

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Климов Павел Александрович

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

Специальность

1.3.1. «Физика космоса, астрономия»

1.6.18. «Науки об атмосфере и климате»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Отделе космических наук Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова

Официальные оппоненты:

Демехов Андрей Геннадьевич,
доцент, доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Полярный геофизический институт» (ПГИ)
главный научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН)
заведующий сектором

Сурков Вадим Вадимович,
профессор, доктор физико-математических наук
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.
Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)
ведущий научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)
ведущий научный сотрудник

Чилингарян Ашот Агасиевич,
профессор, доктор физико-математических наук
Национальная лаборатория им. А.И.Алиханяна, Ереван, Армения,
руководитель отделения космических лучей

Защита диссертации состоится «08» февраля 2024 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.013.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: pavelklimov@eas.sinp.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.1/2784>

Автореферат разослан «22» ноября 2023 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физико-математических наук

А.И. Богомазов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 [A13, A17].

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 реконструировать положение локального родительского источника электромагнитного импульса [11]. 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 надир позволяет получить динамику развития таких явлений как ELVES и локализовать их источники [A3].

Орбитальная аппаратура позволяет проводить измерения по всему Земному шару, тем самым обозревая 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 [12]. Но пока ни один из них не является доказанным [13].

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 [14, 15] 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 [16]. Было предложено осуществлять измерения флуоресценции ШАЛ с орбиты Земли [17], затем эта идея развивалась в ряде проектов и впервые реализована в проекте ТУС [A18]. Регистрация ШАЛ с орбиты позволяет проводить измерения по всей небесной сфере с помощью одного прибора и практически с равномерной экспозицией [18]. 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, A40, 19).

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) [20]. 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 квази-стационарного 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», нано-спутников 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 приэкваториальных 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 фоны 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 ($\sim 1 \text{ мкс}$), 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 $0,3 \text{ ср}$ порядка $18000 \text{ км}^2 \text{ ср}$ 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 10^{20} до 10^{26} фотон/событие, географическое распределение событий с большой энергией соответствует грозовым областям, 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 ($N_2^+ 1N$) и 337 нм ($N_2 2P$) 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 POEMMA, 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 microsattellites // *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 K-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 «Верхнетуломский»: 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. — С. 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 A1, A2, A4, A5, A13, A17, A48 автором проведен анализ данных (вклад 40%). В работе A22 автор диссертации является первым и основным автором, вклад 60 %. В статьях по проектам «Гатьяна-2», «Вернов» и «Ломоносов» (A3, A10-A12, A19) 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 (A14, A16, A18, A23, A24, A26, A28, A36, A50, A51) 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 A32 и A33 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 (A35, A38, A41–A43, A47) является определяющим. Публикации по проекту «УФ атмосфера» (A30, A34, A37, A39, A45) 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 (A20, A21), вклад автора 20 %. В статьях коллаборации JEM-EUSO, посвященных проекту ТУС и исследованию атмосферных транзиентов (A8, A9) вклад автора определяющий, т.к. сами исследования и тексты статей написаны им лично. В работах по аппаратуре и результатам серии фотометров «АУРА» (A25, A27, A29) вклад автора определяющий, не менее 60 %. Работа по оптическим измерениям зеркала-концентратора (A6) выполнена совместно с ОИЯИ и вклад автора 20 %. В работах по проекту «КЛПВЭ»

(A7, A15, A31, A40, A44, A49) автор является руководителем, лично автором выполнены оценки пороговой энергии, экспозиции, предложены варианты структуры аппаратуры и ее проработка, вклад автора 30 %. В статье A46 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 библиографические ссылки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении содержится краткое описание темы исследований, обоснование актуальности и формулировка целей и задач исследований, описанных в диссертации. Описана структура диссертации и положения выносимые на защиту. Изложены научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация полученных результатов.

В диссертационной работе приводятся результаты, полученные в ходе орбитальных экспериментов, по исследованию УФ-свечения атмосферы 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 первой главе** приводится подробное описание разработанной автором аппаратуры, процедур наземных и полетных калибровок, а также примеры измерений.

Ключевые характеристики детекторов для орбитальных и наземных экспериментов перечислены в таблице 1.

Детектор ДУФ использовался на спутниках МГУ: «Университетский-Татьяна» (2005–2006) [7, А1], «Университетский-Татьяна-2» (2009) [А3, А5] и «Вернов» (2014) [А10–А12]. С его помощью впервые получены географические и энергетические распределения атмосферных вспышек, описанные в главе 4.

Телескоп ТУС является первой в мире реализацией орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий, что определяет его ключевые характеристики: высокую чувствительность и временное разрешение. В ходе эксперимента исследован транзитный УФ-фон регистрации КЛ ПВЭ, получены первые события-кандидаты в ШАЛ, зарегистрированы события ELVES, пульсирующие полярные сияния.

«КЛПВЭ» – проект орбитального телескопа КЛ ПВЭ для Международной космической станции. Проработано несколько вариантов детектора. Проведены расчеты годовой экспозиции, которая зависит от пороговой энергии регистрации и выходит на плато в районе $\sim 18000 \text{ км}^2 \text{ ср в год}$, при энергиях выше 100 ЭэВ. Ожидаемая частота событий КЛ ПВЭ оценивается примерно в 65 событий в год выше 50 ЭэВ.

Научная аппаратура «УФ атмосфера» работает на борту МКС с 2019 года. Этот детектор – полноценный прототип «КЛПВЭ» – обладает одновременно широким полем зрения ($\pm 20^\circ$), высокой чувствительностью (площадь входного окна 490 см^2) и высоким временным разрешением (2,5 мкс). Проведены детальные измерения УФ-фона для регистрации КЛ ПВЭ и транзитных событий [А34, А45].

Детекторы серии «АУРА» являются частью программы МГУ по разработке и запуску спутников малого размера (кубсат) для исследования околоземного пространства и атмосферы [А25]. В них впервые применены в открытом космическом пространстве кремниевые фотоумножители (SiPM), показана надежная работа в условиях сильно переменного фона, проведена регистрация вспышек излучения в атмосфере Земли.

Таблица 1.

	ДУФ	ТУС	«УФ атмосфера»	«АУРА»		«КЛПВЭ»*	Фотометры системы RAIPS	
							RAIP-V	RAIP-L
Космический аппарат/обсерватория	«Вернов»	«Ломоносов»	МКС	«ВДНХ-80»	«ДЕКАРТ»	МКС	«Верхнетуломская»	«Ловозеро»
Временное разрешение	0,5 мс	0,8 мкс	2,5 мкс	1 с	10 мс	2,5 мкс	1 мс	1 мс
Угловое разрешение	—	10 мрад	10 мрад	—		1 мрад	20 мрад	10 рад
Диапазон длин волн	240–400 нм 600–800 нм	240–400 нм	240–400 нм	240–800 нм		240–400 нм	240–400, 337, 391, 430 нм	
Апертура	0,4 см ²	2 м ²	490 см ²	0,36 см ²	0,25 см ²	3 м ²	20 см ²	490 см ²
Число каналов	2	256	2304	4		~10 ⁵		
Поле зрения	16°	9°	40°	22,5°×45°	22,5°×90°	20°×15°	10°×10°	40°×10°
Возможные зарегистрированные явления	ТАЯ молнии УФ-фон Антропогенное свечение Внегрозовые УФ-вспышки	ШАЛ КЛ ПВЭ, ТАЯ, Молнии УФ-фон Внегрозовые УФ-вспышки ППС	ТАЯ, Молнии УФ-фон Внегрозовые УФ-вспышки	УФ-фон Молнии ТАЯ		ШАЛ КЛ ПВЭ, ТАЯ, Молнии УФ-фон Внегрозовые УФ-вспышки ППС	ППС, Молнии, ТАЯ, УФ-фон, метеоры, антропогенное свечение	
Публикации, содержащие описание аппаратуры, процедур тестирования и калибровок	A10–A13	A6, A9, A18, A19, A32, A33	A20, A21, A30, A37, A39	A27, A29		A7, A15, A31, A40, A44, A49	A38, A42	

* – эксперимент находится в стадии наземной подготовки.

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. **Во второй главе** описаны результаты наблюдения квазистационарного излучения атмосферы.

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.

Было показано, что свечение атмосферы в ближнем УФ-диапазоне структурировано по магнитной широте [A4]. Наблюдаются выделенные максимумы в низких ($\sim 20^\circ$), средних ($30\text{--}40^\circ$) и высоких ($>60^\circ$) широтах. Более детально структура свечения видна на распределении по L оболочкам. Наиболее протяженный максимум ($L > 5$) является свечением аврорального овала. При этом позже, по данным измерений УФ-свечения, было показано, что интенсивность, ширина области свечения и широтная структура зависят от геомагнитной активности. Во время мощной суббуревой активизации ($AE \sim 1000$ нТл) интенсивность увеличивается в 2 раза и появляется два пика, разнесенные на 10° по широте [A35]. В более низких широтах выделены максимумы в районе $L = 1,3, 1,8, 2,8, 4$ (в пересчете на высоту 100 км – 1,15, 1,6, 2,5, 3,6). Однако сравнение с регистрируемыми на том же космическом аппарате потоками высыпавшихся частиц в широком диапазоне энергий (70 кэВ–1 МэВ) показало, что этих потоков недостаточно для объяснения наблюдаемой интенсивности свечения в низких и средних широтах [A4].

Схожая картина структурированности УФ-излучения наблюдается и по результатам эксперимента на спутнике «Вернов». Однако более детальный анализ и сравнение с метеорологическими данными показал, что основное влияние на вариации УФ-излучения, даже при небольших фазах Луны (внешней освещенности атмосферы), оказывает облачный покров и антропогенная деятельность. На рис. 1 приведен пример измерений детектором УФ-излучения на спутнике «Вернов». Наблюдается очевидное совпадение максимумов интенсивности свечения с облачным покровом. Это означает, что, например, при планировании орбитальных измерений КЛ ПВЭ необходимо учитывать этот фактор при расчете экспозиции и в безлунные ночи. В эксперименте «УФ атмосфера» проведены детальные измерения облачных структур вдоль траектории полета МКС и показано, что в отсутствии лунного света они хорошо выделяются [A45].

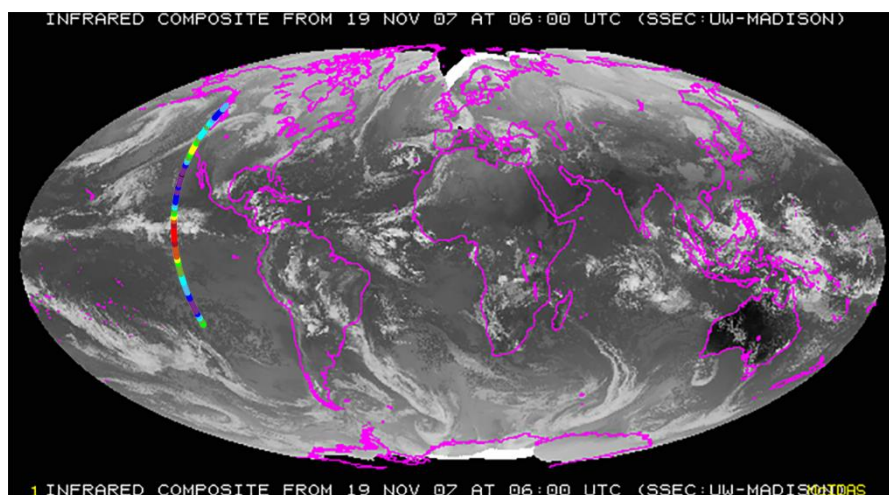


Рисунок 1 – Пример регистрации вариации УФ-свечения спутником «Вернов», связанной с облачностью в условиях малой фазы Луны.

При этом взаимосвязь потоков энергичных частиц и свечения атмосферы на средних широтах требует дальнейшего исследования более высокочувствительной аппаратурой, поскольку в некоторых измерениях, наблюдается одновременное увеличение как потоков заряженных частиц, так и УФ-излучения.

В **третьей главе** приведены результаты работы детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» с целью анализа работы орбитального телескопа КЛ ПВЭ, определения его экспозиции и типов регистрируемых транзитных событий, определяющих условия функционирования триггерной системы прибора.

В ходе проведения этого космического эксперимента не было зарегистрировано КЛ ПВЭ, однако, были решены две важные задачи, которые показывают работоспособность новой методики регистрации ШАЛ:

- 1) проведено исследование фоновых условий регистрации КЛ ПВЭ по флуоресцентному свечению ШАЛ с орбиты Земли;
- 2) 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» [А40] и РОЕММА [19, А31], 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.

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.

В рамках исследования квазистационарного сигнала было показано, что существенное повышение фона, сопровождающееся также и ложными срабатываниями,

наблюдается над областями активной антропогенной деятельности и грозовыми районами. Это приводит к тому, что время ожидания события (эффективное время работы прибора) уменьшается над континентами в 5–10 раз [А36]. Таким образом, 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. Распределение регистрируемых событий в эксперименте ТУС показано на рис. 2. Очевидно, что частота срабатывания триггерной системы связана с уровнем освещенности, основной вклад дают континенты (антропогенные источники и грозовая активность), также видно менее яркое свечение аврорального овала. Суммарная экспозиция детектора ТУС за время работы составила $\sim 1550 \text{ км}^2 \text{ ср год}$, а если учесть влияние облачного покрова, то она уменьшается до $\sim 880 \text{ км}^2 \text{ ср год}$.

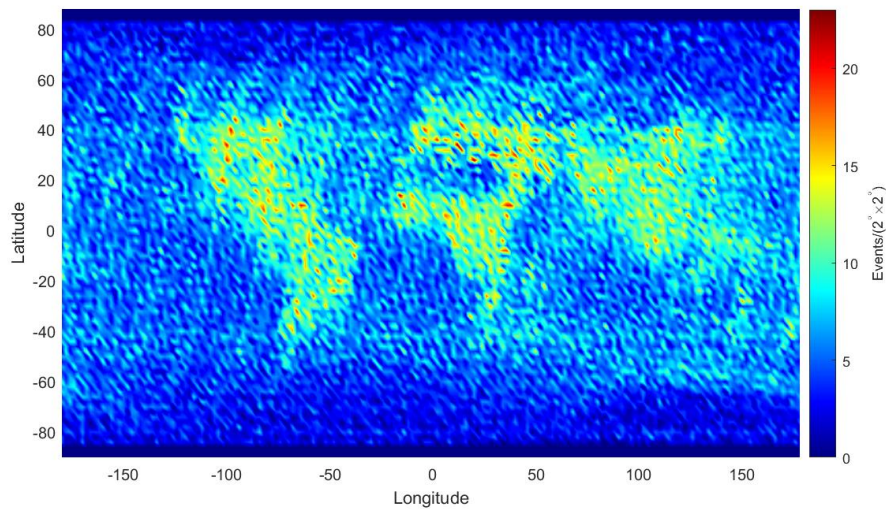


Рисунок 2 – Карта распределения интенсивности излучений атмосферы по данным детектора ТУС.

Аналогичные оценки экспозиции и эффективности триггерной системы КЛ ПВЭ были сделаны на основе измерений в проекте «УФ атмосфера».

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 = 2,5 мкс). Это значение можно отмасштабировать для детекторов КЛ ПВЭ, например, для JEM-EUSO или «КЛПВЭ» и оно составляет $(0,93 \pm 0,20)$ отсчета/пиксель/GTU. Таким образом, проведено уточнение фоновых условий регистрации КЛ ПВЭ на основе измерений аппаратурой, представляющей собой полноценный прототип экспериментов «КЛПВЭ», JEM-EUSO и РОЕММА.

К *транзиентному излучению атмосферы* 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 [A24, A26]. Мгновенные треки имеют резкий фронт сигнала (подъем до максимума за 1 такт измерения) и экспоненциальный спад, а сработавшие пиксели выстроены вдоль линии. Такие вспышки связаны с прямым попаданием энергичных частиц в фотоприемник. Об этом свидетельствует географическое распределение таких событий и явный широтный эффект, а также результаты моделирования, проведенные в GEANT4 [A14]. Мгновенные треки составили 14 % всех зарегистрированных на первом этапе работы детектора ТУС событий (первые 6 месяцев, май–ноябрь 2016 г.) [A16], после введения специального антитриггера, разработанного уже в процессе проведения эксперимента, остались лишь единичные события этого типа.

Монотонные вспышки – события с монотонным (в среднем) возрастанием яркости в большом количестве ячеек до максимума в конце развертки или вблизи него. Регистрация таких событий происходит вблизи с грозовыми областями [A26].

Высокоатмосферные явления типа ELVES представляют собой расширяющееся на высоте порядка 80–100 км кольцо, диаметр которого может достигать 400 км, а время развития – менее 1 мс. Подробнее этот класс явлений описан в главе 4.

Мощные внегрозовые вспышки – события, зарегистрированные над океаном вдали от районов грозовой активности, в которых наблюдались яркие пики сигнала в течение нескольких первых микросекунд [A24]. Некоторые из этих событий обладают послесвечением вслед за ярким пиком, перемещающимся в поле зрения с релятивистской скоростью [A23].

При анализе данных особое внимание было уделено классу так называемых ШАЛ-подобных событий с характерной длительностью кривой свечения около 100 мкс и заметным пространственным смещением пика сигнала («трека»).

Всего было отобрано шесть таких событий, которые все оказались зарегистрированы над сушей и 5 из них в районе действующих аэропортов, а реконструированные треки совпадают с направлением расположения взлетно-посадочных полос аэропортов [21]. Это свидетельствует о наиболее вероятной антропогенной природе вспышек.

Наиболее интересным является событие TUS161003, поскольку корреляции с антропогенным источником для него выявлено не было. Поэтому был проведен подробный анализ этого события, с точки зрения возможного его астрофизического происхождения. Кривая свечения данного события в целом аналогична флуоресценции ШАЛ, однако обладает двумя отличительными особенностями: малой глубиной максимума (не более 500 г/см^2) и энергией на порядок превышающей предел Грейзена–Зацепина–Кузьмина, см. рис. 3 [A28].

Это не позволяет поставить его в общий ряд со всеми имеющимися измерениями ШАЛ, в связи с чем была предложена астрофизическая интерпретация особенностей данного события на основе модели ливня, инициированного попаданием в атмосферу Земли релятивистской пылинки. При таком сценарии, при суммарной предельно высокой энергии первичного объекта, ливень развивается как N независимых ШАЛ (N – число нуклонов в пылинке) с энергией в районе ПЭВ. В этом случае глубина максимума ливня становится сравнительно малой, несмотря на большую энергию [A51].

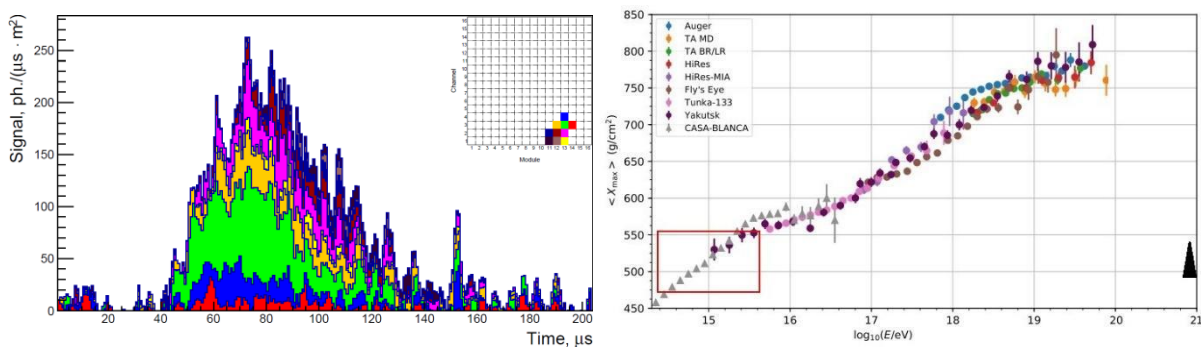


Рисунок 3 – Слева: кривая свечения события типа ШАЛ TUS161003, интенсивность в максимуме соответствует ШАЛ с энергией более 10^{21} эВ. На вставке показана карта каналов. Справа: зависимость глубины максимума ШАЛ от энергии по данным наземных установок. Треугольником показано событие TUS161003, красным квадратом область энергий в районе ПэВ.

В четвертой главе описаны результаты измерения транзientных явлений.

Транзientное свечение представлено низковысотными молниевыми разрядами облако-земля, внутриоблачными и межоблачными разрядами, высокоатмосферными транзientными световыми явлениями, внегрозowymi вспышками.

На спутниках «Университетский-Татьяна», «Университетский-Татьяна-2» и «Вернов» были изучены ТАЯ длительностью порядка 1–100 миллисекунд [A1, A3, A13]. Для каждого события ТАЯ проведена оценка энергии вспышек (суммарное число УФ-фотонов за время вспышки). Это позволяет построить распределение событий на карте Земли отдельно для разных энергий (чисел фотонов Q_a). Частота возникновения ТАЯ с большим числом фотонов ($Q_a > 5 \cdot 10^{23}$) представлена на рис. 4а. Очевидна связь с грозowymi районами и молниевой активностью. Интересно, что менее энергичные ТАЯ имеют более равномерное распределение по географической широте, часто встречаются в высоких широтах и регистрируются по одному (рис. 4б). Высокоэнергичные ТАЯ коррелируют с грозowymi областями и измеряются сериями вдоль траектории полета спутника (длительность серий до 15 минут [A17]).

На рис. 4в приведено распределение событий по числу фотонов (энергетическое распределение) для 8500 вспышек, зарегистрированных спутником «Вернов». Отдельно показано распределение для всех событий, коротких (длительность менее 3 мс) и длинных. Таким образом, мощность, выделяемая в одном событии, только в УФ-диапазоне может достигать сотен мегаватт, а полная электромагнитная энергия еще на порядок выше. Эти измерения позволили сделать первые оценки яркости событий для детекторов с большой апертурой, типа JEM-EUSO [A8]. Наиболее интенсивные события (серии ТАЯ) 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 [A48].

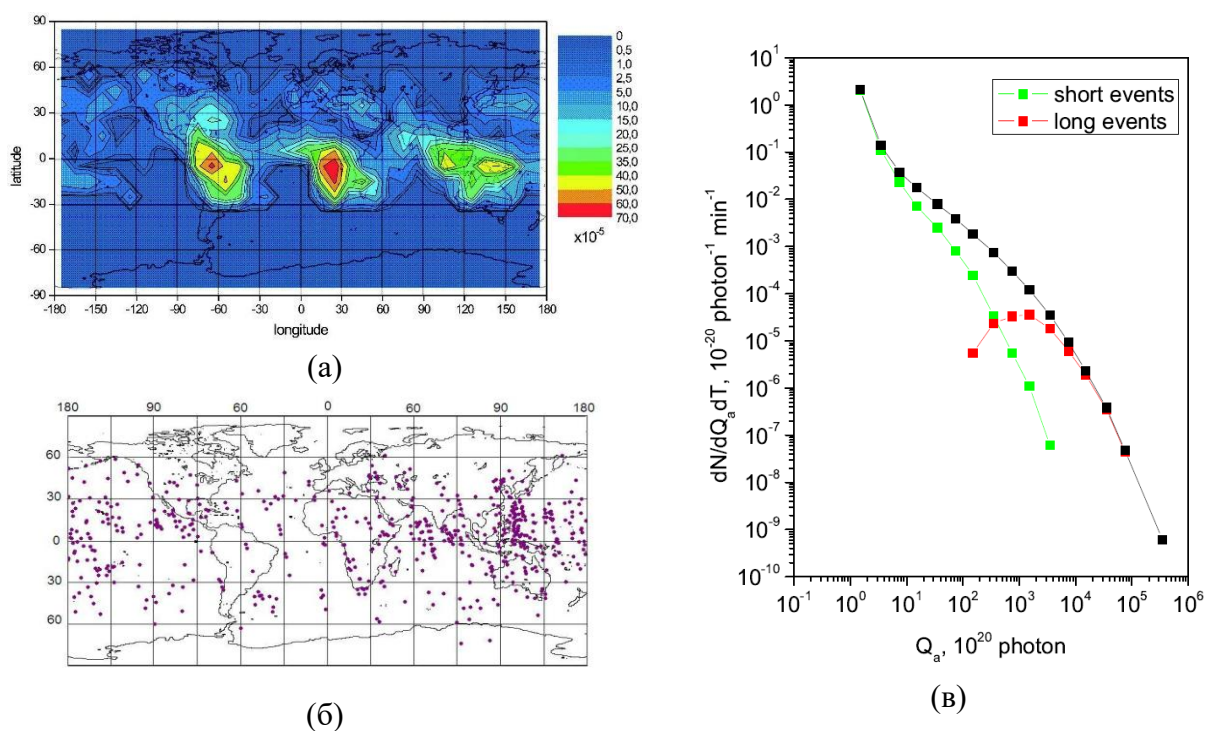


Рисунок 4 – (а): частота регистрации мощных ТАЯ детектором УФ-излучения на спутнике «Вернов», (б): карта зарегистрированных слабых одиночных вспышек, (в): распределение вспышек по числу фотонов (энергетический спектр).

Транзиентные атмосферные явления типа ELVES

ELVES представляют собой расширяющееся на высоте порядка 80–100 км кольцо, диаметр которого может достигать 400 км, а время развития – менее 1 мс. Этот тип ТАЯ является наиболее частым: по данным детектора ISUAL на спутнике FORMOSAT-2, частота ELVES по всему земному шару составляет в среднем 50 событий в минуту [9].

За время экспозиции детектора ТУС ожидалась регистрация нескольких десятков таких событий. Всего в экспериментальных данных было обнаружено 26 ELVES. Их легко распознать по характерному пространственно-временному профилю свечения. Одним из преимуществ детектора ТУС является наблюдение ELVES в надир, когда пространственно-временной паттерн регистрируемого изображения максимально прост. При этом в поле зрения попадает лишь дуга (часть кольца), а центр кольца указывает направление на молниевый разряд. На рис. 5 представлен пример регистрации события типа ELVES 23.08.2017 над Тихим океаном (8,03° с.ш., 131,34° з.д.). Приведены изображения в три момента времени, разнесенные на 32 мкс друг от друга.

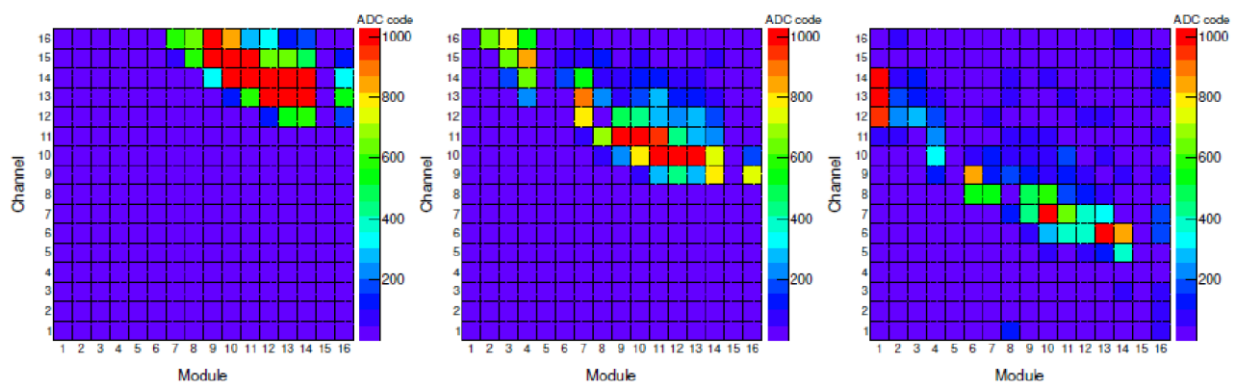


Рисунок 5 – Пример события типа ELVES, зарегистрированного детектором ТУС 23.08.2017. Изображения события (карты каналов фотоприемника) для трех последовательных моментов регистрации события (136 мкс, 168 мкс и 200 мкс от начала записи).

Яркость ELVES пропорциональна мощности молний (пиковому значению тока обратного удара). В процессе генерации ELVES обсуждается наличие порогового эффекта. Так, в работах [22, 23] 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. 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. 5, по данным наземной сети регистрации молнии Vaisala GLD360 [24] зарегистрировано 2 молнии со значениями тока обратно 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., и вовсе $-10,5$ кА.

Другими интересными объектами, зарегистрированными детектором ТУС, являются двойные и многократные ELVES. Ранее эти события регистрировались в наземных экспериментах [25]. Двойной ELVES – это вероятный отклик ионосферы на мощные компактные внутриоблачные разряды (КВР) [11], которые производят мощный электромагнитный импульс (ЭМИ). 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 задержкой около 50–60 мкс. Время задержки позволяет провести оценку высоты источника ЭМИ [A36, A50]. Для некоторых событий получены достаточно большие значения (>20 км), что довольно необычно, поскольку находится выше тропопаузы, однако подтверждается измерениями других групп [26, 27], но требует дальнейшего исследования.

УФ-транзиенты

Измерения в ближнем УФ и в красном каналах могут быть эффективно использованы для определения типа атмосферного явления или его высоты. Предложена методика оценки высоты вспышки по соотношению сигнала в красном и синем каналах в предположении спектра свечения молекулярного азота [A2, A5]. 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 зависит от высоты. На рис. 6 слева показана эта зависимость, пересчитанная в отношение фотоэлектронов, регистрируемых двумя каналами детектора ДУФ. Справа на том же рисунке показано экспериментально полученное распределение отношения для вспышек, зарегистрированных на спутнике «Вернов». Сопоставление этих данных, показывает характерную высоту основных вспышек: 50–65 км, причем более длинные вспышки расположены ниже и являются более «синими».

С другой стороны, чтобы показать вклад молниевых разрядов в это распределение, было произведено моделирование отклика детектора на характерные спектры молний [28] и модельный спектр спрайта [29], учитывающее рассеяние и поглощение в атмосфере, а также спектральные характеристики оптических и регистрирующих элементов аппаратуры. Показано, что отношение числа фотоэлектронов (P_e), регистрируемых детектором типа ДУФ для молниевых разряда, на порядок больше, чем для спрайта, и составляет $\sim 0,5$. Молнии дают вклад в правый хвост распределения, показанного на рис. 6.

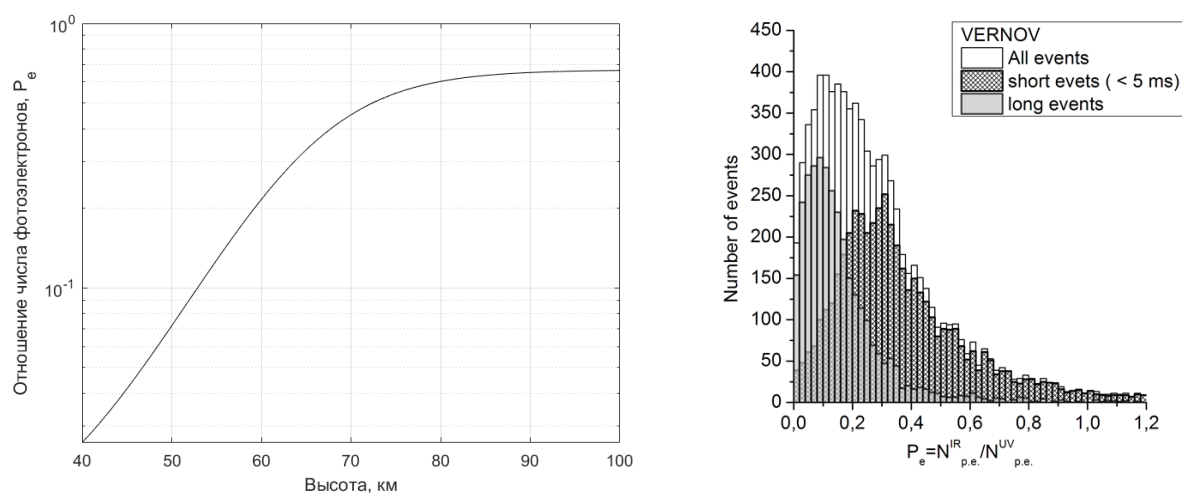


Рисунок 6 – Слева: Зависимость отношения P_e от высоты в атмосфере (расчет). Справа: Распределение вспышек по отношению P_e числа фотонов в красном диапазоне к числу фотонов в УФ-диапазоне для коротких вспышек (менее 5 мс), длинных и суммарная [A13].

Существенная доля событий на спектральных распределениях не имеет сигнала в красном канале. Эти события отнесены к отдельному классу УФ-вспышек (BLUES в иностранной литературе) и проанализированы отдельно. Вспышки происходят в грозовых районах, однако для 5 % этих событий не зарегистрировано молниевых разрядов наземными сетями WWLLN и Vasisala GLD360 [A17].

Внегрозовые УФ-вспышки

При обработке данных спутника «Университетский-Татьяна-2» было обнаружено, что события выстраиваются в длительные серии вдоль траектории движения космического аппарата, и эти серии могут существенно выходить за пределы грозовых областей или облачного покрова, где ожидается появление обычных молниевых разрядов и сопутствующих им высокоатмосферных транзиентов [A5].

Для вспышек, зарегистрированных спутником «Вернов», был осуществлен специальный поиск внегрозовых событий с использованием данных наземных сетей регистрации молний WWLLN и Vaisala GLD360 [A22]. Были отобраны 6 событий, которые отнесены к отдельному классу внегрозовых транзиентных атмосферных явлений, для которых 1) отсутствуют грозы и молнии по данным двух сетей WWLLN и Vaisala GLD360, 2) отсутствует облачный покров в поле зрения прибора по данным геостационарных спутников GOES из базы данных CLASS (Comprehensive Large Array-data Stewardship System, <https://www.class.ngdc.noaa.gov/saa/products/welcome>) и 3) незначительная доля сигнала в красном канале (вероятный вклад линии атомарного кислорода 777,4 нм молниевых разряда [28]).

Дополнительно для данных событий было проведено исследование грозовой активности в сопряженной точке геомагнитного поля с целью проверки гипотезы [30], связанной с проникновением заряженных частиц, ускоренных в грозовой области в сопряженной точке. Показано, что для этих событий отсутствует грозовая активность в момент регистрации и в магнитосопряженной точке, т.е. механизм, предложенный в работе [30], для этих событий исключен.

Ряд необычных событий [A23, A24], которые до сих пор не нашли объяснения, наблюдался в эксперименте ТУС и также рассмотрены в данной главе.

Возможное объяснение природы наблюдаемых УФ-вспышек дано в работе [31], где показано, что если в мезосфере могут возникать крупномасштабные области с низкой плотностью объемного заряда и низким порогом электрического пробоя, то происходят электрические разряды между заряженными областями, по своим временным и энергетическим характеристикам схожие с вспышками, регистрируемыми на спутниках МГУ. Высота генерации порядка 60–70 км и возникновение серий событий также объясняются в рамках этой модели.

В пятой главе описаны результаты наблюдения тонкой пространственно-временной структуры УФ-свечения в авроральной зоне на спутнике «Ломоносов» и результаты первых лет работы системы RAIPS.

Пульсирующие полярные сияния – это квазипериодические ($T \sim 2-20$ 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 [32–34].

Характерная высота пульсирующего свечения соответствует нижнему E-слою атмосферы и составляет около 90–110 км [35], что свидетельствует о том, что авроральные пульсации генерируются высыпанием электронов с энергией 1–10 кэВ [36]. Причиной этих

высыпаний считается взаимодействие магнитосферных электронов с электромагнитными ОНЧ-волнами [37, 38]. С другой стороны, в работе [39] 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 вплоть до высоты ~ 70 км [40, 41].

Высококчувствительные фотометры с миллисекундным временным разрешением являются эффективным инструментом для исследования пульсирующих полярных сияний. Пульсации УФ-свечения в полярной области, были зарегистрированы детектором ТУС 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 г. Был произведен отбор событий и анализ их пространственно-временной структуры, расположения относительно аврорального овала и геомагнитных условий в момент регистрации. За все время работы детектора ТУС на орбите было зарегистрировано около 10000 событий в режиме с временным разрешением 6,6 мс, среди которых обнаружено 66 событий с УФ-пульсациями [A35]. Вариации интенсивности свечения составляют 10–20 % относительно среднего уровня яркости аврорального свечения, частота пульсаций находится в диапазоне от 1 до 10 Гц. Пульсации расположены вдоль экваториальной границы аврорального овала в диапазоне широт от 52° с.ш. до 71° с.ш., 67 % событий зарегистрировано в области L-оболочек 4–6. Частота появления событий коррелирует с уровнем авроральной геомагнитной активности.

Эти события могут быть связаны с высокоэнергетической частью спектра высыпающихся электронов, вызывающих слабое пульсирующее излучение в авроральной области на высотах порядка 70 км. Для подтверждения этой гипотезы необходимы одновременные измерения УФ-пульсаций и потоков заряженных частиц.

На спутнике «Ломоносов» была реализована возможность одновременного наблюдения полярных сияний детектором ТУС и сопутствующих потоков энергичных частиц при помощи детектора ДЭПРОН (Дозиметр Электронов, ПРОтонов, Нейтронов) [42]. 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 – пиковые значения доходят до 1000 нТл.

Показано, что наблюдается два характерных случая: (1) положение УФ-события совпадает с максимумом потока частиц внешнего РПЗ (или находится между максимумом и полярной границей РПЗ), (2) увеличение потоков заряженных частиц появляется в области к полюсу от высокоширотной границы РПЗ, и УФ-пульсации совпадают с этим «выступом». На рис. 7 показаны примеры обоих типичных случаев.

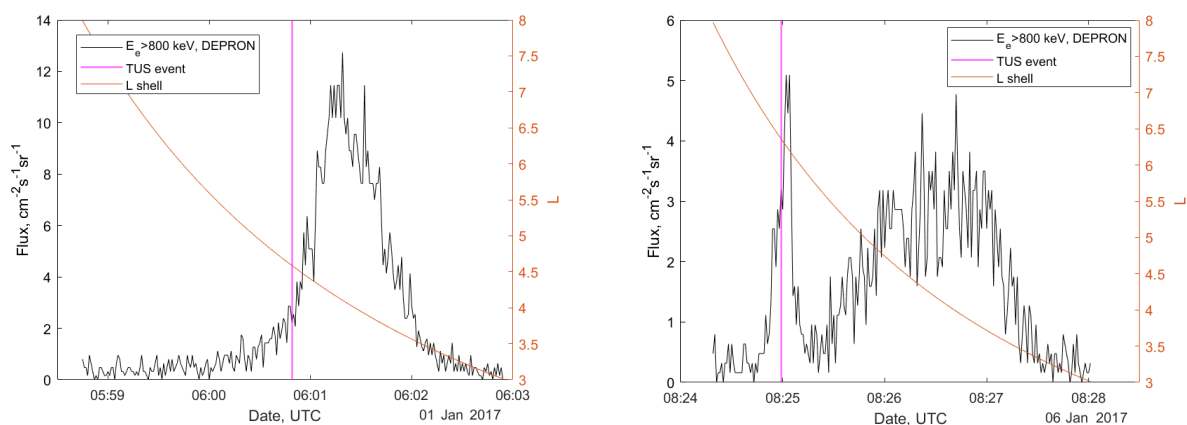


Рисунок 7 – Сравнение данных детекторов ТУС и ДЭПРОН.

Для второго промежутка времени (ноябрь 2017), когда ДЭПРОН был выключен, использовались данные космического аппарата «Метеор-М2». Геомагнитная обстановка была схожа с первым периодом наблюдений.

В качестве одновременных наблюдений детектором ТУС и приборами спутника «Метеор-М2» были выбраны моменты, когда они находились на той же L-оболочке, в пределах получаса времени полета. Всего было обнаружено 17 таких совместных наблюдений. Совместные измерения с детекторами энергичных частиц (> 100 кэВ) позволяют определить пространственное положение события относительно радиационного пояса Земли (РПЗ), а измерения потоков частиц низких энергий (менее 20 кэВ) дают возможность определить положение аврорального овала на момент регистрации события детектором ТУС.

На рис. 8 приведены примеры двух событий, зарегистрированных детектором ТУС, и измерения частиц на спутнике «Метеор-М2». 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. 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.

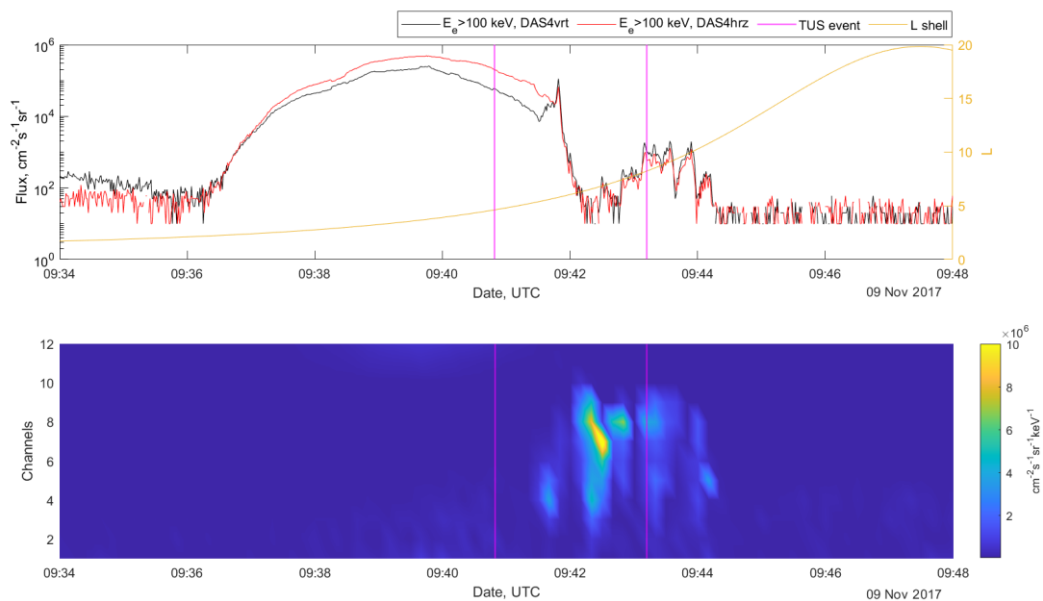


Рисунок 8 – Пример сравнения данных детектора ТУС и спутника «Метеор-М2». Сверху: измерения потока электронов высокой энергии ($E > 100$ кэВ) двумя ортогональными детекторами (вертикальным – vrt и горизонтальным – hrz). Снизу: измерения плазменного детектора, номера каналов соответствуют следующей средней 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.

В результате проведенного анализа сопоставления УФ-пульсаций с данными о потоках частиц показано, что [A41]:

- 1) УФ-пульсации наблюдаются во время длительной повышенной геомагнитной активности. В такие периоды активно формируются хоровые волны в магнитосфере Земли, которые связаны с активным питч-угловым рассеянием и ускорением электронов до релятивистских энергий [43];
- 2) во время регистрации пульсаций действительно наблюдаются повышенные потоки энергичных электронов по данным спутников «Метеор-М2» и «Ломоносов»;
- 3) во время некоторых событий с УФ-пульсациями наблюдается изотропизация потоков электронов с энергией > 100 кэВ, которая свидетельствует о высыпаниях этих частиц в атмосферу Земли.

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.

Дальнейшее развитие методики регистрации ППС осуществляется в рамках наземного эксперимента PAIPS – Pulsating Aurora Imaging Photometers System. В рамках этого проекта разработаны два изображающих фотометра в ближнем УФ-диапазоне (с возможностью проведения спектрометрических измерений). Один фотометр установлен в обсерватории «Верхнетуломская» ПГИ и проводит измерения с сентября 2021 года [A38].

Второй установлен в обсерватории «Ловозеро» ПГИ в 2023 году. Разнесенные на 150 км и обозревающие общую область атмосферы телескопы позволят производить стереометрические измерения пространственно-временных структур пульсирующих полярных сияний [A42].

В ходе первых двух лет работы одного фотометра проведены измерения временной структуры ППС с временным разрешением 1 мс. Для ряда случаев показано наличие внутренней частотной модуляции на фазе включено [A43]. Проанализированы данные спектрометра и 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, учитывающая изменяющееся во времени фоновое излучение атмосферы [A47]. Показано, что $R_{391/337}$ колеблется в районе от 2 до 3. Эти значения указывают на то, что роль электронов высоких энергий может быть недооценена в текущих теоретических моделях [44, 45].

Отсутствует явная зависимость отношения $R_{391/337}$ от времени, которую можно ожидать при существенном изменении спектра высыпавшихся 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 спектрометрическим измерениям, планируется прямое наблюдение вертикальной структуры свечения и оценка глубины проникновения и энергии, высыпавшихся при ППС, электронов, после установки второго телескопа, наблюдающего полярные сияния под углом к горизонту в направлении Верхнетулумской из обсерватории Ловозеро. Это позволит определить соответствие между энергетическим спектром частиц и соотношением излучения в линиях 337 нм и 391 нм.

Также предложена методика дальнейшего использования наземных и орбитальных флуоресцентных детекторов космических лучей высоких энергий для проведения исследований полярных сияний [A46].

В заключении сформулированы основные полученные результаты, представленные в диссертации.

- 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.
- 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.
- 6) Зарегистрированы события – кандидаты в ШАЛ. Энергия событий превышает разумные значения для частиц КЛ ПВЭ. Однако их регистрация позволила 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 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.
- 7) Обнаружен класс транзиентных атмосферных явлений в ближнем УФ-диапазоне, обладающих следующими характеристиками: распределение по энергии, выделяемой в ближнем УФ, лежит в диапазоне от 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, характеризующихся 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 (PAIPS) 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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wilson C. T. 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 R.C., Nemzek R.J., Winckler J.R. Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system // Science. — 1990. — Vol. 249, — No. 4964. — P. 48.
3. Su H. T., Hsu R. R., Chen A. B. et al. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere // Nature. — 2003. — Vol. 423. — P. 974–976.
4. Fukunishi H. et al. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere // Geophysical Research Letters. — 1996. — Vol. 23. — No. 16. — P. 2157–2160.
5. Fishman G. J., Bhat P. N., Mallozzi R., et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // Science. — 1994. — Vol. 264. — No. 5163. — P. 1313–1316.
6. Dwyer J. R., Smith D. M., Hazelton B. J., et al. Positron clouds within thunderstorms // Journal of Plasma Physics. — 2015. — Vol. 81. — No. 4. — P. 475810405.
7. Садовничий В. А., Панасюк М. И., Бобровников С. Ю. и др. Первые результаты исследований космической среды на спутнике Университетский-Татьяна // Космические исследования. — 2007. — Т. 45, № 4. — С. 291–305.
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. A. B. Chen, C.-L. Kuo, Y.-J. Lee et al. Global distributions and occurrence rates of transient luminous events // Journal of Geophysical Research (Space Physics). 2008. — Vol. 113. — P. A08306.
10. Gordillo-Vázquez F. J., Pérez-Invernón F. 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. 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.
12. Blake J. B. et al. Studies of relativistic electron injection events in 1997 and 1998 // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2001. — Vol. 106. — No. A9. — P. 19157–19168.
13. Yair Y., Price C., Ziv B. et al. Space shuttle observation of an unusual transient atmospheric emission // Geophys.Res.Lett. — 2005. — Vol. 32. — P. L02801.
14. Pierre Auger Collaboration 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.
15. Telescope Array Collaboration et al. Current status and prospects of surface detector of the TAx4 experiment // Proceedings of Science. — 2022. — Vol. 395. — Art. No. 203.

16. 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. — Art. No. 234.
17. Benson R., Linsley J. Satellite observation of cosmic ray air showers // 17th International Cosmic Ray Conference, Conference Papers. — 1981. — Vol. 8. — P. 145–148.
18. JEM-EUSO Collaboration et al. JEM-EUSO observational technique and exposure // *Experimental Astronomy*. — 2015. — Vol. 40. — P. 117–134.
19. Olinto A. V. et al. The POEMMA (probe of extreme multi-messenger astrophysics) observatory // *Journal of cosmology and astroparticle physics*. — 2021. — Vol. 2021. — No. 06. — Art.No. 007.
20. Johnstone A. D. Pulsating aurora // *Nature*. — 1978. — Vol. 274. — No. 5667. — P. 119–126.
21. Sharakin S., Hernandez O. I. R. Kinematics reconstruction of the EAS-like events registered by the TUS detector // *Journal of Instrumentation*. — 2021. — Vol. 16. — No. 07. — P. T07013.
22. Kuo C. L., Chen A. B., Chou J. K. et al. Radiative emission and energy deposition in transient luminous events // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2008. — Vol. 41. — No. 23. — P. 234014.
23. Barrington-Leigh C. P., Inan U. S. Elves triggered by positive and negative lightning discharges // *Geophysical Research Letters*. — 1999. — Vol. 26. — No. 6. — P. 683–686.
24. 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. D23.
25. Newsome R. T., Inan U. S. Free-running ground-based photometric array imaging of transient luminous events // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2010. — Vol. 115. — No. A7.
26. Nag A., Rakov V. A., Cramer J. A. Remote measurements of currents in cloud lightning discharges // *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. — 2010. — Vol. 53. — No. 2. — P. 407–413.
27. Smith D. A., Heavner M. J., Jacobson A. R. et al. A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records // *Radio Science*. — 2004. — Vol. 39. — No. 1. — P. 1–11.
28. Orville R. E., Henderson R. W. Absolute spectral irradiance measurements of lightning from 375 to 880 nm // *Journal of Atmospheric Sciences*. — 1984. — Vol. 41. — No. 21. — P. 3180–3187.
29. Milikh G., Valdivia J. A., Papadopoulos K. Spectrum of red sprites // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 1998. — Vol. 60. — No. 7-9. — P. 907–915.
30. 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. — No. A12. — P. 28841–28856.
31. Surkov V. V. 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.
32. Yamamoto T. On the temporal fluctuations of pulsating auroral luminosity // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 1988. — Vol. 93. — No. A2. — P. 897–911.
33. Scourfield M. W. J., Innes W. F., Parsons N. R. Spatial coherency in pulsating aurora // *Planetary and Space Science*. — 1972. — Vol. 20. — No. 11. — P. 1843–1848.

34. Royrvik O., Davis T. N. Pulsating aurora: Local and global morphology // *Journal of Geophysical Research*. — 1977. — Vol. 82. — No. 29. — P. 4720–4740.
35. Kataoka R., Fukuda Y., Uchida H. A. et al. High-speed stereoscopy of aurora // *Annales Geophysicae*. — 2016. — Vol. 34. — No. 1. — P. 41–44.
36. Turunen E., Verronen P. T., Seppälä A. et al. Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2009. — Vol. 71. — No. 10–11. — C. 1176–1189.
37. 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.
38. Kasahara S., Miyoshi Y., Yokota S. et al. Pulsating aurora from electron scattering by chorus waves // *Nature*. — 2018. — Vol. 554. — No. 7692. — P. 337–340.
39. Miyoshi Y., Saito S., Kurita S. et al. Relativistic electron microbursts as high-energy tail of pulsating aurora electrons // *Geophysical Research Letters*. — 2020. — Vol. 47. — No. 21. — Art. No. e2020GL090360.
40. Tesema F., Partamies N., Nesse Tyssøy H. et al. Observations of precipitation energies during different types of pulsating aurora // *Annales Geophysicae*. — 2020. — Vol. 38. — No. 6. — P. 1191–1202.
41. Miyoshi Y., Oyama, S., Saito, S. et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. — 2015. — Vol. 120. — No. 4. — P. 2754.
42. 78. Benghin V. V., Nechaev O. Y., Zolotarev I. A. et al. An experiment in radiation measurement using the DEPRON instrument // *Space Science Reviews*. — 2018. — Vol. 214. — P. 1–9.
43. Hajra R., Tsurutani B. T., Echer E. et al. 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 // *The Astrophysical Journal*. — 2015. — Vol. 799. — No. 1. — P. 39.
44. 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.
45. Marshall R. A., Xu W., Kero A. et al. Atmospheric effects of a relativistic electron beam injected from above: Chemistry, electrodynamics, and radio scattering // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2019. — Vol. 6. — C. 6.