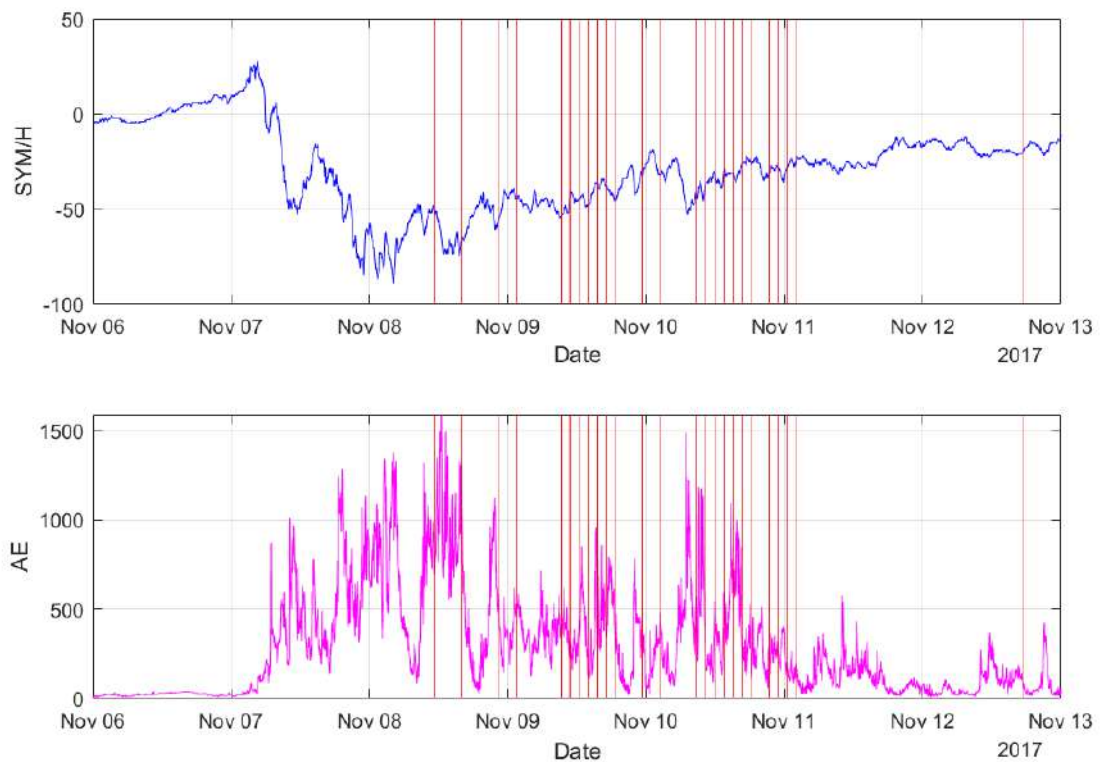


Рис. 5.11: Геомагнитная обстановка в ноябре 2017. Сверху – SYM/H индекс, снизу AE-индекс. Вертикальные красные линии показывают моменты регистрации событий с УФ-пульсациями детектором ТУС

В качестве одновременных наблюдений детектором ТУС и приборами спутника «Метеор-М2» были выбраны моменты, когда «Метеор-М2» находился на той же L-оболочке, что и спутник «Ломоносов», в пределах полуса часа полета от него и с близким значениями MLT. Всего было обнаружено 17 таких совместных наблюдений. Совместные измерения с детекторами энергичных частиц (> 100 кэВ) позволяют определить

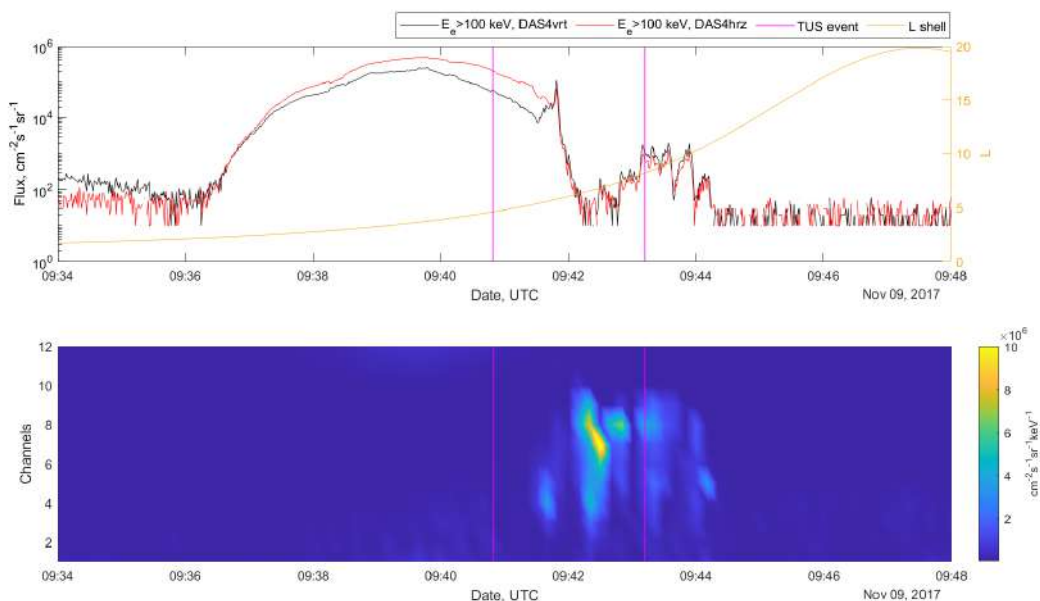


Рис. 5.12: Пример сравнения данных детектора ТУС и спутника Метеор-М2. Сверху: измерения потока электронов высокой энергии ($E > 100$ кэВ) двумя ортогональными детекторами (вертикальным – vrt и горизонтальным – hrz). Снизу: измерения плазменного детектора, номера каналов соответствуют следующей средней энергии: 1–0,032 кэВ; 2– 0,065 кэВ, 3–0,13 кэВ, 4–0,26 кэВ, 5–0,52 кэВ, 6–1,04 кэВ, 7–2,08 кэВ, 8–4,16 кэВ, 9–8,32 кэВ, 10–16,64 кэВ. Вертикальными линиями показано положение событий с УФ-пульсациями ТУС.

пространственное положение события относительно радиационного пояса Земли (РПЗ), а измерения потоков частиц низких энергий (менее 16 кэВ) дают возможность определить положение аврорального овала на момент регистрации события детектором ТУС

На рис. 5.12 приведены примеры двух событий. Вертикальными малиновыми линиями показаны моменты регистрации пульсаций детектором ТУС, на верхней панели – измерения потока электронов высокой энергии ($E > 100$ кэВ) двумя ортогональными детекторами (вертикальным – vrt и горизонтальным – hrz), а на нижней – измерения плазменного детектора (энергии, соответствующие каналам анализатора, указаны в подписи к рисунку). Первое событие расположено в районе внешнего РПЗ, а второе – на более высоких, авроральных широтах, в области повышенного потока электронов с энергией 100 кэВ к полюсу от РПЗ. Причем для второго события наблюдается так называемая

изотропизация потоков (это следует из выравнивания показаний вертикального и горизонтального детекторов), что говорит о появлении существенной доли высыпающихся частиц, которые могут привести к свечению в атмосфере. Из всех 17-ти событий в пяти случаях высыпание электронов высокой энергии (>100 кэВ) измерено вблизи максимума внешнего РПЗ, а в 12 случаях в области аврорального овала наблюдалось усиление потока электронов как низкой, так и высокой энергии.

Активная генерация хорových волн началась 7 ноября 2017, во время главной фазы геомагнитной бури, и продолжалась в течение всей фазы восстановления (рис. 5.13). Различия в орбитах спутников в ноябре 2017 г. (RBSP-A и -B располагались в предполуденном секторе MLT, а наблюдения ТУС были произведены в послеполуночном участке орбиты спутника Ломоносов) не позволяют найти хорошее совпадение положения измерений (L и MLT) обоих спутников. Однако обычно область генерации хорových волн во время главной фазы и фазы восстановления магнитной бури занимает почти весь сектор 0–6–12 MLT [230]. Высокая волновая активность в предполуденной области определенно проявляется в ускорении и рассеянии заряженных частиц по всему сектору 0–6–12 MLT.

УФ-пульсации наблюдаются во время длительной геомагнитной активности (события HILDCAA). В такие периоды активно формируются хоровые волны в магнитосфере Земли, которые связаны с активным питч-угловым рассеянием и ускорением электронов. Как продемонстрировано в [231], эти события могут эффективно ускорять энергичные электроны до релятивистских энергий. Позже было показано, что события HILDCAA характеризуются усилением потока релятивистских электронов в трех диапазонах энергий ($E > 0,6$ МэВ, $E > 2$ МэВ, и $E > 4$ МэВ) по сравнению с уровнями потока до события [232]. А также, что эти события ответственны за частые и интенсивные инъекции в магнитосферу анизотропных электронов в диапазоне энергий ~ 10 –100 кэВ, которые являются источником генерации хорových волн и последующего ускорения электронов до энергий даже выше нескольких МэВ. События HILDCAA коррелируют с увеличением потоков магнитосферных релятивистских ($E > 2$ МэВ) электронов, наблюдаемых на геосинхронной орбите.

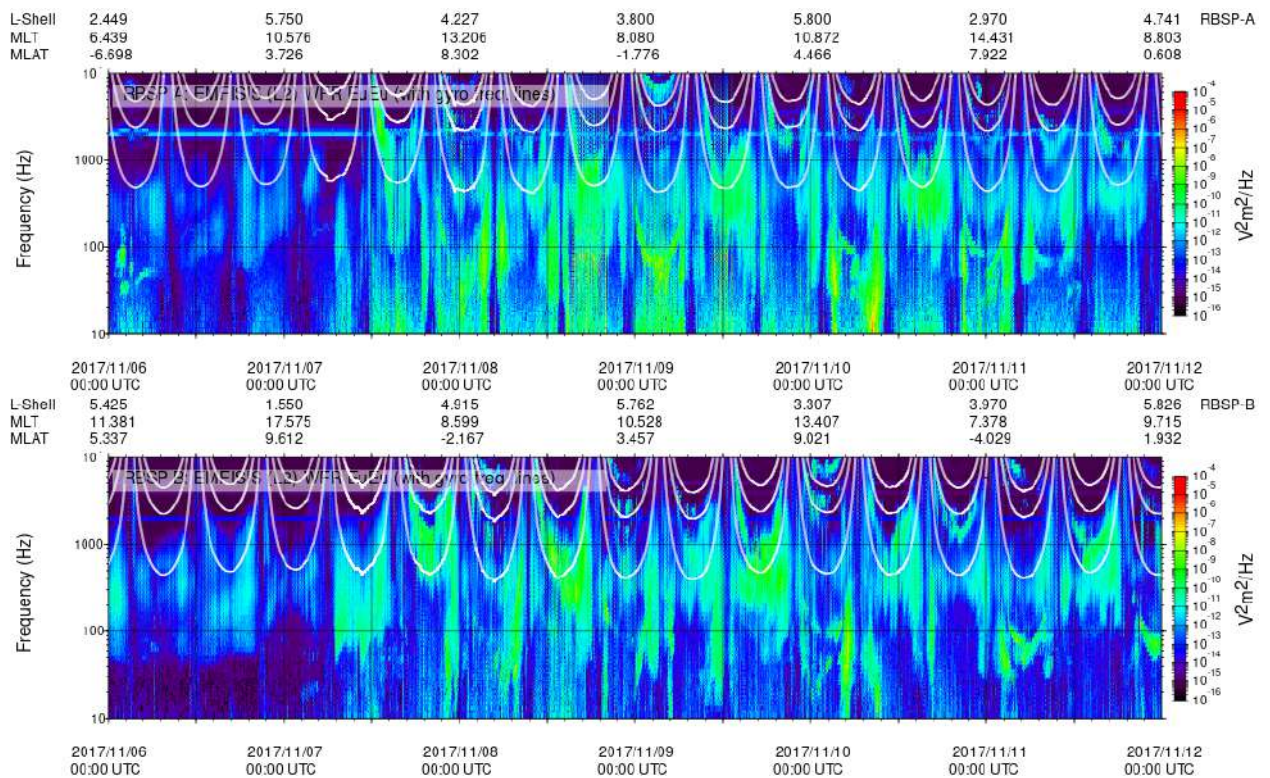


Рис. 5.13: Измерения электрического поля на спутнике RBSP-B с помощью прибора EMFISIS WRF.

Задержка между увеличением потока и началом HILDCAA составляет около 1,5 дней.

Таким образом, в результате проведенного анализа сопоставления УФ-пульсаций с данными о потоках частиц можно сделать следующие выводы [233]:

1. Пульсирующие события наблюдаются также через несколько дней после начала суббуревой активности и события HILDCAA, во время фазы слабого восстановления бури с многочисленными пиками AE-индекса, что дает нам право предположить наличие электронов релятивистских энергий.
2. Обнаружено, что во время регистрации пульсаций действительно наблюдаются повышенные потоки энергичных электронов по данным спутников «Метеор-М2» и «Ломоносов» (прибор «ДЭПРОН»).
3. Во время некоторых событий с пульсациями регистрируется изотропизация потоков электронов с энергией >100 кэВ по данным

спутника «Метеор-М2», которая свидетельствует о высыпаниях этих частиц в атмосферу Земли.

Проведенный анализ показывает, что ППС сопровождаются повышенными потоками высыпающихся высокоэнергичных частиц, которые вызывают дополнительную ионизацию атмосферы на относительно низких высотах (менее 80 км). Однозначная взаимосвязь этих эффектов может быть установлена при одновременном наблюдении потоков заряженных частиц и ближнего УФ-излучения атмосферы с высоким временным разрешением (секундное временное разрешение детекторов заряженных частиц на спутнике «Метеор-М2» и Ломоносов этого сделать не позволяет).

5.4. Исследования пространственно-временной структуры и вариаций спектра свечения ППС в проекте RAIPS

5.4.1. Проект RAIPS. Постановка задачи

Дальнейшее развитие методики регистрации пульсирующих сияний осуществляется в рамках наземного эксперимента RAIPS – Pulsating Aurora Imaging Photometers System [70]. Основная задача проекта – измерение тонкой пространственно-временной и высотной структуры свечения ППС с целью определения максимальных энергий высыпающихся электронов, вызывающих данный тип свечения. Предпосылками для постановки такой задачи являются как модельные исследования ППС, в которых показана возможность ускорения частиц до релятивистских энергий хоровыми волнами [218], так и экспериментальные результаты по измерению глубины ионизации атмосферы во время ППС [219, 220] и потоков релятивистских электронов в спутниковых (например, SAMPEX [234]) и баллонных (например, BARREL [235]) наблюдениях. Релятивистские электроны проникают гораздо глубже в атмосферу и создают более высокий уровень ионизации, вплоть до 65 км ([220, 236, 237]), а также изменяют химический состав мезосферы [238, 239]. По этой причине большой интерес представляет мониторинг и детальное измерение низковысотного излучения полярных сияний, создаваемого электронами с высокими

энергиями. Два высокочувствительных фотометра, размещенные в двух разных обсерваториях, направленные в одну и ту же область атмосферы, позволяют проводить такие триангуляционные измерения и мониторинг с миллисекундным временным разрешением.

Глубина проникновения частиц в атмосфере Земли однозначно связана с максимальной энергией потока. С помощью стереоскопических наблюдений возможно промерить профиль вертикального излучения, а значит, оценить энергетическое распределение выпадающих частиц (электронов) и определить максимальную энергию частиц в направленном потоке из магнитосферы.

Энергичные электроны магнитосферного происхождения осуществляют сложное движение, в соответствии с конфигурацией магнитного поля Земли, и попадают в верхние слои атмосферы в высоких широтах. Столкновительная диссипация энергии в атмосферных газах приводит к генерации каскада вторичных электронов и быстрой изотропизации потока. Глубина проникновения в газовую мишень определяется пройденной массой и однозначно находится из начального энергетического спектра электронов в пучке, путем свертки с функцией диссипации, полученной ранее методом Монте-Карло [240].

В [216] с использованием модели SIC (Sodankyla Ion and Neutral Chemistry) выполнено детальное моделирование проникновения моноэнергетических электронных пучков в атмосферу и получена зависимость скорости ионизации от энергии и высоты. Другая модель, Energetic Precipitation Monte Carlo (EPMC), была разработана и применена для расчета скорости ионизации в зависимости от высоты, создаваемой моноэнергетическими электронами [241]. Результаты расчетов обеих моделей согласуются друг с другом и могут быть использованы для первичной реконструкции энергии частиц по высотному профилю излучения ППС. Высотные профили скорости ионизации, полученные в [216], показаны на левой панели рисунка 5.14 для сравнения с предложенной геометрией эксперимента. Поле зрения второго фотометра оптимизировано для измерения всего диапазона возможных высот эмиссий ППС.

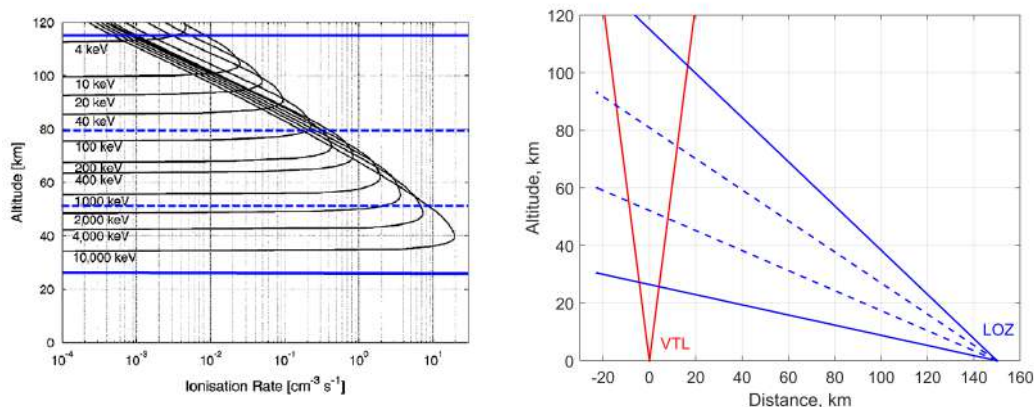


Рис. 5.14: Слева: Профили скорости ионизации из [216]. Справа: Схематическое изображение полей зрения фотометров. VTL — «Верхнелуломская» обсерватория (красные линии), LOZ — Обсерватория «Ловозеро» (синие линии). Пунктирные синие линии обозначают индивидуальные поля зрения трех фотодетекторных модулей фотометра PAIP-L.

5.4.2. Аппаратура проекта PAIPS

В рамках проекта PAIPS разработаны два изображающих фотометра в ближнем УФ-диапазоне (с возможностью проведения спектрометрических измерений). Подробно аппаратура описана в первой главе диссертационной работы.

5.4.3. Некоторые результаты измерения фотометра

По результатам работы фотометра в обсерватории «Верхнелуломская» проведен анализ отдельных интересных случаев наблюдения пульсирующих полярных сияний. В частности, рассмотрено событие 26.01.2022, 02:00–04:00 UT [242].

Геофизическая обстановка в ночь 25–26.01.2022 была умеренно возмущенная. До полуночи по UT по наземным магнитным и оптическим данным на Кольском полуострове произошло несколько суббуревых активизаций, SYM-H-индекс был ~ 40 нТ, AE-индекс в максимуме доходил до ~ 1000 нТ. После 00 UT активность на широтах ниже 70° СШ уменьшилась, $AE < 50$ нТ, $SYM-H \sim 20$ нТ. Однако по данным камеры всего неба на Шпицбергене, авроральная активность на широтах южнее 78° СШ в виде активных лучистых дуг оставалась значительной. После 01:40 UT

значение АЕ-индекса увеличилось до 150 нТ, а около 01:50 UT наблюдалась яркая дуга, что может быть признаком инъекции плазмы из дальних областей плазменного слоя в хвосте магнитосферы по направлению к Земле.

На рис. 5.15 приведены результаты регистрации пульсирующих сияний 26.01.2022 с 02:00 до 04:00 UT на обсерватории «Верхнетуломская». Регистрируемое в течение этого интервала времени полярное сияние классифицируется как потоковое (streaming) пульсирующее сияние, характеризующееся появлением серии пятен, которые быстро удаляются от места появления и исчезают. Места появления и направление смещения выглядят хаотично. Кеограмма дает представление о динамике свечения вдоль меридиана, проходящего через зенит камеры всего неба. Интенсивность свечения выражена в псевдоцвете: по мере усиления свечения окраска меняется от синего до темно-коричневого через зеленый, желтый и красный. Яркая линия вблизи южного горизонта с максимумом около 03:45 UT – прохождение Луны, прерывается из-за деревьев вблизи горизонта. Четкие горизонтальные отрезки на кеограмме – прохождение ярких звезд. На севере весь интервал наблюдается полоса полярных сияний, причем южная кромка полосы сияний постепенно спускается к югу. Узкие вертикальные отрезки на кеограмме – следы пульсирующих сияний. Смещение полосы к югу сопровождалось развитием небольшой, до 100 нТ, отрицательной вариации («бухты») в Н-компоненте магнитного поля в обсерваториях «Лопарская» и «Ловозеро», а также появлением шума на частотах ниже 0,7 Гц по данным индукционных магнитометров в «Ловозеро» и «Верхнетуломском».

На средней панели рис. 5.15 показана интенсивность свечения в поле зрения фотометра (канал вблизи зенита) в зависимости от времени. В течение полутора часов в поле зрения фотометра наблюдается быстропеременное пульсирующее свечение с варьирующейся амплитудой и частотой. Резкие увеличения амплитуды сигнала обусловлены усилением пульсирующих сияний, они наблюдаются во время смещения полосы пульсирующих пятен от севера к зениту.

На нижней панели рис. 5.15 приведена скалограмма, полученная

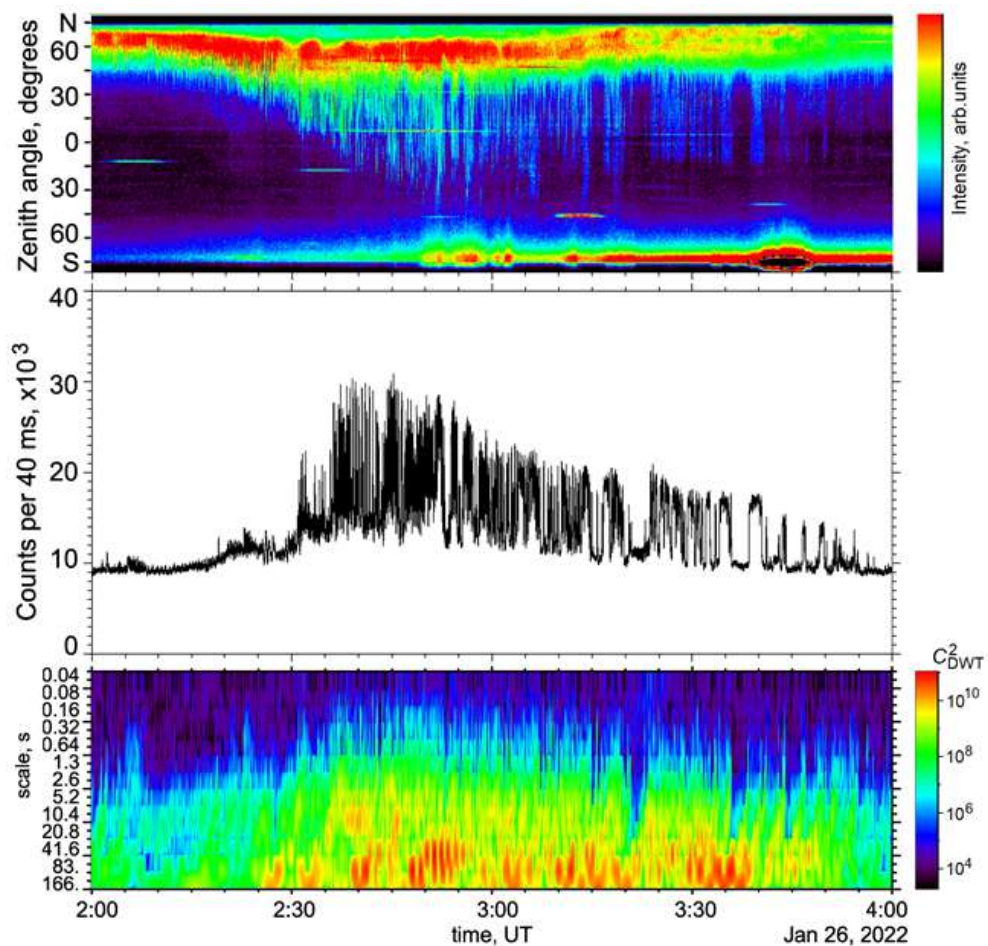


Рис. 5.15: Пульсирующие полярные сияния по наблюдениям в обсерватории «Верхнетуломская», сверху вниз: кеограмма по данным камеры всего неба; интенсивность свечения (число отсчетов за интервал измерения 40 мс) в поле зрения фотометра (канал вблизи зенита) в зависимости от времени; скалограмма (вейвлет-спектр мощности), полученная для временного ряда фотометра преобразованием с использованием вейвлетов Добеши 4-ого порядка.

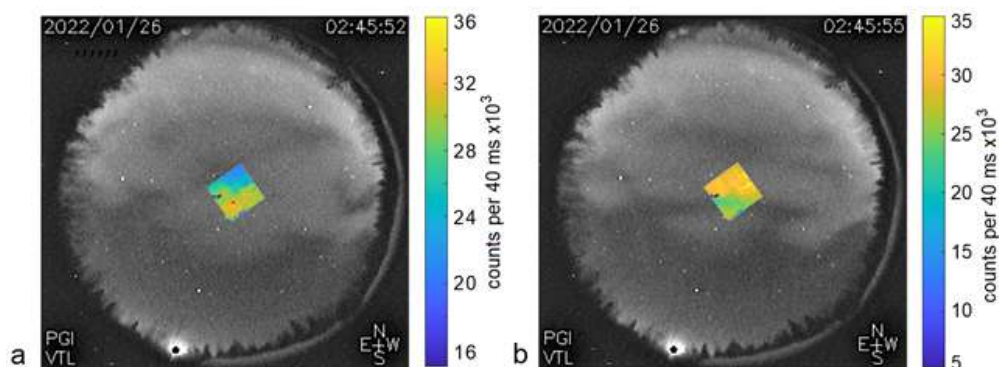


Рис. 5.16: Снимок камеры всего неба совмещенный с одновременным изображением матрицы МАФЭУ фотометра: а) для 02:45:52 UT, выделенный для дальнейшего анализа фотометр помечен красной звездочкой; б) для 02:45:55 UT.

для временного ряда этого фотометра вейвлет-преобразованием с использованием вейвлетов Добеши 4-ого порядка: постоянных доминирующих периодов в пульсациях интенсивности не наблюдается.

Детальнее рассмотрен интервал 02:45–02:48 UT. Из данных камеры всего неба (см. кеограмму на верхней панели рис. 5.15) видно, что в поле зрения в течение всего интервала появляются и перемещаются пятна сияний, без сохранения какой-либо пространственной структуры от пятна к пятну. Примеры кадров камеры всего неба с наложением на них одновременных данных телескопа приведены на рис. 5.16. Видно соответствие наблюдаемых пространственных структур свечения. Для дальнейшего анализа выбран один пиксель из матрицы МАФЭУ, отмеченный на рис. 5.16а красной звездочкой (немного ниже центра изображения).

Верхняя панель рис. 5.17 демонстрирует сравнение осциллограмм фотометра и соответствующей ему суммы пикселей камеры всего неба в интервале 02:45–02:48 UT. Отчетливо видно совпадение медленной вариации излучения и более высокочастотная модуляция сигнала, измеряемая фотометром. На нижней панели приведена скалограмма, показывающая, что характерные периоды основных пульсаций (наибольшей амплитуды) составляют 5–20 с. Более короткопериодные составляющие имеют тенденцию появляться в максимумах основных

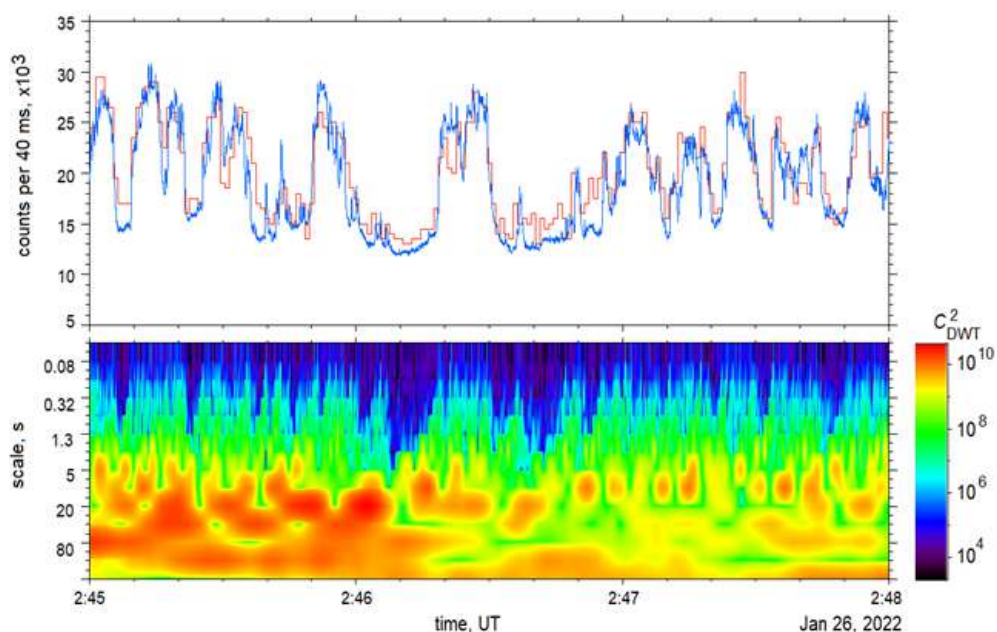


Рис. 5.17: Пульсирующие полярные сияния 28 января 2022 г., интервал 02:45–02:48 UT. Верхняя панель – сравнение осциллограмм фотометра (синяя линия) и соответствующего пикселя камеры всего неба (красная линия). Нижняя панель – вейвлет-спектр мощности (квадрат значений детализирующих коэффициентов), полученный для временного ряда фотометра.

пульсаций (фаза «включено»), а в минимумах (фаза «выключено») они значительно меньше.

Результат анализа этого интервала приведен на рис. 5.18. На верхней панели приведены усредненные спектры мощности компонент для фаз «включено» (сплошная линия) и «выключено» (пунктир). Для фазы «выключено» спектр непрерывен в интервале (0,05–12) Гц, без очевидных максимумов, близок к виду f^{-2} , где $f = 1/T$, f – частота, T – период пульсаций. Для фазы «включено» амплитуда компонент спектра в этом диапазоне выше, форма спектра искажается, хотя спектр остается ниспадающим с частотой, на нем не возникает явных пиков.

На нижней панели приведено отношение компонент спектра фазы «включено» к «выключено», имеющее следующие особенности:

- в полосе 0,14–0,4 Гц наблюдается широкий пик со средним значением в районе 7 и с максимумом около 8 на частоте 0,2 Гц;

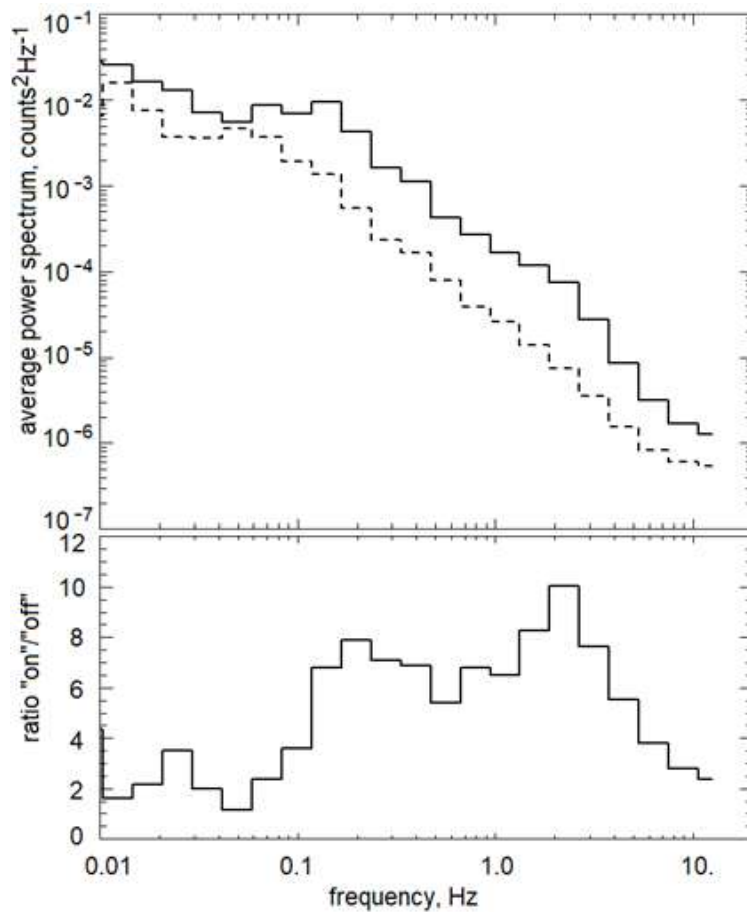


Рис. 5.18: Анализ изменения спектра во время пульсаций. Верхняя панель – усредненные FFT спектры мощности в спектральных диапазонах для фаз «включено» (сплошная линия) и «выключено» (пунктир). Нижняя панель – отношение компонент спектра фазы «включено» к «выключено».

- выше 1 Гц выявлен пик в полосе 1,5–3 Гц с хорошо выраженным максимумом порядка 10 на частоте 2,2 Гц.

Первый пик связан с основной частотой пульсаций (удвоенной за счет процедуры обработки сигнала), в то время как второй - с высокочастотной модуляцией свечения. Таким образом, высокоскоростная регистрация фотометром RAIP-V позволила выявить повышение амплитуды колебаний в диапазоне 1–10 Гц с максимумом на частоте около 2,2 Гц на фазе «включено» основных пульсаций. Результат согласуется с результатами других экспериментов (например, [209]).

Анализ спектра флуктуаций светимости во всем частотном интервале 0,05–12 Гц показал, что на фазе «выключено» спектр близок к виду f^{-2} без очевидных максимумов. Для фазы «включено» форма спектра искажается, хотя спектр остается ниспадающим с частотой, а интенсивность на частотах более 1 Гц на порядок выше, чем на фазе «выключено». Последнее подтверждает сделанный выше вывод о существенной амплитуде внутренней модуляции сигнала именно на фазе «включено» основных пульсаций. Появление высокочастотной модуляции на стадии «включено» отмечалось ранее применительно к другим формам пульсирующих сияний [208, 209, 222, 243]. В данном случае высокочастотная модуляция зафиксирована в полосе потокового пульсирующего сияния.

Отсутствие явных периодов в спектре пульсаций и степенной вид спектра может свидетельствовать о формировании наблюдаемой последовательности пульсаций в режиме перемежаемости «включено-выключено», ранее предложенной для объяснения последовательности хоровых элементов [243, 244]. Часто наблюдаемый при активизации сияний переход от хаотического, псевдопериодического к более регулярному периодическому режиму также укладывается в это объяснение.

5.4.4. Спектрометрические измерения. Вариации излучения пульсирующих полярных сияний в спектральных линиях азота с 337 нм и 391 нм во время геомагнитных суббурь

Оценки энергии высыпавшихся электронов могут быть сделаны косвенно посредством измерений характеристик светимости,

зависящих от высоты, таких как, например, спектр излучения. Однако спектроскопические измерения полярных сияний, особенно ППС, проводятся относительно редко. Эти наблюдения требуют высокого временного разрешения и высокой чувствительности, что делает использование обычных камер неэффективным. Для таких измерений обычно используются фотометры на основе ФЭУ, поскольку они позволяют вести подсчет одиночных фотонов и обеспечивают временное разрешение менее 1 мс.

Наибольший интерес представляют измерения линий второй положительной системы азота (N_2 2P) 337,1 нм и первой отрицательной системы (N_2^+ 1N) – 391,4 нм. Для N_2 2P время жизни возбужденного состояния составляет около 50 нс, что обеспечивает эффективную высоту тушения столкновениями с нейтральными компонентами атмосферы всего около 30 км. Для N_2^+ 1N – время жизни 70 нс, эффективная высота тушения около 48 км [245]. Таким образом, по соотношению интенсивностей этих линий можно оценить высоту излучения (чем больше доля N_2 2P, тем ниже источник излучения в атмосфере), а значит, и энергию электронов, вызывающих это полярное сияние.

Пример спектрометрических измерений ППС представлен и обсуждается в исследовании [246]. ППС наблюдались с ракеты с помощью прибора EF-11 [247], который имел четыре спектральных канала: 130,4 нм, 337,1 нм, 391,4 нм и 557,5 нм. Авроральная эмиссия, наблюдаемая в этом исследовании, объяснялась потоком электронов с характерными энергиями 2–3 кэВ. Было показано, что отношение интенсивности излучения в линиях 391,4 нм к 337,1 нм оставалось постоянным на всех высотах, особенно выше 150 км, с характерным значением отношения равным 6,25.

Теоретических расчетов соотношения линий 391,4 к 337,1 тоже не так много. В моделировании [248, 249] показано, что в верхней части атмосферы (более 100 км) соотношение интенсивностей линий 2PG (337,1 нм) и 1NG (391,4 нм) практически не зависит от высот и составляет около 5. Результаты показаны на рис. 5.19. Эти расчеты проводились для относительно низких энергий электронов: от 0,1 до 16 кэВ.

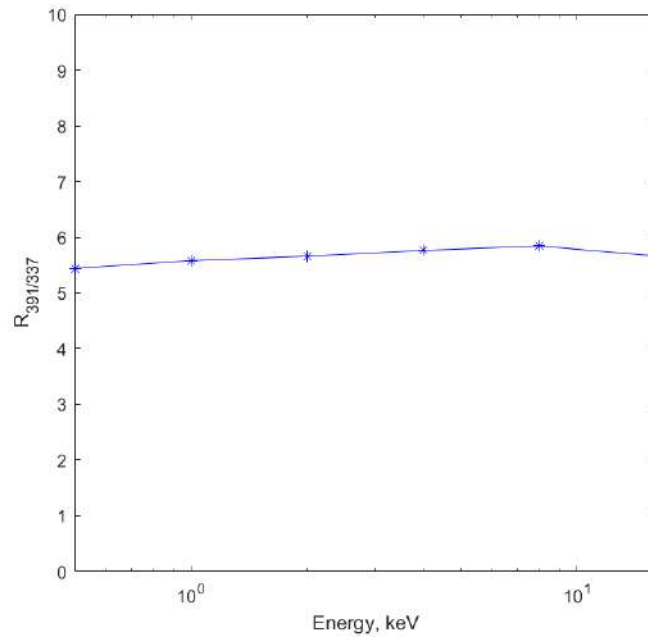


Рис. 5.19: Результаты расчета соотношения интенсивностей линий 2PG (337,1 нм) и 1NG (391,4 нм) по [249].

Для более высоких энергий выполнено моделирование прохождения пучков электронов с энергией 1 МэВ через атмосферу [250]. Были получены высотные профили оптического излучения для различных систем полос азота и кислорода. На левой панели рис. 5.20 сплошными линиями показаны результаты этого моделирования для систем полос N_2 2P и N_2^+ 1N азота.

На основе моделирования [250] была получена зависимость интенсивности излучения в линиях 337 нм и 391 нм, принадлежащих разным системам, от высоты. Для этого были использованы относительные интенсивности свечения линий в разных системах, представленные в таблицах 4.9 и 4.11 монографии [245]. Доля свечения, в линии 391,4 нм в системе 1NG составила 0,65, доля линии 337,1 – 0,28.

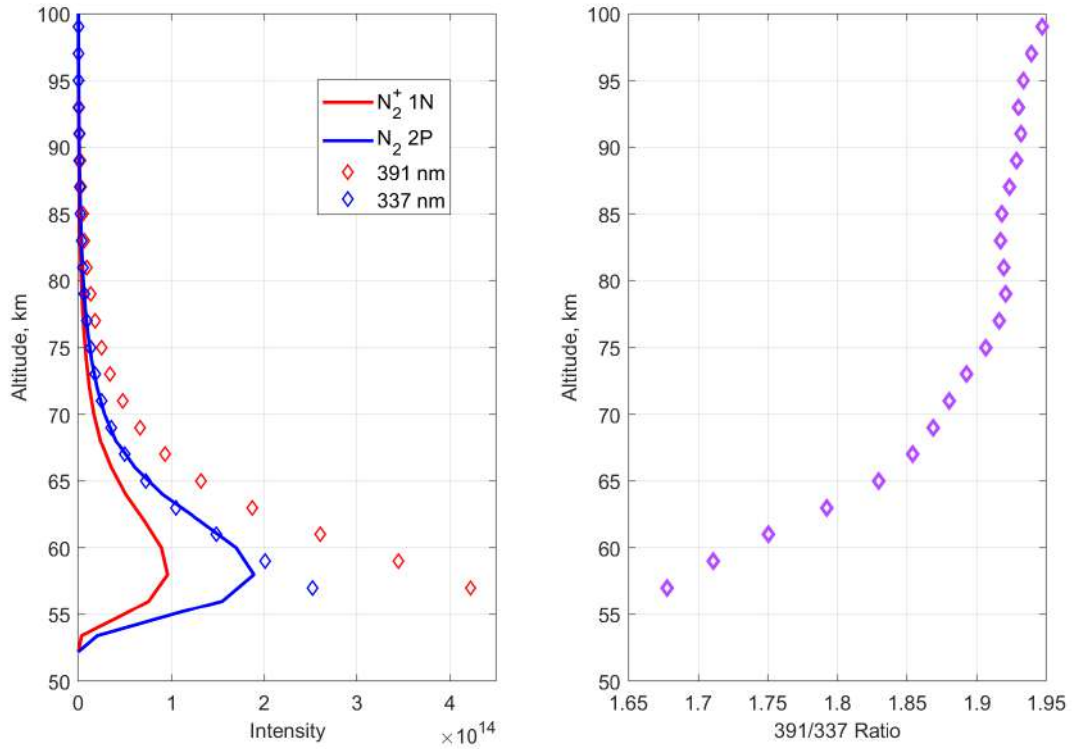


Рис. 5.20: Слева: Высотные профили оптического излучения для систем N_2^+ 1N и N_2 2P от [250] (сплошные линии) и расчетные интенсивности линий 391 нм и 337 нм на входном зрачке (маркеры). Справа: $R_{391/337}$, полученное в результате моделирования высотных профилей оптического излучения.

Для оценки числа фотонов на входном зрачке детектора учитывалось атмосферное Рэлеевское рассеяние (облачностью и аэрозолями в простом случае можно пренебречь), существенное в ближнем ультрафиолетовом диапазоне и меняющееся в зависимости от длины волны и высоты. Доля свечения (I/I_0), попавшая на входной зрачок с высоты h рассчитывается по формуле

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\frac{\rho_0 h_0 (1 - \exp(-\frac{h}{h_0}))}{X_R(\lambda)}\right), \quad (5.1)$$

где ρ_0 – плотность атмосферы у поверхности Земли, h_0 – постоянная изотермической атмосферы, $X_R(\lambda) = 2974 \cdot (\lambda/400)^4$ – длина рэлеевского рассеяния.

Дополнительно проведено интегрирование интенсивности излучения по толщине атмосферы, соответствующей высоте излучения, так как

спектрометр направлен в зенит. Полученные значения представлены на левой панели рисунка 5.20 с помощью ромбовидных маркеров.

На правой части рисунка 5.20 показано, полученное в итоге описанной процедуры, отношение $R_{391/337}$ для излучения, попадающего на входной зрачок прибора. Видно, что оно меняется с высотой и лежит в диапазоне от 1,65 (для высоты около 55 км) до ~ 2 (для 100 км).

Из приведенных выше цифр очевидно, что существующие модели, рассчитывающие излучение для разных диапазонов энергий высыпавшихся электронов, дают разные результаты. Поэтому, был проведен анализ данных спектрометра в составе прибора RAIP-V [251].

Спектрометр был введен в эксплуатацию и настроен в конце февраля 2023 г., поэтому рассмотрены данные за март и апрель. На первом этапе исследования был проведен анализ геомагнитной обстановки с целью определения спокойных и возмущенных периодов. На рис. 5.21 показано поведение геомагнитных индексов AU и AL за март/апрель 2023 г. Периоды работы спектрометра выделены красным цветом. При анализе измеренных кривых блеска было установлено, что все каналы спектрометра насыщаются во время суббурь с максимальным значением AL-индекса, превышающим 500 нТл (например, суббуря 24 марта 2023 г.). Поэтому эти суббури нельзя использовать для изучения интенсивностей эмиссий в спектральных линиях и их соотношения.

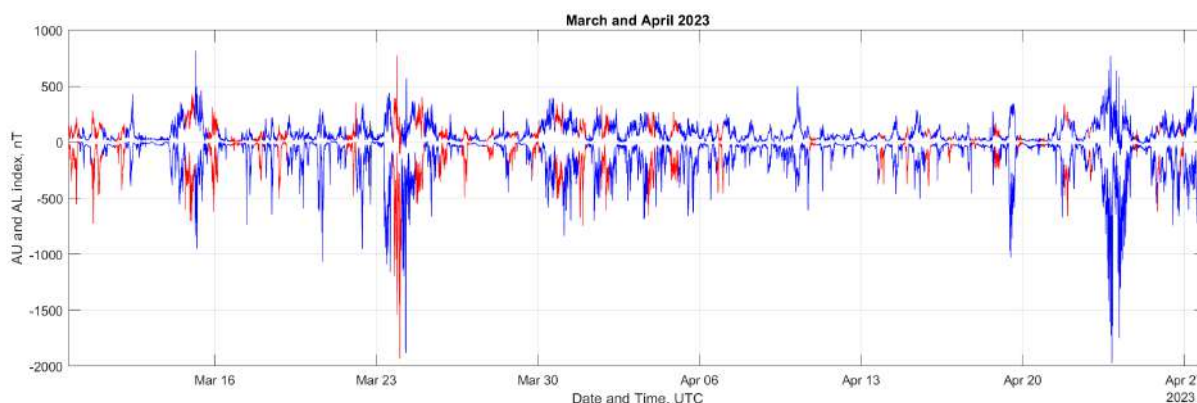


Рис. 5.21: Геомагнитные индексы AL и AU. Интервалы времени, когда спектрометр производил измерения, выделены красным цветом.

Помимо геомагнитных условий, другими важными факторами,

определяющими возможность регистрации ППС, являются: фоновая освещенность (определяется положением Луны, Солнца, близлежащими населенными пунктами), метеорологические условия (наличие облачного покрова, осадков), состояние блистера (входного окна). Примеры типовых снимков камер всего неба для различных условий представлены на рис. 5.22. За указанный период были проанализированы условия наблюдений по данным камер всего неба Полярного геофизического института (ПГИ). В апреле зенитный угол Солнца, определяющий фоновую освещенность, достаточно велик. Это приводит к дополнительному рассеянному излучению, которое изменяет отношения интенсивностей $R_{391/337}$, измеряемых двумя спектральными каналами детектора: 391 нм и 337 нм. Эти дни были исключены из дальнейшего анализа.

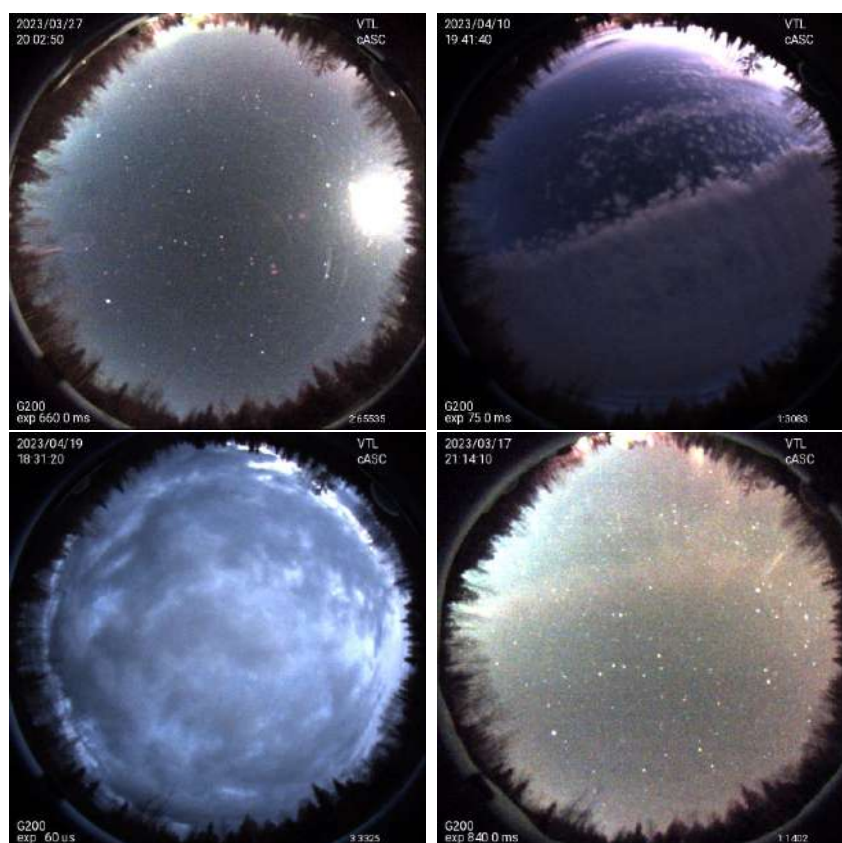


Рис. 5.22: Типичные изображения цветной камеры всего неба в VTL. Вверху слева: ясное небо с Луной в поле зрения. Вверху справа: плотные непрозрачные облака. Внизу слева: солнечный свет, рассеянный в облаках. Внизу справа: слабое полярное сияние в условиях ясного неба.

К сожалению, в большинстве случаев условия наблюдения

(облачность, осадки, положение Солнца и Луны, уровень геомагнитной активности) не позволяли наблюдать полярное сияние. Поэтому детально были проанализированы спектральные измерения в течение двух ночей наблюдений: 11/12 марта 2023 г. и 17/18 марта 2023 г.

Для расчета отношения $R_{391/337}$ используется следующая формула:

$$R_{391/337} = \frac{N_{391}}{N_{337}} \cdot \frac{p_{337} \eta_{337} \tau_{337}}{p_{391} \eta_{391} \tau_{391}} \cdot \varepsilon, \quad (5.2)$$

где N_{391} и N_{337} — коды АЦП двух каналов с квантовой эффективностью фотокатода $p_{337} = 0,19$, $p_{391} = 0,18$, прозрачность фильтра $\eta_{337} = 0,34$, $\eta_{391} = 0,49$ и прозрачность входного окна (блистера) $\tau_{337} = 0,83$, $\tau_{391} = 0,9$. Относительная чувствительность двух каналов ε , учитывает соотношение коэффициентов усиления диодной системы двух ФЭУ и была получена при калибровках детектора.

Относительные калибровки спектрометра производились перед его установкой в VTL. Все каналы спектрометра освещались равномерно при длине волны 405 нм. Однородный пучок для калибровок создается за счет широкого выходного окна интегрирующей оптической сферы. Входной поток и его неравномерность контролировались NIST-фотодиодами и двухканальным измерителем мощности Ophir LaserStar³. Аналогичная методика измерений используется для относительных и абсолютных калибровок многоканальных фотоприемных поверхностей проектов коллаборации JEM-EUSO (например, EUSO-SPB-2, K-EUSO) [252].

На рис. 5.23 показан результат калибровочных измерений для максимального высокого напряжения на ФЭУ для двух основных каналов: 337 и 391 нм. Приведена зависимость измеряемого кода АЦП от интенсивности входного сигнала (числа фотонов в секунду на площадь фотокатода ФЭУ). Видно, что ФЭУ примерно в 2 раза отличаются по чувствительности, работают в линейном режиме при потоке до ~ 1000 фотонов/мс, что примерно соответствует току на последних диодах, равному 3 мА. Справа на рисунке показан результат

³<https://www.ophiropt.com/laser-measurement/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/Laserstar-двухканальный>

расчета относительной чувствительности двух каналов, необходимый для дальнейших расчетов $R_{391/337}$. Видна слабая зависимость от входного потока.

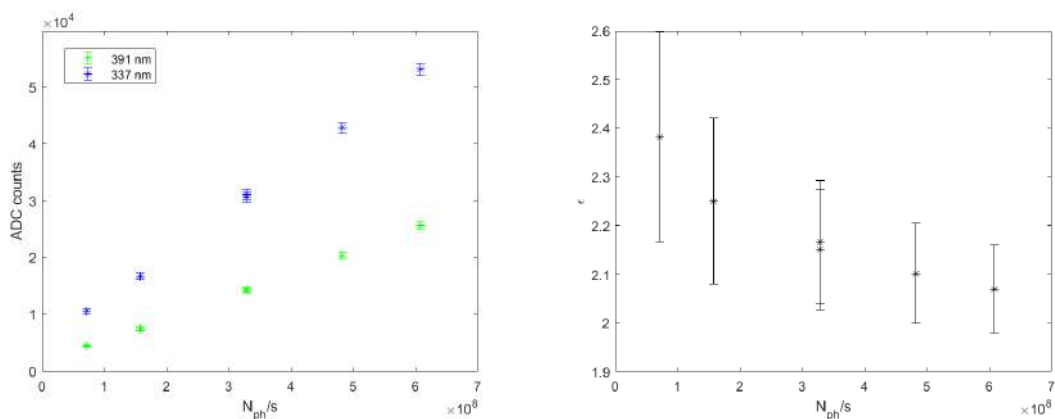


Рис. 5.23: Слева – зависимость отклика детектора (коды АЦП) от интенсивности излучения на входном окне для двух каналов. Справа: относительная чувствительность каналов и ее зависимость от интенсивности входного сигнала.

На рис. 5.24 показаны результаты анализа данных, зарегистрированных спектрометром 11/12.03.2023. Измерения были начаты при ясном небе и очень спокойных геомагнитных условиях. Геомагнитные индексы AU и AL близки к нулю. Для этих условий отношение $R_{391/337}$ оказалось практически равно 1.

В 19:00 UTC начинается суббуря с AL-индексом -200 нТл, что приводит к заметному увеличению интенсивности аврорального свечения в обоих каналах, а также увеличению отношения $R_{391/337}$. Вторая суббуря, характеризующаяся максимальным понижением AL-индекса до -400 нТл, происходит в 23:00 UTC. Эта суббуря сопровождается десятикратным увеличением интенсивности излучения, появлением острых пиков на кривой свечения и последующими пульсациями продолжительностью более трех часов. В этот период исследуемое отношение $R_{391/337}$ претерпевает значительные колебания, достигая абсолютных значений порядка 3.

Следует отметить, что в определенные периоды измерений в поле зрения спектрометра наблюдалась незначительная облачность. В эти моменты измеренная интенсивность полярного сияния уменьшается.

Однако, как будет показано далее, изменение базового уровня можно учитывать при корректировке расчета отношения $R_{391/337}$.

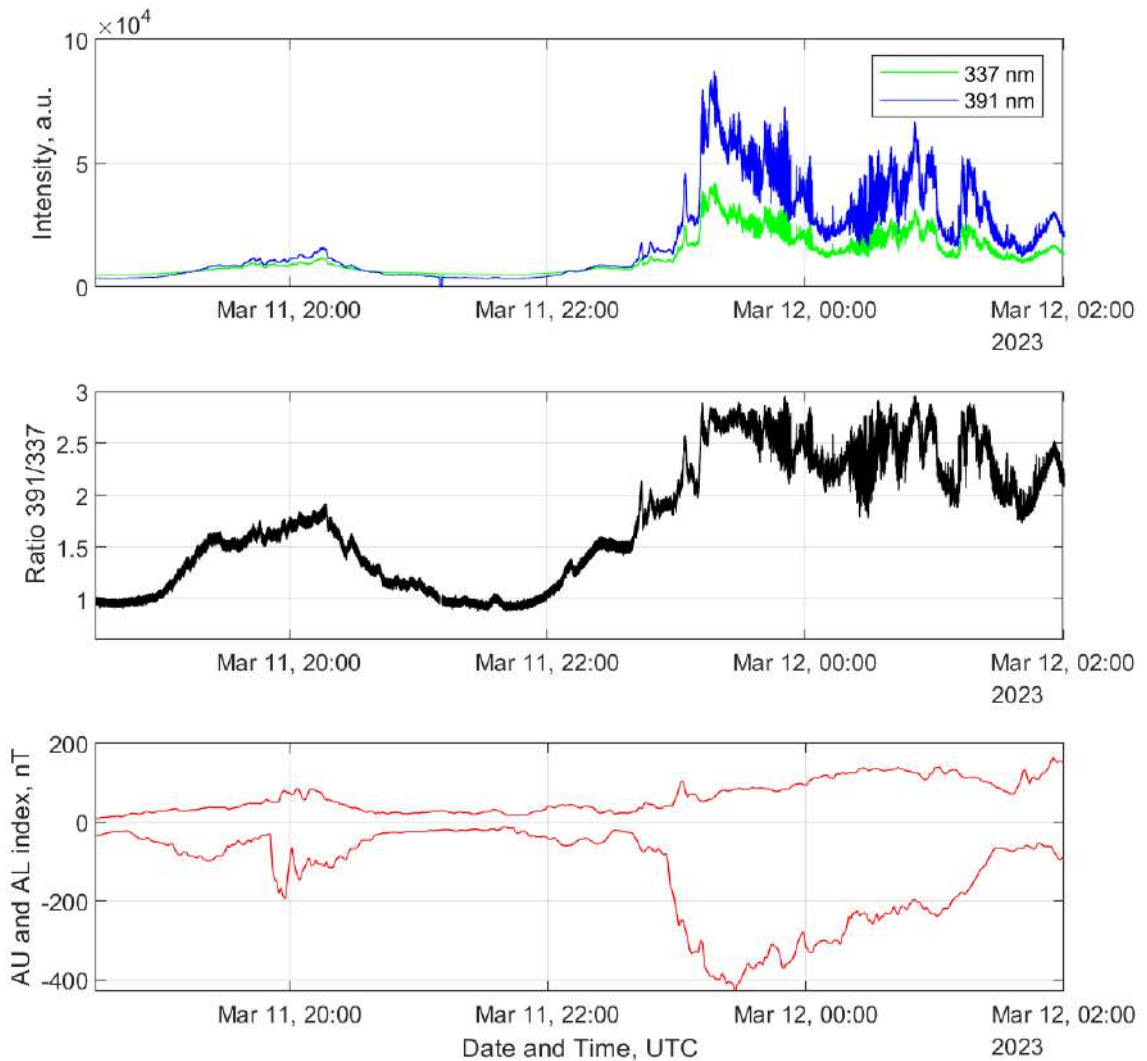


Рис. 5.24: Обзор события 11/12.03.2023. Верхняя панель: кривые свечения каналов 337 нм (синяя линия) и 391 нм (зеленая линия). Средняя панель: зависимость $R_{391/337}$ от времени. Нижняя панель: индексы геомагнитной активности AU и AL.

Результаты измерений для ночи 17/18 марта 2023 г. в целом напоминают предыдущий описанный случай. На рис. 5.25 хорошо видно, что для спокойных геомагнитных условий после захода солнца $R_{391/337}$ близко к 1. С начала слабой суббури с максимальным $AL \sim -100$ нТл в $\sim 21:20$ UTC интенсивность и $R_{391/337}$ начинают расти. $R_{391/337}$ достигает значения 1,5 к 22 UTC. В 22:15 UTC началась серия суббурь,

которая сопровождалась яркой эмиссией в самом начале и последующими непрерывными пульсациями. Интенсивность ППС достигала максимума сразу после полуночи, как и $R_{391/337}$.

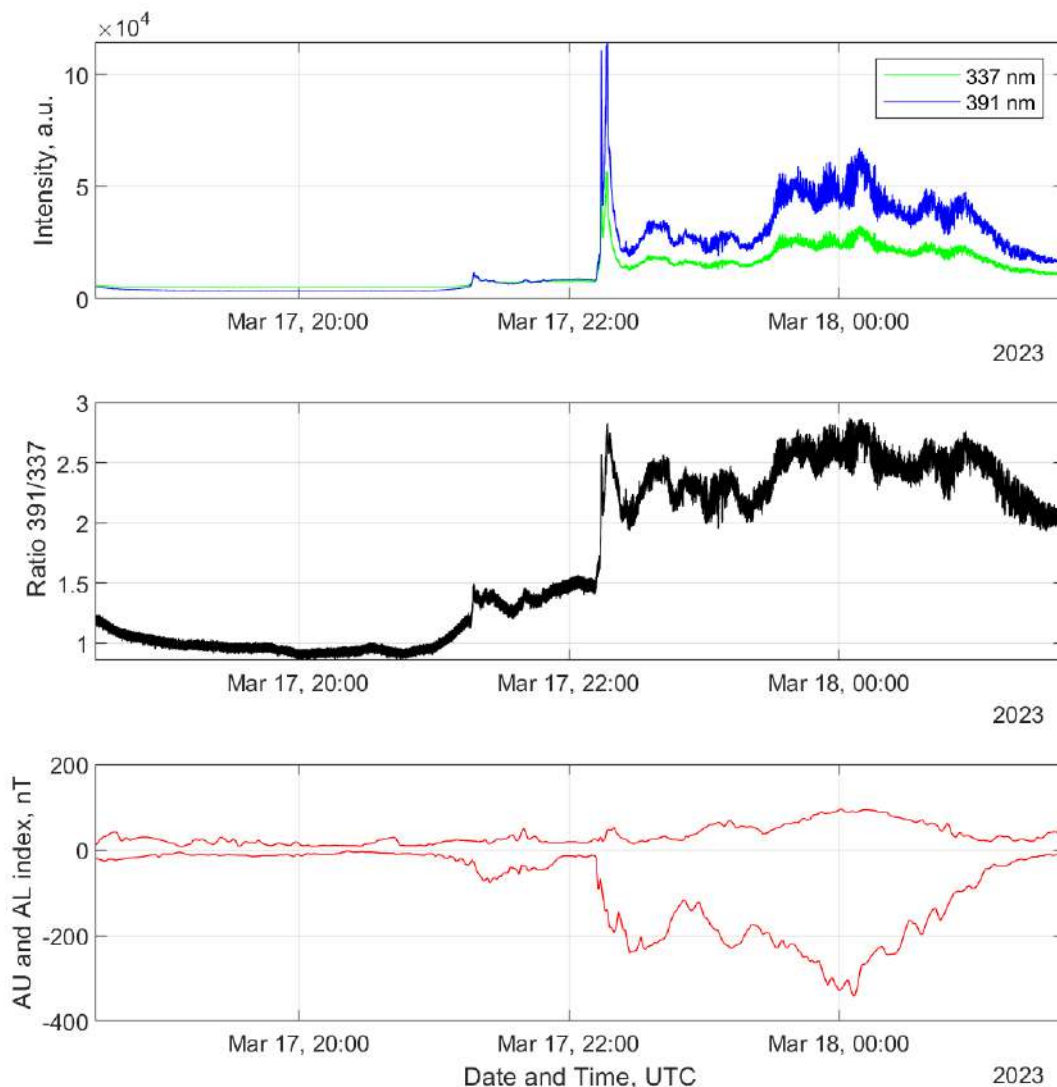


Рис. 5.25: Обзор события 17/18.03.2023. Верхняя панель: кривые свечения каналов 337 нм (синяя линия) и 391 нм (зеленая линия). Средняя панель: зависимость $R_{391/337}$ от времени. Нижняя панель: индексы геомагнитной активности AU и AL.

Стоит отметить, что в ряде предыдущих исследований и обзоров было показано, что ППС в основном возникают на фазе восстановления суббури [210, 253]. В нашем случае также наблюдается типичная ситуация: оба случая ППС зарегистрированы на фазе восстановления суббури, а

небольшие суббури с абсолютной величиной AL-индекса менее 200 нТл не сопровождаются ППС.

На рис 5.24 и 5.25 показано, что во время пульсаций отношение $R_{391/337}$ превышает значение, измеренное в спокойный геомагнитный период и при ясном небе, в 2–3 раза, достигая максимальных значений около 3. С одной стороны, это позволяет определить наличие пульсирующих полярных сияний, а с другой – противоречит существующим модельным данным об этом соотношении. Но в отношении $R_{391/337}$, определенное простым делением значений интенсивности, измеряемых двумя каналами, также входит и суммарное изменение фона, влияющее на значения интенсивностей. Например, во время полнолуния или рассеянного солнечного света $R_{391/337}$ увеличивается. Появление облаков также вызывает плавные, незначительные изменения соотношения. Кроме того, ППС могут возникать на фоне постоянных выпадений низкоэнергетических электронов, вызывающих квазипостоянное авроральное свечение и сопровождающихся вариациями AL-индекса.

Поэтому, необходимо учесть присутствие изменяющегося базового уровня при расчете отношения (определить и вычесть значения фонового излучения), чтобы получить отношение двух линий, вызванных электронами, ответственными именно за пульсации. Для этого была разработана и реализована следующая процедура:

1. Все измерения для обоих каналов во время ППС были разделены на фазы «включено» и «выключено». Фазы «выключено» составляют набор измерений с меньшей интенсивностью и рассматриваются как фон для фаз «включено». Разделение производится путем вычитания из кривой свечения скользящего среднего с временным окном, равным 30 с. После вычитания скользящего среднего моменты времени с интенсивностью больше нуля считаются как фаза «включено», а меньше нуля – «выключено».
2. Интенсивности во время фазы «выключено» были интерполированы для периодов с импульсами для получения значений фонового излучения во время фазы «включено». На рис. 5.26 показан пример

измеренного сигнала ППС и интерполяции фона для короткого, но типичного случая.

3. Значения интенсивности фона, полученные на предыдущем шаге, вычитались из измеренных значений интенсивности.
4. Новые значения соотношения ($R_{391/337}^*$) рассчитываются как отношение двух сигналов во время фазы «включено» с вычтенным фоном. Пример полученного $R_{391/337}^*$ показан на нижней панели рис. 5.26. Хорошо видно, что среднее отношение составляет около 3. На краях фаз «включено» встречаются пики – это некий артефакт описанной процедуры, и данные точки исключаются из дальнейшего анализа. Интересно отметить довольно большие вариации отношения, достигающие значений около ~ 8 .

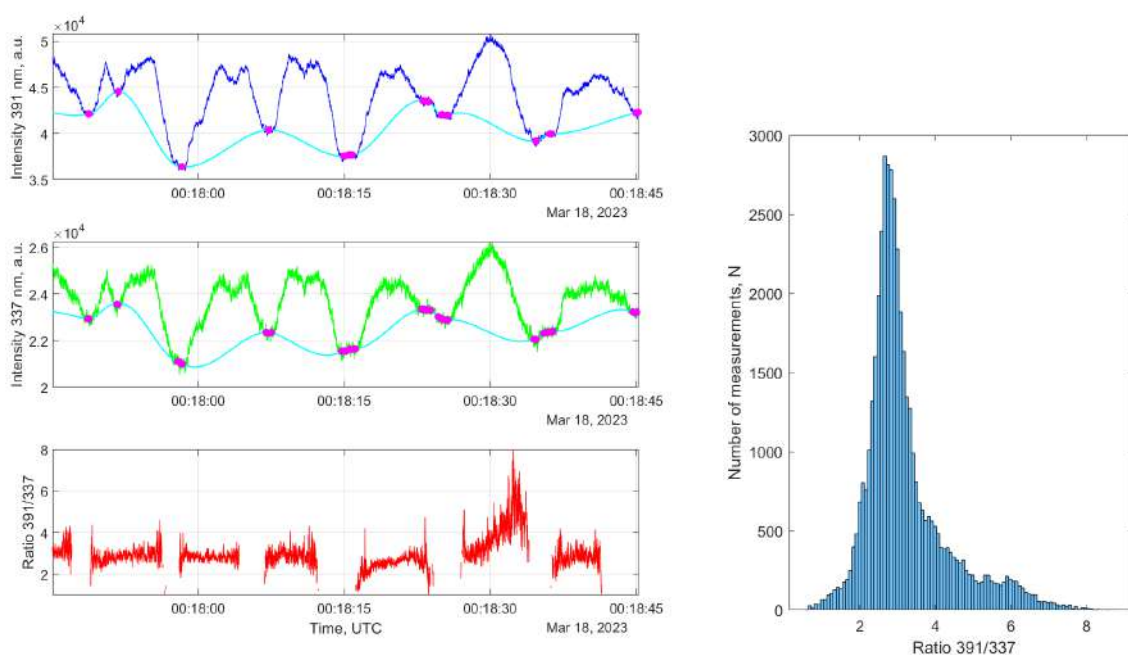


Рис. 5.26: Верхняя панель: интенсивность в канале 391 нм и интерполяция фона с использованием минимальных значений (голубая линия). Центральная панель: интенсивность в канале 337 нм с интерполяцией фона. Нижняя панель: $R_{391/337}^*$ рассчитанный как отношение двух сигналов во время фазы «включено» с вычтенным фоном. Справа: распределение $R_{391/337}^*$, для временного интервала, показанного на рисунках слева.

Поскольку вариации полученного отношения достаточно велики, то рассчитывались также медианные значения в течение каждых 2

минут измерений, чтобы исследовать его глобальную динамику во время событий ППС. Пример распределения отношения $R_{391/337}^*$ для 2 минут, представленный на рис. 5.26, показан на правой панели рис. 5.26.

На рис. 5.27 и 5.28 представлена полная информация по эмиссиям в линиях 391 и 337 нм во время фазы восстановления суббури для событий 11/12.03.2023 и 17/18.03.2023. На верхних панелях показана зависимость измеренных интенсивностей от времени. Нижние панели содержат исходные значения $R_{391/337}$ (черная линия), не учитывающие изменения фона, и новые значения (красные линии с точками), полученные с помощью описанной выше процедуры. Хорошо видно, что скорректированные значения $R_{391/337}^*$ всегда больше исходных.

Ожидалось, что возможно плавное изменение отношения интенсивностей ввиду меняющегося спектра высыпающихся электронов и увеличения доли высокоэнергичной компоненты. Так, в работе [253] обсуждается, что высота максимальной интенсивности излучения во время ППС уменьшается со временем. Показано, что события, начавшиеся в первые 2 часа фазы восстановления бури, имеют более широкое распределение свечения по высоте и не имеют тенденции к уменьшению, в то время как высота излучения для событий, начавшихся позже, уменьшается с 110 до 100 км. Такое поведение можно объяснить увеличением энергии высыпающихся электронов. В связи с этим имеет смысл ожидать увеличения доли излучения в линии 337 нм, так как она имеет меньшую высоту тушения и соответствует более высоким энергиям высыпающихся частиц. Таким образом, отношение $R_{391/337}^*$ должно уменьшаться со временем к концу суббури.

В исследуемых событиях значимого и монотонного изменения отношения $R_{391/337}^*$ во время суббури не происходит. Оно имеет большие вариации, которые меньше в середине временных интервалов. Важно, что амплитуда вариаций скорректированного отношения остается прежней ($\sim 25\%$). Это показывает, что предложенная процедура не добавляет искусственного разброса данных.

Интенсивность эмиссии уменьшается в конце исследуемых интервалов и соответствует поведению AL-индекса. Коэффициенты

корреляции между интенсивностью и AL-индексом для 11/12 марта 2023 г. составляют 0,87 и 0,88 для каналов 391 нм и 337 нм соответственно. Для 17/18 марта 2023 г. оба коэффициента корреляции равны 0,85. Это означает, что интенсивность потока заряженных частиц в конце уменьшается, а энергетический спектр не меняется настолько, чтобы его можно было измерить прибором типа RAIP-V. Это можно понять, если еще раз взглянуть на рис. 5.20. Разница в отношении интенсивностей составляет порядка 10 % при изменении высоты от 100 км до 65 км. Последняя соответствует электронам очень высоких энергий, поток которых на порядки меньше потока низкоэнергетических электронов, вызывающих основное свечение на высотах более 100 км.

Интересно отметить, что полученные экспериментальные значения $R_{391/337}^*$ лежат между результатами двух теоретических моделей для разных диапазонов энергий: 0,1–16 кэВ [248, 249] и 1 МэВ [250], но косвенно согласуются с результатами экспериментальных исследований, в которых наблюдалась дополнительная ионизация на малых высотах за счет высыпавшихся электронов с энергией более 50 кэВ [219, 220]. Но также возможны и должны учитываться в построении теоретических моделей другие дополнительные факторы, влияющие на соотношение линий.

Таким образом, были проанализированы соотношения интенсивности излучения между двумя линиями излучения молекулярного азота 391 нм и 337 нм. Установлено, что интенсивность излучения на обеих длинах волн коррелирует с геомагнитным AL-индексом, отражающим суммарный поток заряженных частиц в атмосферу. Для спокойных геомагнитных условий интенсивности в обоих каналах близки, а их отношение близко к 1.

Предложена и реализована специальная процедура для анализа отношения $R_{391/337}^*$ во время ППС, поскольку необходимо вычитание фонового излучения атмосферы. Показано, что $R_{391/337}^*$ колеблется в районе 2,5 для события 11/12.03.2023 и около 3 для события 17/18.03.2023. Эти значения указывают на то, что роль электронов высоких энергий может быть недооценена в текущих теоретических моделях [248, 250].

Отсутствует явная зависимость отношения $R_{391/337}^*$ от времени, которую можно ожидать при существенном изменении спектра

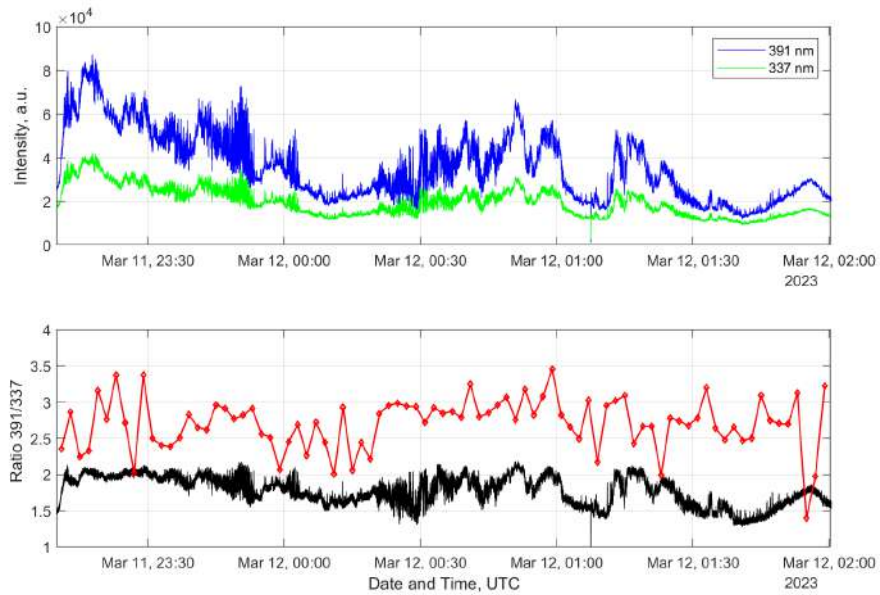


Рис. 5.27: Сверху: Интенсивности каналов 391 нм (синяя линия) и 337 нм (зеленая линия) во время события 11/12.03.2023 Снизу: $R_{391/337}$, рассчитанное как простое отношение интенсивностей (черная линия) и $R^*_{391/337}$, полученное по описанной выше процедуре (красная линия).

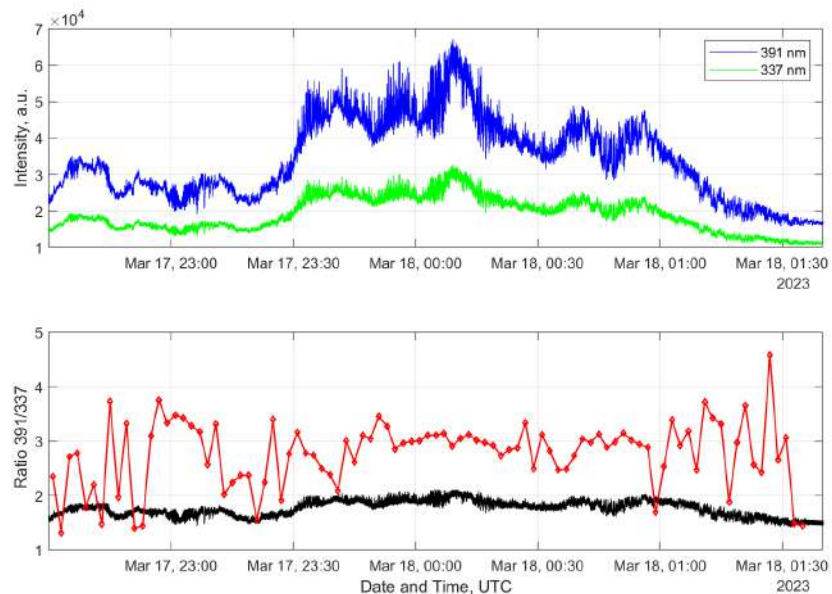


Рис. 5.28: Сверху: Интенсивности каналов 391 нм (синяя линия) и 337 нм (зеленая линия) во время события 17/18.03.2023 Снизу: $R_{391/337}$, рассчитанное как простое отношение интенсивностей (черная линия) и $R^*_{391/337}$, полученное по описанной выше процедуре (красная линия).

высыпающихся электронов. По-видимому, доля высокоэнергетичных электронов в пульсирующих полярных сияниях невелика, и ее вклад в излучение не виден при наблюдении пульсирующих патчей в зенитном направлении.

В дальнейшем, в дополнение к описанным спектрометрическим измерениям, планируется прямое наблюдение вертикальной структуры свечения, оценка глубины проникновения и энергии высыпающихся при ППС электронов, после установки второго телескопа, наблюдающего полярные сияния под углом к горизонту в направлении «Верхнетуломской» из обсерватории «Ловозеро». Это позволит определить соответствие между энергетическим спектром частиц и соотношением излучения в линиях 337 нм и 391 нм.

5.5. Выводы по главе 5

По направлению исследования структуры УФ-свечения в авроральной зоне спутниковыми и наземными экспериментами получены следующие результаты:

1. Разработана система матричных фотометров (PAIPS) для исследования тонкой пространственно-временной структуры полярных сияний.
2. Наблюдается корреляция слабых УФ-пульсаций с повышенными потоками высокоэнергетичных электронов (более 100 кэВ), образующихся в результате интенсивной, продолжительной и непрерывной геомагнитной активности в авроральной зоне.
3. Интенсивность излучения двух линий молекулярного азота: 391 нм ($N_2\ 2P$) и 337 нм ($N_2^+\ 1N$) во время пульсирующих полярных сияний коррелирует с авроральной геомагнитной активностью, отражающей интегральный поток заряженных частиц в атмосферу.
4. Отношение интенсивности свечения этих линий ($R_{391/337}$) примерно вдвое ниже модельных расчетов для высыпающихся электронов в диапазоне энергий от 0,1 до 16 кэВ. Это указывает на

то, что роль электронов более высоких энергий в процессе образования пульсирующих полярных сияний недооценена в текущих теоретических моделях.

5. Методика дальнейшего использования наземных и орбитальных флуоресцентных детекторов космических лучей высоких энергий предложена для проведения исследований полярных сияний.

Заключение

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод исследования пространственно-временной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) на основе мониторинга на космических аппаратах с использованием широкоапертурных приборов с высоким временным разрешением ~ 1 мкс.
2. Разработана многофункциональная научная аппаратура, сочетающая в себе широкое поле зрения, высокое временное разрешение, высокую чувствительность и глобальный охват наблюдениями всего Земного шара, которая позволяет эффективно исследовать геофизические, космофизические и астрофизические явления по флуоресцентному свечению атмосферы.
3. Предложена и реализована методика полетной калибровки матрицы фотоэлектронных умножителей, основанная на вычислении статистических характеристик цифровых осциллограмм событий со стационарным уровнем сигнала, которая позволяет проводить контроль чувствительности и калибровку каналов фотоприемника в отсутствие калибровочного сигнала непосредственно в ходе эксперимента.
4. Наблюдается широтная структуризация УФ-свечения атмосферы, в которую основной вклад дают свечение аврорального овала и масштабные облачные структуры. УФ-фон над поверхностью океана в 1,5 раза меньше, чем над сушей. В отдельных случаях наблюдается

корреляция интенсивности УФ-излучения и потоков заряженных частиц.

5. Экспозиция детектора ТУС составила $1500 \text{ км}^2 \text{ ср год}$. Повышенная частота триггера наблюдается в областях антропогенной деятельности, грозовой активности и аврорального овала. Проведен анализ работы триггерной системы. Показана необходимость введения антитриггера на мгновенные треки, возникающие при прохождении через его элементы энергичных заряженных частиц (протонов с энергией более 100 МэВ).
6. Зарегистрированы события – кандидаты в ШАЛ. Энергия превышает разумные значения для частиц КЛ ПВЭ, однако это позволило разработать алгоритмы реконструкции и показать принципиальную работоспособность орбитальной методики регистрации ШАЛ. При интерпретации ШАЛ-подобного события как результата попадания в атмосферу частицы КЛ ПВЭ показано, что глубина максимум ШАЛ существенно ниже ожидаемых значений. Предложена возможная астрофизическая природа: потенциальный источник ШАЛ – релятивистская пылинка. В этом случае глубину максимума порядка 500 г/см^2 можно объяснить в рамках модели суперпозиции.
7. Обнаружен класс транзиентных атмосферных явлений в ближнем УФ-диапазоне, обладающих следующими характеристиками: распределение по энергии, выделяемой в ближнем УФ-диапазоне (10^{20} до 10^{26} фотон/событие), географическое распределение событий с большой энергией соответствует грозовым областям, а события регистрируются длительными сериями вдоль траектории космического аппарата. События с меньшей энергией имеют относительно равномерное географическое распределение и не связаны с молниевой активностью.
8. Выделен новый класс УФ-транзиентных явлений внегрозовой природы, характеризуемых следующими параметрами: длительность вспышки порядка 30 мс, отсутствует излучение в красном диапазоне спектра (более 600 нм), энергия излучения не более 3 кДж. Эти

события не связаны с грозовой активностью как в месте регистрации, так и в сопряженной точке магнитного поля Земли.

9. Разработаны методики оценки типа и высоты разряда на основе спектральных измерений для детекторов «ДУФ» и «АУРА».
10. Показано, что транзиентные световые явления типа ELVES образуются при максимальном токе обратного удара родительской молнии менее 30 кА. Исследование событий типа ELVES с борта ИСЗ может быть эффективным средством зондирования внутриоблачных процессов.
11. Наблюдается корреляция слабых УФ-пульсаций с повышенными потоками высокоэнергичных электронов (более 100 кэВ), образующихся в результате интенсивной, продолжительной и непрерывной геомагнитной активности в авроральной зоне.
12. Разработана система матричных фотометров (РАИПС) для исследования тонкой пространственно-временной структуры полярных сияний. Интенсивность излучения двух линий молекулярного азота: 391 нм (N_2 2P) и 337 нм (N_2^+ 1N) во время пульсирующих полярных сияний коррелирует с авроральной геомагнитной активностью, отражающей интегральный поток заряженных частиц в атмосферу. Отношение интенсивности свечения этих линий ($R_{391/337}$) ниже модельных расчетов для высыпающих электронов в диапазоне энергий от 0,1 до 16 кэВ. Это указывает на то, что роль электронов более высоких энергий в процессе образования пульсирующих полярных сияний недооценена в текущих теоретических моделях.

В заключении стоит отметить, что исследование УФ-излучения атмосферы Земли является важным шагом в реализации программы исследований космических лучей предельно-высоких энергий. И эта астрофизическая задача инициировала развитие в НИИЯФ МГУ новых направлений, которым в большой степени посвящена данная работа: исследования глобальной структуры свечения атмосферы Земли в ближнем УФ-диапазоне, энергичных транзиентных явлений в верхних

слоях атмосферы и пульсирующих полярных сияний. В работе подробно исследована структура квазистационарного и транзиентного фона по данным различных космических и наземных экспериментов, проведена первая в мире апробация методики регистрации ШАЛ с борта искусственного спутника Земли в проекте ТУС. При этом, созданная научная аппаратура оказалась весьма эффективной для исследования различных классов явлений разной природы.

Остается ряд нерешенных вопросов, которые необходимо и возможно прояснить в дальнейшем. Не ясен механизм возникновения внегрозовых вспышек, т.к. ни одна из предложенных теоретических гипотез не нашла достаточного экспериментального подтверждения. Необходимо исследовать широтную структуру свечения в приэкваториальной области и ее возможную связь с высыпаниями электронов. Важно понять взаимосвязь оптических и гамма-излучений в грозовых процессах. Эти задачи планируется решать в рамках проекта «ВАТТ» – высокочувствительный атмосферный телескоп-трансформер, предложенного для реализации на Российской орбитальной станции.

В дальнейшем планируется довести до бортовой реализации проект «КЛПВЭ», который позволит на хорошем статистическом уровне проводить регистрацию ШАЛ КЛ ПВЭ с равномерной экспозицией по небесной сфере. В 2023–2025 гг. будут проведены полноценные стереометрические измерения пульсирующих полярных сияний в проекте RAIPS. В 2023 году установлены оба телескопа на Кольском полуострове, происходит отладка совместных наблюдений и алгоритмов реконструкции пространственной структуры излучений с целью определения минимальной высоты проникновения заряженных частиц в атмосферу Земли.

Благодарности

Автор выражает благодарность и признательность всем сотрудникам лаборатории космических лучей предельно высоких энергий отдела космических наук НИИЯФ МГУ за долгое время совместной плодотворной работы, обсуждение научных результатов. Появление многих экспериментальных данных стало возможным благодаря усердной и дружной работе больших коллективов проектов ТУС, «Ломоносов», «Вернов», а также коллаборации JEM-EUSO. Большое спасибо моим университетским учителям – Борису Аркадьевичу Хренову, Гали Карымовичу Гарипову и Михаилу Игоревичу Панасюку. Огромная признательность Сергею Игоревичу Свертилову.

Отдельная благодарность любимой жене, Николаевой Вере, за неоценимую помощь, непрерывную поддержку при написании диссертации, обсуждение научных результатов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Wilson Charles Thomson R. The electric field of a thundercloud and some of its effects // Proceedings of the Physical Society of London. 1924. Vol. 37, no. 1. P. 32D.
2. Franz RC, Nemzek RJ, Winckler JR. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. 1990. Vol. 249, no. 4964. P. 48.
3. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere / H. T. Su, R. R. Hsu, A. B. Chen et al. // Nature. 2003. Vol. 423. P. 974–976.
4. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere / H. Fukunishi, Y. Takahashi, M. Kubota et al. // Geophysical Research Letters. 1996. Vol. 23, no. 16. P. 2157–2160. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/96GL01979>.
5. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin / G. J. Fishman, P. N. Bhat, R. Mallozzi et al. // Science. 1994. Vol. 264, no. 5163. P. 1313–1316.
6. Positron clouds within thunderstorms / Joseph R. Dwyer, David M. Smith, Bryna J. Hazelton et al. // Journal of Plasma Physics. 2015. Vol. 81, no. 4. P. 475810405. 1505.03782.
7. First results of investigating the space environment onboard the Universitetskii-Tatyana satellite / V. A. Sadovnichy, M. I. Panasyuk, S. Yu. Bobrovnikov et al. // Cosmic Research. 2007. Vol. 45, no. 4. P. 273–286.

8. Pasko V. P., Yair Y., Kuo C.-L. Lightning Related Transient Luminous Events at High Altitude in the Earth's Atmosphere: Phenomenology, Mechanisms and Effects // *Space Science Reviews*. 2012. Vol. 168. P. 475–516.
9. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events / A. B. Chen, C.-L. Kuo, Y.-J. Lee et al. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2008. Vol. 113. P. A08306.
10. Gordillo-Vázquez Francisco J, Pérez-Invernón Francisco J. A review of the impact of transient luminous events on the atmospheric chemistry: Past, present, and future // *Atmospheric Research*. 2021. Vol. 252. P. 105432.
11. Transient Atmospheric Events Measured by Detectors on the Vernov Satellite / P. A. Klimov, G. K. Garipov, B. A. Khrenov et al. // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. Vol. 53, no. 9. P. 924–933.
12. Vernov Satellite Data of Transient Atmospheric Events / P. Klimov, G. Garipov, B. Khrenov et al. // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 2017. Vol. 56. P. 2189–2201.
13. Marshall R. A. An improved model of the lightning electromagnetic field interaction with the D-region ionosphere // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2012. Vol. 117, no. A3. P. A03316.
14. Remote sensing of the atmosphere by the ultraviolet detector TUS onboard the Lomonosov satellite / Pavel Klimov, Boris Khrenov, Margarita Kaznacheeva et al. // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, no. 20. P. 2449.
15. Studies of relativistic electron injection events in 1997 and 1998 / J. B. Blake, R. S. Selesnick, D. N. Baker, S. Kanekal // *Journal of Geophysical Research*. 2001. Vol. 106, no. A9. P. 19157–19168.
16. Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission / Y. Yair, C. Price, B. Ziv et al. // *Geophys.Res.Lett.* 2005. Vol. 32. P. L02801.
17. Collaboration Pierre Auger et al. The Pierre Auger cosmic ray observatory // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*

- Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2015. Vol. 798. P. 172–213.
18. Collaboration Telescope Array et al. Current status and prospects of surface detector of the TAx4 experiment // *Proceedings of Science*. 2022. Vol. 395. P. 203.
 19. Deligny O. The energy spectrum of ultra-high energy cosmic rays measured at the Pierre Auger Observatory and at the Telescope Array // 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019). Vol. 36 of International Cosmic Ray Conference. 2019. P. 234.
 20. Benson Robert, Linsley John. Satellite observation of cosmic ray air showers // In: International Cosmic Ray Conference, 17th, Paris, France, July 13-25, 1981, Conference Papers. Volume 8.(A82-22832 09-35) Gif-sur-Yvette, Essonne, France, Commissariat a l'Energie Atomique, 1981, p. 145-148. Vol. 8. 1981. P. 145–148.
 21. The TUS Detector of Extreme Energy Cosmic Rays on Board the Lomonosov Satellite / P. A. Klimov, M. I. Panasyuk, B. A. Khrenov et al. // *Space Science Reviews*. 2017. Vol. 212. P. 1687–1703. arXiv:1706.04976.
 22. JEM-EUSO observational technique and exposure / JEM-EUSO Collaboration, JH Adams, S Ahmad et al. // *Experimental Astronomy*. 2015. Vol. 40. P. 117–134.
 23. Status of the K-EUSO orbital detector of ultra-high energy cosmic rays / Pavel Klimov, Matteo Battisti, Alexander Belov et al. // *Universe*. 2022. Vol. 8, no. 2. P. 88.
 24. The POEMMA (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) observatory / Poemma Collaboration, A. V. Olinto, J. Krizmanic et al. // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 2021. Vol. 2021, no. 6. P. 007. 2012.07945.
 25. Johnstone AD. Pulsating aurora // *Nature*. 1978. Vol. 274, no. 5667. P. 119–126.

26. Ultraviolet radiation detector of the MSU research educational microsatellite Universitetskii-Tat'yana / G. K. Garipov, M. I. Panasyuk, I. A. Rubinshtein et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2006. Vol. 49, no. 1. P. 126–131. URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0020441206010180>.
27. First results of investigating the space environment onboard the Universitetskii-Tatyana satellite / V. A. Sadovnichy, M. I. Panasyuk, S. Y. Bobrovnikov et al. // Cosmic Research. 2007. Vol. 45. P. 273–286.
28. Atmospheric ultraviolet and red-infrared flashes from Universitetsky-Tatiana-2 satellite data / NN Vedenkin, GK Garipov, PA Klimov et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2011. Vol. 113. P. 781–790.
29. Investigations of the space environment aboard the Universitetsky-Tat'yana and Universitetsky-Tat'yana-2 microsatellites / V. A. Sadovnichy, M. I. Panasyuk, I. V. Yashin et al. // Solar System Research. 2011. Vol. 45. P. 3–29.
30. RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study onboard small spacecraft / MI Panasyuk, SI Svertilov, VV Bogomolov et al. // Advances in Space Research. 2016. Vol. 57, no. 3. P. 835–849.
31. Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part I: Description of the experiment / MI Panasyuk, SI Svertilov, VV Bogomolov et al. // Cosmic Research. 2016. Vol. 54. P. 261–269.
32. Experiment on the Vernov satellite: Transient energetic processes in the Earth's atmosphere and magnetosphere. Part II. First results / MI Panasyuk, SI Svertilov, VV Bogomolov et al. // Cosmic Research. 2016. Vol. 54. P. 343–350.
33. “Lomonosov” Satellite—Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space / V. A. Sadovnichii, M. I. Panasyuk, A. M. Amelyushkin et al. // Space Science Reviews. 2017. Vol. 212, no. 3-4. P. 1705–1738.

34. The method and results of measurement of the optical parameters of the UHECR detector for the TUS space experiment / A. Grinyuk, M. Slunicka, A. Tkachenko et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2014. Vol. 763. P. 604–609.
35. TUS Fresnel Mirror Production and Optical Parameters Measurement / A. Tkachenko, A. Grinyuk, L. Tkachev et al. // International Cosmic Ray Conference. Vol. 33 of International Cosmic Ray Conference. 2013. P. 1981.
36. UV radiation from the atmosphere: Results of the MSU “Tatiana” satellite measurements / G. K. Garipov, B. A. Khrenov, M. I. Panasyuk et al. // Astroparticle Physics. 2005. Vol. 24, no. 4-5. P. 400–408.
37. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite / G. K. Garipov, B. A. Khrenov, P. A. Klimov et al. // Journal of Geophysical Research (Atmospheres). 2013. Vol. 118. P. 370–379.
38. Electronics for the KLYPVE Detector / G. K. Garipov, V. V. Alexandrov, D. I. Bugrov et al. // Observing Ultrahigh Energy Cosmic Rays from Space and Earth / Ed. by Humberto Salazar, Luis Villasenor, Arnulfo Zepeda. Vol. 566 of American Institute of Physics Conference Series. 2001. P. 76–90.
39. Space experiment TUS on board the Lomonosov satellite as pathfinder of JEM-EUSO / J. H. Adams, S. Ahmad, J.-N. Albert et al. // Experimental Astronomy. 2015. Vol. 40. P. 315–326.
40. Klimov PA, Sigaeva KF, Sharakin SA. In-Flight Calibration of the TUS Orbital Cosmic-Ray Telescope // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85. P. 898–900.
41. Klimov PA, Sigaeva KF, Sharakin SA. Flight calibration of the photodetector in the TUS detector // Instruments and Experimental Techniques. 2021. Vol. 64, no. 3. P. 450–455.
42. Mini-EUSO: A high resolution detector for the study of terrestrial and cosmic UV emission from the International Space Station /

- Francesca Capel, Alexander Belov, Marco Casolino, Pavel Klimov // Advances in Space Research. 2018. Vol. 62, no. 10. P. 2954 – 2965. Origins of Cosmic Rays.
43. Klimov PA. The UV Atmosphere (MINI-EUSO) Experiment: A Wide-Field-of-View Lens Telescope on Board the ISS // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2021. Vol. 85, no. 4. P. 389–391.
 44. Spaciroc3: A front-end readout asic for JEM-EUSO cosmic ray observatory / Sylvie Blin-Bondil, F Dulucq, J Rabanal et al. // Proc. of TIPP. 2014.
 45. The integration and testing of the Mini-EUSO multi-level trigger system / Alexander Belov, Mario Bertaina, Francesca Capel et al. // Advances in Space Research. 2018. Vol. 62, no. 10. P. 2966–2976.
 46. Pre-flight qualification tests of the Mini-EUSO telescope engineering model / F Bisconti, H Miyamoto, D Barghini et al. // Experimental Astronomy. 2021. P. 1–26.
 47. Secondary cameras onboard the Mini-EUSO experiment: control software and calibration / Sara Turriziani, Jonah Ekelund, Katsuhiko Tsuno et al. // Advances in Space Research. 2019. Vol. 64, no. 5. P. 1188–1198.
 48. HVPS system for *-EUSO detectors / Zbigniew Plebaniak, Jacek Karczmarczyk, Włodzimierz Marszał et al. // 35th Int. Cosmic Ray Conf., SISSA. 2017.
 49. Mini-EUSO data acquisition and control software / Francesca Capel, Alexander Belov, Giorgio Cambiè et al. // Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems. 2019. Vol. 5, no. 4. P. 044009–044009.
 50. Space Program KOSMOTEPETL (project KLYPVE and TUS) for the study of extremely high energy cosmic rays / B. A. Khrenov, M. I. Panasyuk, V. V. Alexandrov et al. // Observing Ultrahigh Energy Cosmic Rays from Space and Earth / Ed. by Humberto Salazar, Luis Villasenor, Arnulfo Zepeda. Vol. 566 of American Institute of Physics Conference Series. 2001. P. 57–75.

51. KLYPVE/TUS space experiments for study of ultrahigh-energy cosmic rays / B. A. Khrenov, V. V. Alexandrov, D. I. Bugrov et al. // *Physics of Atomic Nuclei*. 2004. Vol. 67. P. 2058–2061.
52. Electronics for the KLYPVE Detector / G. K. Garipov, V. V. Alexandrov, D. I. Bugrov et al. // *AIP Conference Proceedings*. 2001. Vol. 566, no. 1. P. 76–90.
53. Ultra high energy cosmic ray detector KLYPVE on board the Russian Segment of the ISS / Mikhail Panasyuk, Pavel Klimov, Boris Khrenov et al. // *Proceedings of The 34th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2015)*. Vol. 236. 2016. P. 669.
54. The KLYPVE ultrahigh energy cosmic ray detector on board the ISS / G. K. Garipov, M. Yu. Zotov, P. A. Klimov et al. // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences, Physics*. 2015. Vol. 79, no. 3. P. 326–328.
55. Klimov Pavel, Casolino Marco. Status of the KLYPVE-EUSO detector for EECR study on board the ISS // *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*. Vol. 301 of *International Cosmic Ray Conference*. 2017. P. 412.
56. The JEM-EUSO instrument / J. H. Adams, S. Ahmad, J. N. Albert et al. // *Experimental Astronomy*. 2015. Vol. 40, no. 1. P. 19–44.
57. A Review of the EUSO-Balloon Pathfinder for the JEM-EUSO Program / J. H. Adams, S. Ahmad, D. Allard et al. // *Space Science Reviews*. 2022. Vol. 218, no. 1. P. 3.
58. Wiencke Lawrence, Olinto Angela. EUSO-SPB1 Mission and Science // *Proceedings of 35th International Cosmic Ray Conference — PoS(ICRC2017)*. Vol. 301. 2017. P. 1097.
59. Mini-EUSO mission to study Earth UV emissions on board the ISS / S Bacholle, P Barrillon, M Battisti et al. // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2021. Vol. 253, no. 2. P. 36.
60. Belov AA, Klimov PA, Sharakin SA. The network architecture of the data-processing system for the photodetector of an orbital detector of ultra-high

- energy cosmic rays // Instruments and Experimental Techniques. 2018. Vol. 61. P. 27–33.
61. Full simulation of space-based extensive air showers detectors with ESAF / C Berat, S Bottai, D De Marco et al. // Astroparticle Physics. 2010. Vol. 33, no. 4. P. 221–247.
62. Simulations for the JEM-EUSO program with ESAF / Francesco Fenu, Kenji Shinozaki, Hiroko Miyamoto et al. // arXiv preprint arXiv:1909.12012. 2019.
63. Cosmic ray oriented performance studies for the JEM-EUSO first level trigger / G. Abdellaoui, S. Abe, A. Acheli et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 2017. Vol. 866. P. 150–163.
64. An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission / J. H. Adams, S. Ahmad, J.-N. Albert et al. // Astroparticle Physics. 2013. Vol. 44. P. 76–90. 1305.2478.
65. Measurement of the cosmic-ray energy spectrum above 2.5×10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory / Alexander Aab, Pedro Abreu, Marco Aglietta et al. // Physical Review D. 2020. Vol. 102, no. 6. P. 062005.
66. Casolino M, Klimov P, Piotrowski L. Observation of ultra high energy cosmic rays from space: Status and perspectives // Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2017. Vol. 2017, no. 12. P. 12A107.
67. Ivanov Dmitri. PoS (ICRC2015) 349 TA Spectrum Summary. 2015.
68. Valino Ines. The flux of ultra-high energy cosmic rays after ten years of operation of the Pierre Auger Observatory // The 34th International Cosmic Ray Conference / Sissa Medialab. Vol. 236. 2016. P. 271.
69. The AURA Atmosphere Radiation Detector Based on Silicon Photomultipliers for Small Spacecrafts of the Cubesat Type / EV Glinkin, PA Klimov, AS Murashov, DV Chernov // Instruments and Experimental Techniques. 2021. Vol. 64. P. 291–296.

70. System of Imaging Photometers for Upper Atmospheric Phenomena Study in the Arctic Region / Pavel Klimov, Sergei Sharakin, Alexander Belov et al. // *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, no. 10. P. 1572.
71. Ultra high energy cosmic rays The intersection of the Cosmic and Energy Frontiers / A. Coleman, J. Eser, E. Mayotte et al. // *Astroparticle Physics*. 2023. Vol. 149. P. 102819.
72. Optical complex for the study of pulsating aurora with sub-millisecond time resolution on the basis of the Verkhnetulomsky observatory / AA Belov, PA Klimov, BV Kozelov et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2022. Vol. 235. P. 105905.
73. SPACIROC3: A Front-End Readout ASIC for JEM-EUSO cosmic ray observatory / Sylvie Blin-Bondil, Frederic Dulucq, Julio Rabanal et al. // *Proceedings of Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014 — PoS(TIPP2014)*. Vol. 213. 2015. P. 172.
74. Compound auroral micromorphology: ground-based high-speed imaging / Ryuho Kataoka, Yoko Fukuda, Yoshizumi Miyoshi et al. // *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, no. 1. P. 1–9.
75. Ground-based multispectral high-speed imaging of flickering aurora / Ryuho Kataoka, Yoshizumi Miyoshi, Takeshi Sakanoi et al. // *Geophysical research letters*. 2011. Vol. 38, no. 14.
76. EUSO-TA—First results from a ground-based EUSO telescope / Ghouti Abdellaoui, Shinsuke Abe, JH Adams Jr et al. // *Astroparticle Physics*. 2018. Vol. 102. P. 98–111.
77. Ground-based tests of JEM-EUSO components at the Telescope Array site,“EUSO-TA” / JEM-EUSO Collaboration, JH Adams, S Ahmad et al. // *Experimental Astronomy*. 2015. Vol. 40. P. 301–314.
78. A Review of the EUSO-Balloon Pathfinder for the JEM-EUSO Program / JH Adams Jr, S Ahmad, D Allard et al. // *Space Science Reviews*. 2022. Vol. 218, no. 1. P. 3.

79. Tohmatsu Takao, Suzuki Katsuhisa, Ogawa Toshihiro. The atmospheric uv instrumentation for the satellite “TAIYO” // Journal of geomagnetism and geoelectricity. 1975. Vol. 27, no. 4. P. 295–301.
80. Initial observations with the Global Ultraviolet Imager (GUVI) in the NASA TIMED satellite mission / AB Christensen, LJ Paxton, S Avery et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2003. Vol. 108, no. A12.
81. Middle-and low-latitude emissions from energetic neutral atom precipitation seen from ATLAS 1 under quiet magnetic conditions / BA Tinsley, RP Rohrbaugh, M Ishimoto et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1994. Vol. 99, no. A10. P. 19577–19584.
82. Longitudinal structure of the equatorial anomaly in the nighttime ionosphere observed by IMAGE/FUV / E Sagawa, TJ Immel, HU Frey, SB Mende // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2005. Vol. 110, no. A11.
83. Auroral electron distributions derived from combined UV and X-ray emissions / N Østgaard, J Stadsnes, J Bjordal et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2001. Vol. 106, no. A11. P. 26081–26089.
84. Shepherd Gordon G. Spectral imaging of the atmosphere. Academic press, 2002. Vol. 82.
85. ETON 1: A data base pertinent to the study of energy transfer in the oxygen nightglow / RGH Greer, DP Murtagh, IC McDade et al. // Planetary and space science. 1986. Vol. 34, no. 9. P. 771–788.
86. Johnston JE, Broadfoot AL. Midlatitude observations of the night airglow: implications to quenching near the mesopause // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1993. Vol. 98, no. A12. P. 21593–21603.
87. Mesospheric nightglow spectral survey taken by the ISO Spectral Spatial Imager on Atlas 1 / JK Owens, DG Torr, MR Torr et al. // Geophysical research letters. 1993. Vol. 20, no. 6. P. 515–518.

88. Meier RR. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere // Space Science Reviews. 1991. Vol. 58, no. 1. P. 1–185.
89. Latitudinal profile of UV nightglow and electron precipitations / AV Dmitriev, H-C Yeh, MI Panasyuk et al. // Planetary and Space Science. 2011. Vol. 59, no. 8. P. 733–740.
90. A measurement of the air fluorescence yield / F Kakimoto, EC Loh, M Nagano et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1996. Vol. 372, no. 3. P. 527–533.
91. Observation of night-time emissions of the Earth in the near UV range from the International Space Station with the Mini-EUSO detector / M Casolino, D Barghini, M Battisti et al. // Remote Sensing of Environment. 2023. Vol. 284. P. 113336.
92. Linsley John. Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy 10²⁰ eV // Physical Review Letters. 1963. Vol. 10, no. 4. P. 146.
93. Greisen Kenneth. End to the cosmic-ray spectrum? // Physical Review Letters. 1966. Vol. 16, no. 17. P. 748.
94. Zatsepin Georgi T, Kuz'min Vadem A. Upper limit of the spectrum of cosmic rays // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. 1966. Vol. 4. P. 78.
95. Shinozaki Kenji, Teshima Masahiro, Agasa Collaboration. AGASA Results // Nuclear Physics B Proceedings Supplements. 2004. Vol. 136. P. 18–27.
96. Bergman DR, Collaboration High Resolution Fly's Eye et al. Observation of the GZK cutoff using the HiRes detector // Nuclear Physics B- Proceedings Supplements. 2007. Vol. 165. P. 19–26.
97. Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode / R. U. Abbasi, M. Abe, T. Abu-Zayyad et al. // The Astrophysical Journal. 2018. Vol.

- 858, no. 2. P. 76. URL: <https://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/aabad7>.
98. Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV / J Abraham, P Abreu, M Aglietta et al. // Physical review letters. 2008. Vol. 101, no. 6. P. 061101.
 99. The cosmic-ray energy spectrum observed with the surface detector of the telescope array experiment / Tareq Abu-Zayyad, Redrado Aida, Monica Allen et al. // The Astrophysical Journal Letters. 2013. Vol. 768, no. 1. P. L1.
 100. Indications of intermediate-scale anisotropy of cosmic rays with energy greater than 57 EeV in the northern sky measured with the surface detector of the Telescope Array experiment / Rasha U Abbasi, M Abe, T Abu-Zayyad et al. // The Astrophysical Journal Letters. 2014. Vol. 790, no. 2. P. L21.
 101. Anisotropies in the arrival direction distribution of ultra-high energy cosmic rays measured by the Telescope Array surface detector / Jihyun Kim, Dmitri Ivanov, Kazumasa Kawata et al. // PoS. 2023. Vol. ICRC2023. P. 244.
 102. Caccianiga Lorenzo, Collaboration Pierre Auger et al. Anisotropies of the highest energy cosmic-ray events recorded by the Pierre Auger Observatory in 15 years of operation // 36th international cosmic ray conference / SISSA Medialab. Vol. 358. 2021. P. 206.
 103. Semikoz D, Tinyakov P, Zotov M. Detection prospects of the Telescope Array hotspot by space observatories // Physical Review D. 2016. Vol. 93, no. 10. P. 103005.
 104. Yushkov Alexey. Mass Composition of Cosmic Rays with Energies above $10^{17.2}$ eV from the Hybrid Data of the Pierre Auger Observatory // PoS. 2019. Vol. ICRC2019. P. 482.
 105. Performance and air-shower reconstruction techniques for the JEM-EUSO mission / M Bertaina, Svetlana Biktmerova, Klaus Bittermann et al. // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, no. 10. P. 1515–1535.

106. New measurement on photon yields from air and the application to the energy estimation of primary cosmic rays / M Nagano, K Kobayakawa, Naoto Sakaki, K Ando // *Astroparticle Physics*. 2004. Vol. 22, no. 3-4. P. 235–248.
107. Temperature and humidity dependence of air fluorescence yield measured by AIRFLY / M Ave, M Bohacova, B Buonomo et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2008. Vol. 597, no. 1. P. 50–54.
108. Hörandel J. R., GCOS Collaboration. GCOS - The Global Cosmic Ray Observatory // *37th International Cosmic Ray Conference*. 2022. P. 27. 2203.01127.
109. The trigger system of the JEM-EUSO Project / Mario Bertaina, T Ebisuzaki, T Hamada et al. // *The 30th International Cosmic Ray Conference (ICRC)*, Mrida, Mexico. 2007.
110. Description and performance results of the trigger logic of TUS and Mini-EUSO to search for Ultra-High Energy Cosmic Rays from space / M. Bertaina, D. Barghini, M. Battisti et al. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2023. Vol. 1045. P. 167601. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900222008932>.
111. UV telescope TUS on board Lomonosov satellite: Selected results of the mission / Dario Barghini, Mario Bertaina, Alberto Cellino et al. // *Advances in Space Research*. 2022. Vol. 70, no. 9. P. 2734–2749.
112. A Study of Atmospheric Radiation Flashes in the Near-Ultraviolet Region Using the TUS Detector aboard the Lomonosov Satellite / B. A. Khrenov, G. K. Garipov, M. Yu. Zotov et al. // *Cosmic Research*. 2020. Vol. 58, no. 5. P. 317–329.
113. Preliminary results from the TUS ultra-high energy cosmic ray orbital telescope: Registration of low-energy particles passing through the

- photodetector / P. A. Klimov, M. Yu. Zotov, N. P. Chirskaya et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2017. Vol. 81, no. 4. P. 407–409. URL: <https://doi.org/10.3103/S1062873817040256>.
114. First results from the TUS orbital detector in the extensive air shower mode / BA Khrenov, PA Klimov, MI Panasyuk et al. // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2017. Vol. 2017, no. 09. P. 006.
115. Search for Extreme Energy Cosmic Rays with the TUS orbital telescope and comparison with ESAF / Bertaina, Mario, Castellina, Antonella, Cremonini, Roberto et al. // EPJ Web Conf. 2019. Vol. 210. P. 06006. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921006006>.
116. The orbital TUS detector simulation / A. Grinyuk, V. Grebenyuk, B. Khrenov et al. // Astroparticle Physics. 2017. Vol. 90. P. 93–97. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927650516301244>.
117. Biktemerova S. V., Botvinko A. A., Chirskaya N. P. et al. Search for extreme energy cosmic ray candidates in the TUS orbital experiment data. 2017. 1706.05369.
118. Sharakin Sergei, Hernandez OI Ruiz. Kinematics reconstruction of the EAS-like events registered by the TUS detector // Journal of Instrumentation. 2021. Vol. 16, no. 07. P. T07013.
119. An extensive-air-shower-like event registered with the TUS orbital detector / B. A. Khrenov, G. K. Garipov, M. A. Kaznacheeva et al. // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2020. Vol. 2020, no. 3. P. 033. 1907.06028.
120. Full simulation of space-based extensive air showers detectors with ESAF / C. Berat, S. Bottai, D. De Marco et al. // Astroparticle Physics. 2010. Vol. 33. P. 221–247. arXiv:0907.5275.
121. Spitzer Lyman. On the Origin of Heavy Cosmic-Ray Particles // Phys. Rev. 1949. Vol. 76. P. 583–583. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.76.583>.

122. Hayakawa Satio. Dust grain origin of cosmic ray air showers // *Astrophysics and Space Science*. 1972. Vol. 16. P. 238–240.
123. Anchordoqui Luis A. Cosmic dust grains strike again // *Phys. Rev. D*. 2000. Vol. 61. P. 087302. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.61.087302>.
124. A pot of gold at the end of the cosmic “rainbow”? / Luis Alfredo Anchordoqui, María Teresa Dova, TP McCauley et al. // *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*. 2001. Vol. 97, no. 1-3. P. 203–206.
125. Space Program KOSMOTEPETL (project KLYPVE and TUS) for the study of extremely high energy cosmic rays / BA Khrenov, MI Panasyuk, VV Alexandrov et al. // *AIP Conference Proceedings / American Institute of Physics*. Vol. 566. 2001. P. 57–75.
126. Efimov NN et al. Peculiarities of muon component in giant eas // *Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays*. 1991. P. 434.
127. Atwater Thomas W, Freier Phyllis S. Meson multiplicity versus energy in relativistic nucleus-nucleus collisions // *Physical Review Letters*. 1986. Vol. 56, no. 13. P. 1350.
128. Hoang Thiem, Lazarian A, Schlickeiser R. On origin and destruction of relativistic dust and its implication for ultrahigh energy cosmic rays // *The Astrophysical Journal*. 2015. Vol. 806, no. 2. P. 255.
129. An evaluation of the exposure in nadir observation of the JEM-EUSO mission / J. H. Adams, S. Ahmad, J. N. Albert et al. // *Astroparticle Physics*. 2013. Vol. 44. P. 76–90. 1305.2478.
130. Markson Ralph, Muir Michael. Solar Wind Control of the Earth’s Electric Field // *Science*. 1980. Vol. 208, no. 4447. P. 979–990. <http://science.sciencemag.org/content/208/4447/979.full.pdf>.
131. The response of clouds and aerosols to cosmic ray decreases / J. Svensmark, M. B. Enghoff, N. J. Shaviv, H. Svensmark // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2016. Vol. 121, no. 9.

P. 8152–8181. 2016JA022689. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2016JA022689>.

132. Lehtinen N. G., Inan U. S., Bell T. F. Effects of thunderstorm-driven runaway electrons in the conjugate hemisphere: Purple sprites, ionization enhancements, and gamma rays // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2001. Vol. 106. P. 28841–28856.
133. Vaughan Jr OH, Vonnegut B. Recent observations of lightning discharges from the top of a thundercloud into the clear air above // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1989. Vol. 94, no. D11. P. 13179–13182.
134. Upward electrical discharges from thunderstorm tops / Walter A Lyons, Thomas E Nelson, Russell A Armstrong et al. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2003. Vol. 84, no. 4. P. 445–454.
135. Pasko VP. Blue jets and gigantic jets: transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2008. Vol. 50, no. 12. P. 124050.
136. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 1. Red sprites / David D Sentman, Eugene M Wescott, DL Osborne et al. // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22, no. 10. P. 1205–1208.
137. Preliminary results from the Sprites94 aircraft campaign: 2. Blue jets / Eugene M Wescott, D Sentman, D Osborne et al. // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22, no. 10. P. 1209–1212.
138. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere / VP Pasko, US Inan, TF Bell, Yu N Taranenko // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1997. Vol. 102, no. A3. P. 4529–4561.
139. Surkov VV, Hayakawa M. Underlying mechanisms of transient luminous events: a review // *Annales Geophysicae / Copernicus GmbH*. Vol. 30. 2012. P. 1185–1212.

140. Surkov Vadim V, Hayakawa Masashi. Progress in the study of transient luminous and atmospheric events: A review // *Surveys in Geophysics*. 2020. Vol. 41, no. 5. P. 1101–1142.
141. Le Vine David M. Sources of the strongest RF radiation from lightning // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1980. Vol. 85, no. C7. P. 4091–4095. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/JC085iC07p04091>.
142. Marshall R. A., da Silva C. L., Pasko V. P. Elve doublets and compact intracloud discharges // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42, no. 14. P. 6112–6119. 2015GL064862. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL064862>.
143. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records / DA Smith, MJ Heavner, AR Jacobson et al. // *Radio Science*. 2004. Vol. 39, no. 1. P. 1–11.
144. Sprites, ELF transients, and positive ground strokes / Dennis J Boccippio, Earle R Williams, Stan J Heckman et al. // *Science*. 1995. P. 1088–1091.
145. Statistical analysis of space-time relationships between sprites and lightning / F. T. SaO Sabbas, D. D. Sentman, E. M. Wescott et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2003. Vol. 65. P. 525–535.
146. Optical spectral characteristics of sprites / DL Hampton, MJ Heavner, EM Wescott, DD Sentman // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23, no. 1. P. 89–92.
147. Submillisecond imaging of sprite development and structure / S. A. Cummer, N. Jaugey, J. Li et al. // *Geophys.Res.Lett.* 2006. Vol. 33. P. L04104.
148. The role of the space shuttle videotapes in the discovery of sprites, jets and elves / William L Boeck, Otha H Vaughan, Richard J Blakeslee et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. Vol. 60, no. 7. P. 669–677.
149. Blue Jets: their relationship to lightning and very large hailfall, and their physical mechanisms for their production / E. M. Wescott, D. D. Sentman,

- M. J. Heavner et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1998. Vol. 60. P. 713–724.
150. Sprites and possible mesospheric effects / HC Stenbaek-Nielsen, DR Moudry, EM Wescott et al. // Geophysical Research Letters. 2000. Vol. 27, no. 23. P. 3829–3832.
151. Triangulation of sprites, associated halos and their possible relation to causative lightning and micrometeors / EM Wescott, HC Stenbaek-Nielsen, DD Sentman et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2001. Vol. 106, no. A6. P. 10467–10477.
152. Statistical characteristics of sprite halo events using coincident photometric and imaging data / R Miyasato, Michael J Taylor, H Fukunishi, HC Stenbaek-Nielsen // Geophysical Research Letters. 2002. Vol. 29, no. 21. P. 29–1.
153. Halos generated by negative cloud-to-ground lightning / HU Frey, SB Mende, Steven A Cummer et al. // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, no. 18.
154. Charge moment change and lightning-driven electric fields associated with negative sprites and halos / Jingbo Li, Steven Cummer, Gaopeng Lu, Lucian Zigoneanu // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2012. Vol. 117, no. A9.
155. Modeling elves observed by FORMOSAT-2 satellite / C.-L. Kuo, A. B. Chen, Y. J. Lee et al. // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2007. Vol. 112, no. A11. P. A11312.
156. Barrington-Leigh Christopher P, Inan Umran S, Stanley Mark. Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2001. Vol. 106, no. A2. P. 1741–1750.
157. Newsome RT, Inan US. Free-running ground-based photometric array imaging of transient luminous events // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. Vol. 115, no. A7.

158. Upward electrical discharges observed above Tropical Depression Dorian / Ningyu Liu, Nicholas Spiva, Joseph R Dwyer et al. // Nature Communications. 2015. Vol. 6, no. 1. P. 5995.
159. Electrical discharge from a thundercloud top to the lower ionosphere / Victor P Pasko, Mark A Stanley, John D Mathews et al. // Nature. 2002. Vol. 416, no. 6877. P. 152–154.
160. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events / Alfred B. Chen, Cheng-Ling Kuo, Yi-Jen Lee et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008. Vol. 113, no. A8. P. n/a–n/a. A08306. URL: <http://dx.doi.org/10.1029/2008JA013101>.
161. Radiative emission and energy deposition in transient luminous events / C L Kuo, A B Chen, J K Chou et al. // Journal of Physics D: Applied Physics. 2008. Vol. 41, no. 23. P. 234014. URL: <http://stacks.iop.org/0022-3727/41/i=23/a=234014>.
162. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere / H Fukunishi, Y Takahashi, M Kubota et al. // Geophysical Research Letters. 1996. Vol. 23, no. 16. P. 2157–2160.
163. Barrington-Leigh Christopher P, Inan Umran S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges // Geophysical Research Letters. 1999. Vol. 26, no. 6. P. 683–686.
164. Said R. K., Inan U. S., Cummins K. L. Long-range lightning geolocation using a VLF radio atmospheric waveform bank // Journal of Geophysical Research (Atmospheres). 2010. Vol. 115, no. D14. P. D23108.
165. Said RK, Cohen MB, Inan US. Highly intense lightning over the oceans: Estimated peak currents from global GLD360 observations // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. Vol. 118, no. 13. P. 6905–6915.
166. Marshall RA, Silva CL, Pasko VP. Elve doublets and compact intracloud discharges // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42, no. 14. P. 6112–6119.

167. Klimov Pavel A, Sharakin Sergei A, Kaznacheeva Margarita A. DOUBLE ELVES MEASURED BY THE TUS SPACE DETECTOR // Atmosphere, Ionosphere, Safety. 2020. P. 137–140.
168. Van der Velde Oscar A., Montanyà Joan. Statistics and variability of the altitude of elves // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, no. 10. P. 5467–5474.
169. Nag Amitabh, Rakov Vladimir A, Cramer John A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges // IEEE transactions on electromagnetic compatibility. 2010. Vol. 53, no. 2. P. 407–413.
170. Romoli Giulia. Study of multiple ring ELVES with the Mini-EUSO telescope on-board the International Space Station // PoS. 2023. Vol. ICRC2023. P. 223.
171. Piotrowski Lech Wiktor. A search for Elves in Mini-EUSO data using CNN-based one-class classifier // PoS. 2023. Vol. ICRC2023. P. 333.
172. Observation of ELVES with Mini-EUSO telescope on board the International Space Station / Laura Marcelli, Enrico Arnone, Matteo Barghini et al. // arXiv preprint arXiv:2112.08004. 2021.
173. Edens HE. Photographic and lightning mapping observations of a blue starter over a New Mexico thunderstorm // Geophysical Research Letters. 2011. Vol. 38, no. 17.
174. ISUAL-observed blue luminous events: The associated sferics / Jung-Kuang Chou, Rue-Ron Hsu, Han-Tzong Su et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. Vol. 123, no. 4. P. 3063–3077.
175. Profuse activity of blue electrical discharges at the tops of thunderstorms / Olivier Chanrion, Torsten Neubert, Andreas Mogensen et al. // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44, no. 1. P. 496–503.
176. The modular multispectral imaging array (MMIA) of the ASIM payload on the international space station / Olivier Chanrion, Torsten Neubert, Ib Lundgaard Rasmussen et al. // Space Science Reviews. 2019. Vol. 215. P. 1–25.

177. Global frequency and geographical distribution of nighttime streamer corona discharges (BLUEs) in thunderclouds / Sergio Soler, Francisco J Gordillo-Vázquez, FJ Pérez-Invernón et al. // *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48, no. 18. P. e2021GL094657.
178. A distinct class of isolated intracloud lightning discharges and their associated radio emissions / DA Smith, XM Shao, DN Holden et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1999. Vol. 104, no. D4. P. 4189–4212.
179. Blue optical observations of narrow bipolar events by ASIM suggest corona streamer activity in thunderstorms / S Soler, Francisco J Pérez-Invernón, FJ Gordillo-Vázquez et al. // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2020. Vol. 125, no. 16. P. e2020JD032708.
180. Time and energy characteristics of UV flashes in the atmosphere: Data of the Universitetsky-Tatiana satellite / GK Garipov, PA Klimov, VS Morozenko et al. // *Cosmic Research*. 2011. Vol. 49. P. 391–398.
181. High-Energy Transient Luminous Atmospheric Phenomena: The Potential Danger for Suborbital Flights / Gali Garipov, Alexander Grigoriev, Boris Khrenov et al. // *Extreme Events in Geospace*. Elsevier, 2018. P. 473–490.
182. Bruce RE. *Thermospheric Circulation*. 1972.
183. Orville R. E., Henderson R. W. Absolute Spectral Irradiance Measurements of Lightning from 375 to 880 nm. // *Journal of Atmospheric Sciences*. 1984. Vol. 41. P. 3180–3180.
184. Milikh G., Valdivia J. A., Papadopoulos K. Spectrum of red sprites // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1998. Vol. 60. P. 907–915.
185. Hutchins M. L., Holzworth R. Thunderstorm characteristics from cluster analysis of lightning // *XV International Conference on Atmospheric Electricity*. 2014.
186. MODTRAN® 6: A major upgrade of the MODTRAN® radiative transfer code / Alexander Berk, Patrick Conforti, Rosemary Kennett

- et al. // 2014 6th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS) / IEEE. 2014. P. 1–4.
187. Berk Alexander, Acharya Prabhat K, Bernstein Lawrence S et al. Band model method for modeling atmospheric propagation at arbitrarily fine spectral resolution. 2008. US Patent 7,433,806.
 188. Ögelman H. Millisecond time scale atmospheric light pulses associated with solar and magnetospheric activity // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 1973. Vol. 78. P. 3033.
 189. Nemzek R. J., Winckler J. R. Observation and interpretation of fast sub-visual light pulses from the night sky // Geophys.Res.Lett. 1989. Vol. 16. P. 1015–1018.
 190. Satellite observations of lightning-induced electron precipitation / H. D. Voss, M. Walt, W. L. Imhof et al. // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 11725–11744.
 191. Charman W. N., Jelley J. V. A search for pulses of fluorescence produced by supernovae in the upper atmosphere // Journal of Physics A Mathematical General. 1972. Vol. 5. P. 773–780.
 192. Elliot J. L. Atmospheric Fluorescence as a Ground-Based Method of Detecting Cosmic X-Rays // SAO Special Report. 1972. Vol. 341.
 193. Ground-based observations of unusual atmospheric light emissions / Jing Yang, Gaopeng Lu, Jian Du, Weilin Pan // Journal of Meteorological Research. 2014. Vol. 28, no. 4. P. 624–633. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s13351-014-3086-7>.
 194. Characteristics of short-duration electron precipitation bursts and their relationship with VLF wave activity / WL Imhof, HD Voss, J Mobilia et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1989. Vol. 94, no. A8. P. 10079–10093.
 195. Ermilov S Yu, Mikhalev AV. Optical manifestation of microbursts of electron fluxes // Journal of atmospheric and terrestrial physics. 1991. Vol. 53, no. 11-12. P. 1157–1160.

196. UV transient atmospheric events observed far from thunderstorms by the Vernov satellite / Pavel A Klimov, Margarita A Kaznacheeva, Boris A Khrenov et al. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2018. Vol. 15, no. 8. P. 1139–1143.
197. Hutchins M. L., Holzworth R. H., Brundell J. B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2014. Vol. 119. P. 620–629.
198. Global survey of upper atmospheric transient luminous events on the ROCSAT-2 satellite / JL Chern, RR Hsu, Han-Tzong Su et al. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2003. Vol. 65, no. 5. P. 647–659.
199. Kaznacheeva MA, Klimov PA, Khrenov BA. Transient UV background when registering EASes with the TUS orbital detector // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2019. Vol. 83. P. 1024–1027.
200. Surkov VV. On the nature of optical flashes observed aboard Universitetsky-Tatyana and Vernov satellites // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2020. Vol. 210. P. 105389.
201. Yamamoto Tatsundo. On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1988. Vol. 93, no. A2. P. 897–911.
202. Flickering, a 10-cps fluctuation within bright auroras / R. Beach, G. R. Cresswell, T. N. Davis et al. // Planetary and Space Science. 1968. Vol. 16, no. 12. P. 1525,in9,1527–1526,in10,1529.
203. On the persistent shape and coherence of pulsating auroral patches / Beate Krøvel Humberstet, JW Gjerloev, Ian R Mann et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. Vol. 123, no. 5. P. 4272–4289.
204. Scourfield MWJ, Innes WF, Parsons NR. Spatial coherency in pulsating aurora // Planetary and Space Science. 1972. Vol. 20, no. 11. P. 1843–1848.

205. Diffuse and Pulsating Aurora / Yukitoshi Nishimura, Marc R. Lessard, Yuto Katoh et al. // Space Science Reviews. 2020. Vol. 216, no. 1. P. 4.
206. Royrvik Ola, Davis TN. Pulsating aurora: Local and global morphology // Journal of Geophysical Research. 1977. Vol. 82, no. 29. P. 4720–4740.
207. Rayleigh-Taylor type instability in auroral patches / K Shiokawa, A Nakajima, A Ieda et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. Vol. 115, no. A2.
208. Samara M, Michell RG. Ground-based observations of diffuse auroral frequencies in the context of whistler mode chorus // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2010. Vol. 115, no. A9.
209. Multiscale temporal variations of pulsating auroras: On-off pulsation and a few Hz modulation / Takanori Nishiyama, Takeshi Sakanoi, Yoshizumi Miyoshi et al. // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2014. Vol. 119, no. 5. P. 3514–3527.
210. Lessard MR. A review of pulsating aurora // Auroral phenomenology and magnetospheric processes: Earth and other planets. 2012. Vol. 197. P. 55–68.
211. Generation region of pulsating aurora obtained simultaneously by the FAST satellite and a Syowa-Iceland conjugate pair of observatories / N Sato, DM Wright, CW Carlson et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2004. Vol. 109, no. A10.
212. Demekhov AG, Trakhtengerts V Yu. A mechanism of formation of pulsating aurorae // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1994. Vol. 99, no. A4. P. 5831–5841.
213. Multievent study of the correlation between pulsating aurora and whistler mode chorus emissions / Y Nishimura, J Bortnik, W Li et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2011. Vol. 116, no. A11.
214. Tracking the region of high correlation between pulsating aurora and chorus: Simultaneous observations with Arase satellite and ground-based all-sky imager in Russia / S Kawamura, K Hosokawa, S Kurita et al. //

- Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2019. Vol. 124, no. 4. P. 2769–2778.
215. High-speed stereoscopy of aurora / R Kataoka, Y Fukuda, HA Uchida et al. // *Annales Geophysicae / Copernicus Publications Göttingen, Germany*. Vol. 34. 2016. P. 41–44.
216. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms / Esa Turunen, Pekka T Verronen, Annika Seppälä et al. // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2009. Vol. 71, no. 10-11. P. 1176–1189.
217. Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves / S. Kasahara, Y. Miyoshi, S. Yokota et al. // *Nature*. 2018. Vol. 554, no. 7692. P. 337–340.
218. Relativistic Electron Microbursts as High-Energy Tail of Pulsating Aurora Electrons / Y. Miyoshi, S. Saito, S. Kurita et al. // *Geophysical Research Letters*. 2020. Vol. 47, no. 21. P. e90360.
219. Observations of precipitation energies during different types of pulsating aurora / Fasil Tesema, Noora Partamies, Hilde Nesse Tyssøy, Derek McKay // *Annales Geophysicae*. 2020. Vol. 38, no. 6. P. 1191–1202.
220. Energetic electron precipitation associated with pulsating aurora: EISCAT and Van Allen Probe observations / Y. Miyoshi, S. Oyama, S. Saito et al. // *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*. 2015. Vol. 120, no. 4. P. 2754–2766.
221. Ground-based instruments of the PWING project to investigate dynamics of the inner magnetosphere at subauroral latitudes as a part of the ERG-ground coordinated observation network / Kazuo Shiokawa, Yasuo Katoh, Yoshiyuki Hamaguchi et al. // *Earth, Planets and Space*. 2017. Vol. 69, no. 1. P. 1–21.
222. Microscopic observations of pulsating aurora associated with chorus element structures: Coordinated Arase satellite-PWING observations /

- Mitsunori Ozaki, Kazuo Shiokawa, Yoshizumi Miyoshi et al. // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45, no. 22. P. 12–125.
223. Michell RG, Grydeland T, Samara M. Characteristics of Poker Flat Incoherent Scatter Radar (PFISR) naturally enhanced ion-acoustic lines (NEIALs) in relation to auroral forms // *Annales Geophysicae / Copernicus GmbH*. Vol. 32. 2014. P. 1333–1347.
224. Michell RG, Samara M. Ground magnetic field fluctuations associated with pulsating aurora // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2015. Vol. 120, no. 10. P. 9192–9201.
225. Klimov PA, Sigaeva KF. Fast near-UV radiation pulsations measured by the space telescope TUS in the auroral region // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. Vol. 220. P. 105672.
226. Klimov Pavel et al. Ultra high energy cosmic rays detector TUS on-board Lomonosov satellite // *Proceedings, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013): Rio de Janeiro, Brazil, July 2-9, 2013*. 2013. P. 0406.
227. An experiment in radiation measurement using the depron instrument / Victor V Benghin, Oleg Y Nechaev, Ivan A Zolotarev et al. // *Space Science Reviews*. 2018. Vol. 214. P. 1–9.
228. Tsurutani Bruce T, Gonzalez Walter D. The cause of high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAAs): Interplanetary Alfvén wave trains // *Planetary and Space Science*. 1987. Vol. 35, no. 4. P. 405–412.
229. The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP / CA Kletzing, WS Kurth, M Acuna et al. // *Space Science Reviews*. 2013. Vol. 179, no. 1-4. P. 127–181.
230. Space–Time Structure of Energetic Electron Precipitations according to the Data of Balloon Observations and Polar Satellite Measurements on February 1–6, 2015 / AD Kugusheva, VV Kalegaev, NA Vlasova et al. // *Cosmic Research*. 2021. Vol. 59. P. 446–455.

231. Relativistic electron acceleration during high-intensity, long-duration, continuous AE activity (HILDCAA) events: Solar cycle phase dependences / Rajkumar Hajra, Bruce T. Tsurutani, Ezequiel Echer, Walter D. Gonzalez // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41, no. 6. P. 1876–1881.
232. Relativistic ($E > 0.6, > 2.0$, and > 4.0 MeV) electron acceleration at geosynchronous orbit during high-intensity, long-duration, continuous AE activity (HILDCAA) events / Rajkumar Hajra, Bruce T. Tsurutani, Ezequiel Echer et al. // *The Astrophysical Journal*. 2015. Vol. 799, no. 1. P. 39.
233. Near-UV Pulsations in the Aurora Region Measured by Orbital Telescope TUS during High-Intensity and Long-Duration Continuous AE Activity / Pavel Klimov, Vladimir Kalegaev, Ksenia Sigaeva et al. // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 147.
234. Occurrence characteristics of relativistic electron microbursts from SAMPEX observations / Emma Douma, Craig J. Rodger, Lauren W. Blum, Mark A. Clilverd // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2017. Vol. 122, no. 8. P. 8096–8107.
235. Simultaneous Precipitation of Sub-Relativistic Electron Microburst and Pulsating Aurora Electrons / Taku Namekawa, Takefumi Mitani, Kazushi Asamura et al. // *Authorea Preprints*. 2023.
236. Observations of precipitation energies during different types of pulsating aurora / Fasil Tesema, Noora Partamies, Hilde Nesse Tyssøy, Derek McKay // *Annales Geophysicae*. 2020. Vol. 38, no. 6. P. 1191–1202.
237. Penetration of MeV electrons into the mesosphere accompanying pulsating aurorae / Y Miyoshi, K Hosokawa, S Kurita et al. // *Scientific reports*. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 1–9.
238. Mesospheric ozone destruction by high-energy electron precipitation associated with pulsating aurora / Esa Turunen, Antti Kero,

- Pekka T Verronen et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2016. Vol. 121, no. 19. P. 11–852.
239. Observations of electron precipitation during pulsating aurora and its chemical impact / Fasil Tesema, Noora Partamies, H Nesse Tyssøy et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. Vol. 125, no. 6. P. e2019JA027713.
240. Sergienko T.I., Ivanov V.E. A new approach to calculate the excitation of atmospheric gases by auroral electron impact // Annales Geophysicae. 1993. Vol. 11. P. 717–727.
241. A generalized method for calculating atmospheric ionization by energetic electron precipitation / Wei Xu, Robert A Marshall, Hilde Nesse Tyssøy, Xiaohua Fang // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. Vol. 125, no. 11. P. e2020JA028482.
242. The Upgraded Optical Complex in the Verkhnetulomsky Observatory: Equipment and First Results / AA Belov, PA Klimov, BV Kozelov et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. Vol. 87, no. 2. P. 207–213.
243. Altitude of pulsating arcs as inferred from tomographic measurements / Vladimir Safargaleev, Tima Sergienko, Keisuke Hosokawa et al. // Earth, Planets and Space. 2022. Vol. 74, no. 1. P. 1–12.
244. Interpretation of Cluster data on chorus emissions using the backward wave oscillator model / V Yu Trakhtengerts, AG Demekhov, EE Titova et al. // Physics of Plasmas. 2004. Vol. 11, no. 4. P. 1345–1351.
245. Vallance Jones A, Aurora D. Reidel Publishing Company // Dordrecht, Holland. 1974.
246. FUV-visible photometric imaging of aurorae / WK Tobiska, GR Gladstone, S Chakrabarti et al. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1993. Vol. 98, no. A10. P. 17525–17535.
247. Rocket-borne EUV-visible emission measurements / G Schmidtke, G Stasek, C Wita et al. // Journal of atmospheric and terrestrial physics. 1985. Vol. 47, no. 1-3. P. 147–158.

248. Kozelov B.V., Ivanov V.E., Sergienko T.I. Auroral intensity variations in the area of combined electron and proton particles precipitation: possibilities of determination of particle flux // *Geonagm. Aeronom.* 2002. Vol. 42, no. 4. P. 513–518.
249. Ivanov V.E., Kozelov B.V. Passage of electron and proton-hydrogen beams in the Earth's atmosphere. (published in Russian) : Publishing house of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2001.
250. Atmospheric effects of a relativistic electron beam injected from above: Chemistry, electrodynamics, and radio scattering / Robert A Marshall, Wei Xu, Antti Kero et al. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences.* 2019. Vol. 6. P. 6.
251. Variations in Pulsating Aurora Emission in 337 nm and 391 nm Nitrogen Spectral Lines During Geomagnetic Substorms / Pavel Klimov, Vera Nikolaeva, Alexander Belov et al. // *Universe.* 2023. Vol. 9, no. 10. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1997/9/10/441>.
252. Absolute calibration of the JEM-EUSO photodetection modules / Trofimov, Daniil, Belov, Alexander, Blin-Bondil, Sylvie et al. // *EPJ Web Conf.* 2023. Vol. 283. P. 06016. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328306016>.
253. Occurrence and average behavior of pulsating aurora / N Partamies, D Whiter, A Kadokura et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics.* 2017. Vol. 122, no. 5. P. 5606–5618.