

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В. ЛОМОНОСОВА**  
**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**  
**имени Д.В.Скобелева**

На правах рукописи

**МОРОЗЕНКО ВИОЛЕТТА СЕРГЕЕВНА**

**ФОНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НОЧНОЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПРИ**  
**ИЗМЕРЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО**  
**ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ ОРБИТАЛЬНОГО**  
**ДЕТЕКТОРА**

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2014

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

Научный руководитель:

**Хренов Борис Аркадьевич**  
доктор физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник  
отдела частиц сверхвысоких энергий  
НИИЯФ МГУ, Москва

Официальные оппоненты:

**Шаулов Сергей Борисович**  
доктор физико-математических наук,  
Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН,  
зав. лабораторией адронной астрофизики  
отдела космических излучений  
отделения ядерной физики и астрофизики, Москва

**Лидванский Александр Сергеевич**  
кандидат физико-математических наук,  
Институт ядерных исследований РАН,  
зав. лабораторией лептонов высоких энергий, Москва

Ведущая организация:

**Институт прикладной физики  
РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород**

Защита диссертации состоится «\_\_»\_\_\_\_20\_\_ г. в \_\_ час на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д501.001.77 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 5 («19-й корпус НИИЯФ МГУ»), ауд. 2 – 15.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке МГУ им. М.В. Ломоносова, Ломоносовском проспекте 27, Москва

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_20\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 501.001.77  
на базе МГУ им. М.В. Ломоносова,  
профессор

С.И. Страхова

## **Общая характеристика работы**

Одной из наиболее актуальных и интересных проблем астрофизики является происхождение космических лучей ультра высоких энергий (КЛ УВЭ) – с энергией  $E > 10^{19}$  эВ. Источниками, способными обеспечить ускорение космических лучей до столь высоких энергий, являются внегалактические объекты такие, как: ударные волны в струях, генерируемых активными ядрами галактик; сталкивающиеся галактики; гамма всплески, образующиеся при слиянии нейтронных звезд или черных дыр.

Происхождение космических лучей ультра высоких энергий может быть также связано с распадом топологических дефектов, возникших в первые мгновения расширения Вселенной. При взаимодействии частиц столь высоких энергий с веществом межзвездной среды рождаются высокоэнергичные фотоны и нейтрино, которые в силу своей нейтральности распространяются по прямым линиям, сохраняя направление на источник.

Таким образом, исследование таких высокоэнергичных объектов позволяет получать сведения, как о природе источников, так и о магнитных полях, встречающихся на пути частиц космического излучения к земле

**Цель диссертационной работы** состоит в оценке фоновых явлений при измерении космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) с помощью орбитальных детекторов флуоресценции атмосферы.

### **Актуальность темы**

Детекторы космического базирования имеют преимущество в сравнении с наземными детекторами по своей возможности наблюдения широких атмосферных ливней (ШАЛ) от КЛ ПВЭ на огромной площади в атмосфере. Однако, орбитальным детекторам предстоит работать в более сложных условиях свечения ночной атмосферы (ионосферы) по сравнению с наземными детекторами, создаваемыми в низкофоновых районах Земли. Развитие орбитальной техники подобного рода, способной обзирать огромные площади в атмосфере, важно также для мониторинга состояния

атмосферы в различных районах Земли и наблюдения фоновых явлений при регистрации КЛ ПВЭ таких, как транзиентные явления в верхней атмосфере.

Изучение фона свечения ночной атмосферы, проведенное в настоящем исследовании, имеет первостепенное значение для разработки первых детекторов космического базирования: «ГУС» (Трековая Установка, РФ с участием других стран), «КЛПВЭ» (детектор Космических Лучей Предельно Высоких Энергий, РФ с участием других стран), «JEM-EUSO» (Космическая обсерватория для изучения экстремальных явлений во Вселенной, международная коллаборация). Для исследования фона свечения ночной атмосферы в детекторах космического базирования были использованы специально созданные детекторы УФ, на микроспутниках «Университетский – Татьяна» и «Университетский–Татьяна-2». Детекторы УФ на этих спутниках наблюдали свечение атмосферы в диапазоне длин волн (240-400 нм, близком к диапазону, используемому для регистрации флуоресцентного трека ШАЛ, генерированного космической частицей в атмосфере (300-400 нм). На спутнике «Университетский-Татьяна-2» измерялась также интенсивность свечения атмосферы в «красном-инфракрасном, К-ИК» диапазоне (длины волн 600-1000 нм). Помимо средней интенсивности свечения атмосферы детекторы позволили измерять вспышки длительностью от долей миллисекунд до сотен миллисекунд. Изучение таких вспышек позволило оценить их роль в наблюдении космических частиц предельно высокой энергии с помощью орбитальных детекторов.

Результаты наблюдения атмосферных вспышек на спутниках «Университетский – Татьяна» и «Университетский – Татьяна-2» актуальны также в связи с исследованием их физической природы. Детекторы вспышек на спутниках «Университетский – Татьяна» и «Университетский – Татьяна-2» позволили продвинуть измерения в область ранее не изученных малых вспышек, с числом фотонов на два-три порядка менее, чем в известных из

других измерений транзитных атмосферных явлений (transient luminous events, TLE, в английской литературе).

**Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты диссертации:**

1. Получена глобальная карта излучения ночной атмосферы в безлунные ночи в полосе длин волн 240-400 нм. Показано, что минимальные интенсивности свечения ночной атмосферы наблюдаются над Южными частями Тихого и Индийского океанов, над пустынями Африки и Австралии, над Сибирью.

2. Получено распределение отобранных вспышек по числу фотонов, выделенных в атмосфере. Показано существование двух областей в этом распределении: вспышки с «малым» числом фотонов ( $Q < 10^{23}$ ) распределены по степенному закону с дифференциальным показателем «-1», вспышки с большим числом фотонов  $Q > 10^{23}$  распределены по степенному закону с показателем «-2». Полная энергия УФ излучения одной вспышки с числом фотонов  $10^{23}$  составляет кДж.

3. Получено распределение во вспышках отношения  $R$  числа фотонов в красной полосе длин волн (средняя длина волны 800 нм) к числу фотонов в УФ полосе длин волн (средняя длина волны 350 нм), что позволяет сделать вывод о большой высоте, на которой происходит излучение во вспышках: 50-80 км.

4. Получено глобальное распределение атмосферных вспышек. Показано, что атмосферные вспышки с большим числом фотонов  $Q > 10^{23}$  концентрируются в экваториальном районе над континентами, в то время, как вспышки с малым числом фотонов  $Q < 5 \cdot 10^{21}$  распределены более равномерно по широтам и долготам.

5. Получена оценка пороговой энергии и ожидаемой статистики КЛ ПВЭ, необходимая для разработки окончательной схемы управления детектором ТУС.

б. Промоделировано развитие сигнала от вспышки типа «эльф» в ячейках детектора ТУС при различных положениях источника относительно оси детектора. Показано, что разряд типа эльф не имитирует сигнал от ШАЛ.

#### **Личный вклад автора**

Автор разработала и создала математическое обеспечение обработки данных научной аппаратуры спутников «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2», с помощью которого была построена карта свечения ночной атмосферы при наблюдении с борта спутника в надир.

По программам, разработанным и созданным автором, воспроизводились осциллограммы сигнала атмосферных вспышек в детекторе УФ и детекторе К-ИК, которые отбирались электроникой детектора УФ вспышек по условию «самая большая вспышка УФ за минуту полета спутника». Данные осциллограмм позволили определить отношение числа фотонов в К-ИК диапазоне к числу фотонов в УФ диапазоне, как в целом по осциллограмме длительностью 128 мс, так и для коротких (1-5 мс) импульсов.

Автор провела сравнение распределения вспышек по числу фотонов с учетом разных условий работы детекторов при разных фазах луны.

Автор получила карты вспышек по атмосфере Земли для разных по числу фотонов вспышек, показала различие в их распределении.

Автор провела оценку роли вспышек при отборе событий ШАЛ, генерированных первичными частицами КЛ ПВЭ.

Автор провела оценку пороговой энергии и ожидаемой статистики КЛ ПВЭ для детектора ТУС.

#### **Научная новизна работы**

Впервые измерена глобальная карта свечения ночной атмосферы в диапазоне УФ с длинами волн 240-400 нм, используемом для наблюдения флуоресценции атмосферы, генерируемой частицами КЛ ПВЭ. Впервые в том же диапазоне длин волн в глобальном масштабе изучены вспышки в

атмосфере длительностью 1-100 мс, которые являются фоном в изучении частиц космических лучей предельно высоких энергий методом измерения флуоресценции атмосферы. Впервые проведён анализ временных характеристик и географического распределения атмосферных вспышек с «малым» числом фотонов в диапазоне УФ, на два-три порядка меньшем, чем число фотонов в транзиентных атмосферных явлениях – TLE, в которых число фотонов в атмосфере порядка более  $10^{23}$ . Именно эти, сравнительно неяркие вспышки, могут быть помехой в измерениях частиц КЛ ПВЭ, с числом фотонов флуоресценции порядка  $10^{16}$ .

Впервые выполнено моделирование сигнала малых атмосферных вспышек в детекторе ТУС- первом орбитальном детекторе КЛ ПВЭ и показана возможность выделения истинных событий флуоресцентного трека ШАЛ на фоне событий от атмосферных вспышек.

#### **Научная и практическая значимость работы**

Достигнута основная цель исследования: получены экспериментальные сведения о свечении ночной атмосферы и об атмосферных вспышках в диапазоне длин волн, используемых при регистрации флуоресценции атмосферы под воздействием КЛ ПВЭ. Экспериментальные измерения выполнены на спутниках с полярной орбитой, что позволило наблюдать свечение атмосферы по всему земному шару. Полученные экспериментальные данные непосредственно используются при подготовке у работе первого орбитального детектора ТУС. В частности, данные о средней интенсивности УФ свечения ночной атмосферы, измеренной по всему земному шару, используются для выбора первоначальных значений порога в системе управления и числа ячеек детектора, участвующих в отборе полезных событий. Оптимальный выбор этих значений позволяет ускорить процесс выхода детектора ТУС в рабочий режим автоматического управления от событий КЛ ПВЭ.

Важным результатом настоящей работы является получение экспериментальных данных об атмосферных вспышках (их длительности и

частоты) в УФ диапазоне длин волн. Наблюдаемая высокая частота этих вспышек указывает на их большую роль в срабатывании триггера детектора ТУС. Вместе с тем, подобные вспышки при регистрации детектором ТУС не закрывают возможности отбора полезных событий от частиц КЛ ПВЭ. Последние отличаются от атмосферных вспышек своей малой длительностью и пространственно-временным распределением сигнала в фотодетекторе ТУС.

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные о транзиентных атмосферных вспышках представляют значительный интерес для понимания физической природы этого явления. Вспышки с малым числом фотонов ранее не изучались с достаточной статистикой событий. Изучение вспышек с малым числом фотонов будет продолжено с помощью детектора ТУС, который позволит наблюдать не только временной профиль события, но и пространственное распределение фотонов в каждом из них.

#### **Апробация работы**

Автор лично представила свои результаты на международных конференциях ТЕРА 2010 (Армения, Ереван), AGU 2011 (США, Сан-Франциско), ТЕА-IS 2011 (Испания, Терремолинос), AGU 2012 (США, Сан-Франциско), ТЕРА 2012 (Россия, Москва), ECRS 2012 (Россия, Москва), ТЕРА 2013 (Армения, Ереван).

#### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 6 статей в журналах и 2 доклада в трудах конференций. Список статей приведён в конце автореферата.

#### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы.

#### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность темы. Формируется цель работы, её новизна и выносимые на защиту положения. Приведён краткий

обзор состояния физики космических лучей, основные результаты полученные на действующих или ранее используемых установках, а также основных проблем, связанных со спектром КЛ при ультравысоких энергиях – проблема ГЗК обрезания, поиском источников, ускоряющих частицы до сверхвысоких энергий, анизотропией прихода КЛ. Обосновывается необходимость создания орбитальных детекторов для регистрации КЛ ПВЭ, обладающих рядом преимуществ по сравнению с детекторами наземного базирования: равномерная экспозиция всего ночного неба, большая площадь обзора, а значит большая статистика. Однако, в этом случае, регистрация ШАЛ от КЛПВЭ усложняется наличием фоновых явлений в атмосфере Земли.

**В главе 1** приведено описание научной аппаратуры первого орбитального детектора ТУС на борту ИСЗ «Ломоносов».

**В разделе 1.1** описана работа оптической системы детектора ТУС (зеркала-концентратора), а также особенности работы блока электроники и фотоприёмника ТУС. Приведены основные параметры аппаратуры детектора, а также особенности системы отбора событий типа ШАЛ.

**В разделе 1.2** описаны параметры сигнала от ШАЛ в детекторе ТУС, а именно: длительность сигнала, количество фотонов в ячейках детектора.

Длительность сигнала ШАЛ в детекторе ТУС зависит от зенитного угла диска ливня  $\theta$ , а временной профиль трека ШАЛ повторяет каскадную кривую с максимумом.

В разделе приведены аппроксимационные формулы для расчета каскадной кривой ШАЛ, а также алгоритм перехода от фотонов флуоресценции выделенных в атмосфере от прохождения через неё КЛ ПВЭ к числу фотоэлектронов в фотоприёмнике детектора ТУС.

Данные детектора о величине и времени прихода сигнала в ячейки позволяют восстановить параметры первичной частицы, генерирующей ШАЛ. Вместе с тем перечисленные выше особенности сигнала ШАЛ позволяют выделить его на фоне других явлений ночной атмосферы, что

является предметом настоящего исследования.

**В главе 2** диссертации описаны методы исследования свечения ночной атмосферы с помощью орбитальных детекторов.

**В разделе 2.1** приведено подробное описание научной аппаратуры входящей в состав ИСЗ «Университетский – Татьяна – 1». Приведены основные параметры детекторов.

Приводится описание электроники детектора ультрафиолетового излучения (ДУФ). Особенности ДУФ: 1) коэффициент усиления ФЭУ определяется высоким напряжением на его делителях, которое управляется сигналом, отвечающим средней величине (за 1 с) анодного тока ФЭУ, привязанного к середине диапазона АЦП. При повышении среднего уровня освещённости атмосферы напряжение на ФЭУ и усиление автоматически снижаются. 2) используемые цифровые осциллографы позволяют измерять вариации интенсивности УФ фона с разным разрешением:  $t_{\text{ш}} = 1$  мкс, 16 мкс и 256 мкс.

Детектор УФ работает в двух режимах регистрации вариаций фона атмосферы: 1) мониторинг УФ – запись информации о медленных вариациях фона свечения атмосферы, количестве фотон/см<sup>2</sup>с ср происходит каждые 4 с при времени интегрирования 64 мс. 2) регистрация вспышек УФ – запись сигналов вспышек проводится с высоким временным разрешением (16 мкс, 256 мкс), что позволяет получить подробный временной профиль отобранных событий.

**В разделе 2.2** подробно рассмотрен принцип и режимы работы детектора ультрафиолетового (УФ, диапазон 300-400 нм) и красного излучения (К-ИК, 600-700 нм) на борту спутника « Университетский-Татьяна – 2»: измерение медленных вариаций фона ночной атмосферы, регистрация быстрых (от нескольких мс до сотен мс) всплесков УФ. Принципиальное отличие детектора УФ на спутнике «Университетский-Татьяна» (далее «Татьяна-1») и детектора УФиК на спутнике «Университетский-Татьяна-2»

(далее «Татьяна-2») состоит в наличии у последнего второго «окна» в красном – инфракрасном диапазоне излучения.

**В разделе 2.3** излагается алгоритм оценки полного количества фотонов, выделенных в УФ и ИК излучение во время вспышки в атмосфере.

Показано что временной профиль сигнала от вспышки можно аппроксимировать экспоненциальной функцией с характерным временем нарастания и спада сигнала. Зная временной профиль сигнала можно оценить полное числа фотонов в событиях с насыщением сигнала, как площадь под кривой.

Для событий, когда эффект насыщения сигнала не наблюдается, можно оценить, насколько отличаются истинные значения количества фотонов во вспышке, полученные суммированием за 128 мс количества фотоэлектронов в детекторе, и значения полученные в результате интегрирования формы профиля сигнала.

Разница в значениях полного числа фотонов, полученных двумя методами (суммирование и аппроксимация), оказалась не более 10%.

**В разделе 2.4** рассмотрен уточнённый алгоритм перехода от числа фотонов  $Q_a$  во вспышке к числу фотоэлектронов в детекторе УФ. Показано, что при пересчёте от числа регистрируемых фотонов (фотоэлектронов на катоде ФЭУ) к числу фотонов в источнике следует учитывать долю фотонов проходящих через оба отверстия коллиматора (входного и выходного), установленного на входе ФЭУ. Число фотонов на выходе коллиматора сильно зависит от положения источника, и быстро падает при увеличении зенитного угла. Зависимость доли числа фотонов, проходящих через оба отверстия коллиматора от угла  $\theta$ , вычисляется как зависимость площади пересечения кругов, образованных двумя отверстиями коллиматора от угла  $\theta$ .

**В главе 3** представлены результаты измерения средней интенсивности УФ и ИК в различных регионах Земли по данным спутников «Татьяна – 1, 2».

**В разделе 3.1** рассмотрены ожидаемые источниками УФ излучения ночной атмосферы:

- 1) Рассеянный свет Луны.
- 2) Собственное свечение атмосферы, связанное с рекомбинацией ионов в верхних слоях атмосферы.
- 3) УФ излучение, связанное с деятельностью человека (свет от городов).
- 4) УФ излучение от природных явлений, происходящих в атмосфере (полярные сияния).
- 5) УФ излучение при электрических разрядах в атмосфере (молнии, и разряды нового типа в верхней атмосфере), которое имеет короткую длительность (транзиентные явления в атмосфере).

В нижних слоях атмосферы главную роль в собственном свечении атмосферы играет флуоресценция молекул азота  $N_2$ , возбуждаемых заряженными частицами.

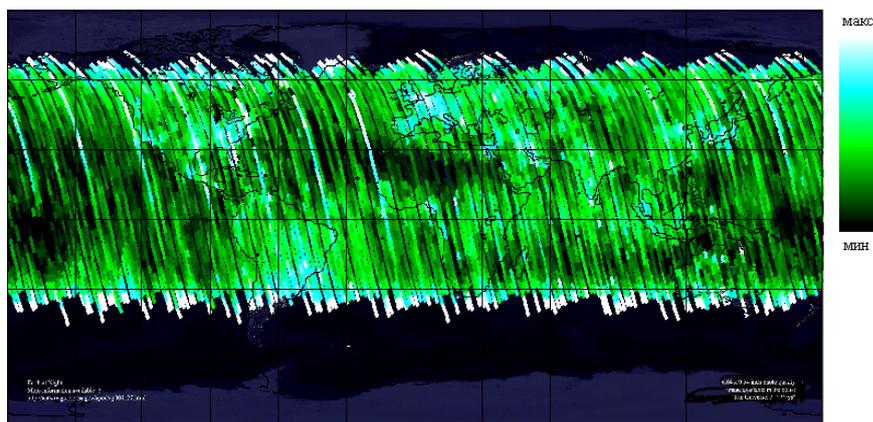
**В разделах 3.2 – 3.5** Приведены результаты измерения интенсивности свечения ночной атмосферы Земли в различных географических районах по данным спутников «Татьяна -1» и «Татьяна- 2».

Основные результаты:

- 1) Зарегистрировано повышение интенсивности свечения УФ при пересечении спутником области полярных сияний до  $\sim 10^9$  фотон/см<sup>2</sup>с ср, совпадающее с данными других экспериментов (раздел 3.2).
- 2) Зарегистрировано повышение интенсивности свечения фона УФ при пролёте спутника над крупными промышленными центрами до  $\sim 2 \cdot 10^8$  фотон/см<sup>2</sup>с·ср (раздел 3.3).
- 3) Получена зависимость интенсивности свечения атмосферы от фазы Луны, высоты луны над горизонтом, а также облачного покрова Земли. Показано, что в лунные ночи интенсивность УФ излучения атмосферы, в основном, обусловлена рассеянным лунным

светом. В течение лунного месяца среднее значение интенсивности УФ на витке спутника изменяется от  $10^8$  фотон/см<sup>2</sup>·с·ср при малых фазах и до  $\sim 2.5 \cdot 10^9$  фотон/см<sup>2</sup>·с·ср при полной Луне (раздел 3.4).

4) Получена глобальная карта интенсивности излучения ночной атмосферы в безлунные ночи в УФ диапазоне длин волн (рисунок 1). Показано, что минимальные интенсивности свечения ночной атмосферы наблюдаются над Южными частями Тихого и Индийского океанов, над пустынями Африки и Австралии, над Сибирью ( $\sim 6 \cdot 10^7$  фотон/см<sup>2</sup>·с·ср). Этот результат важен для планирования измерений космических лучей ультравысоких энергий по флуоресценции атмосферы на длинах волн 240-400 нм (раздел 3.5).



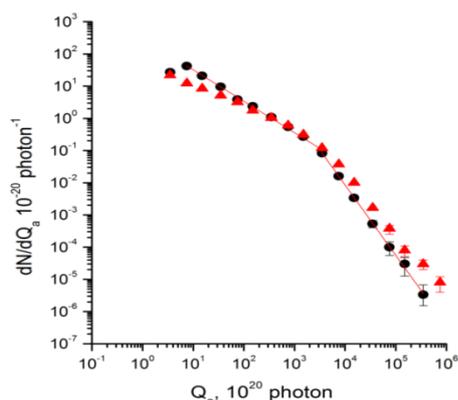
**Рисунок 1.** Карта УФ свечения атмосферы на трассе полёта ИСЗ «Университетский – Татьяна2». (безлунные ночи октября – декабря 2009, января 2010).

**В главе 4** приведены результаты измерения вспышек УФ и К – ИК излучения детекторами на спутниках «Татьяна-1» и «Татьяна-2».

**В разделе 4.1** представлены основные результаты регистрации вспышек УФ на спутнике «Татьяна-1»: географическое распределение, дифференциальное распределение по количеству фотонов во вспышке, значения параметров временного профиля сигнала от вспышки - время нарастания и спада сигнала, длительность событий.

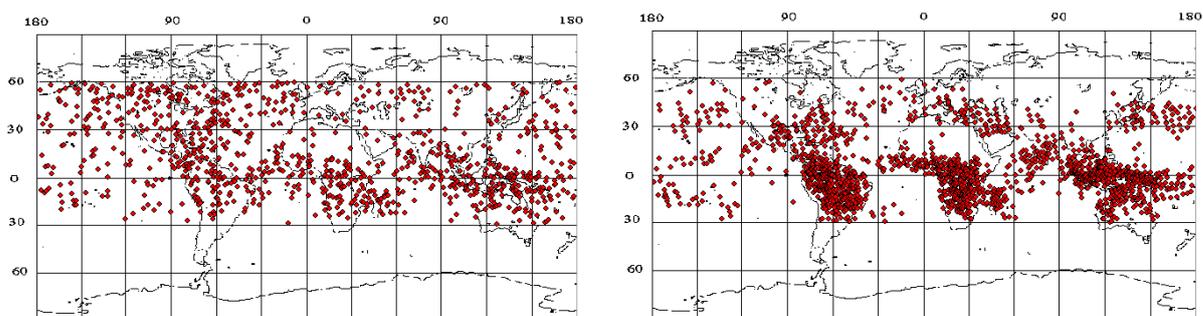
**В разделах 4.2 - 4.4** изложены результаты измерения атмосферных вспышек на спутнике «Татьяна – 2». Представлено дифференциальное и интегральное распределение вспышек по количеству фотонов выделенных в атмосфере (рисунок 2).

Анализ распределения отобранных вспышек показал существование двух областей в этом распределении: вспышки с «малым» числом фотонов ( $Q < 10^{23}$ ) распределены по степенному закону с дифференциальным показателем «-1», вспышки с большим числом фотонов  $Q > 10^{23}$  (полная энергия УФ излучения одной вспышки более 50 кДж) распределены по степенному закону с показателем «-2». Изменение показателя распределения вспышек при числе фотонов порядка  $10^{23}$  указывает на возможно разное происхождение «малых» и «больших» вспышек.



**Рисунок 2.** Дифференциальное распределение вспышек по числу фотонов. Кружки – измерение УФ излучения, треугольники – измерение К-ИК излучения.

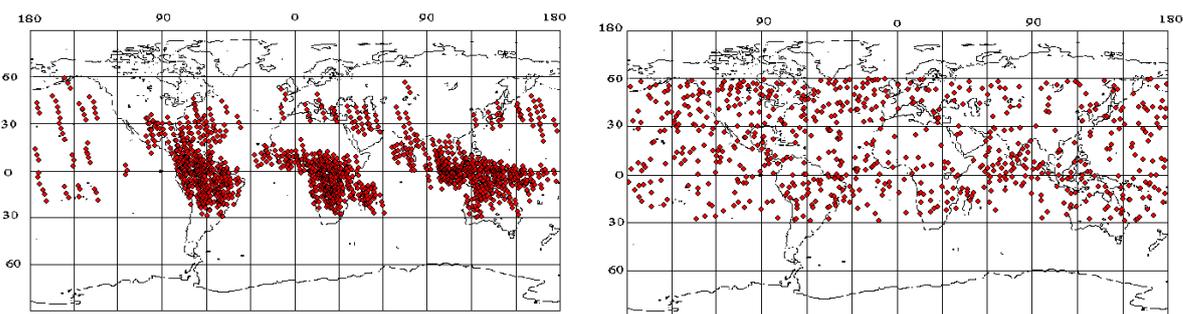
Приведено географическое распределение вспышек с разным количеством фотонов. Показано, что с ростом яркости, вспышки концентрируются к экватору над материками (рисунок 3). Учитывая, что спутник проводит над сушей ~ 60% от общего рабочего времени – частота наблюдения вспышек над океаном примерно в 4 раза ниже, чем над материками.



**Рисунок 3.** Карта распределения вспышек с разным числом фотонов:  $Q_a < 5 \cdot 10^{21}$  (слева),  $Q_a > 5 \cdot 10^{21}$  (справа).

Проведено сопоставление теоретических и экспериментальных данных по отношению количества фотонов выделенных в атмосфере во вспышке в К-ИК и УФ диапазонах длин волн. Полученное распределение отношений с максимумом в области  $P = 1 - 5$  позволяет сделать вывод о большой высоте, на которой происходит излучение во вспышках: 50 – 80 км, характерной для транзитных явлений в верхней атмосфере Земли.

Показано существование серий ежеминутных событий, с числом вспышек в серии от 3 до 15. Проведено сравнение распределения на карте Земли вспышек в сериях и одиночных вспышек (рисунок 4).



**Рисунок 4.** Географическое распределение вспышек в сериях (слева) и вспышек вне серий (справа).

Вспышки в сериях сосредоточены над континентами в районе экватора. Вспышки вне серий распределены не связаны с этими районами. Частота

событий в сериях достигает значений  $(50 - 70) \times 10^{-5}$  соб. км<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup> вблизи экватора над Южной Америкой, Африкой и Индонезией, в районах с максимальной грозовой активностью. Частота вспышек вне серий значительно ниже  $\sim 10^{-5}$  соб. км<sup>-2</sup> час<sup>-1</sup>.

**В разделе 4.6** приведён краткий обзор данных о транзиентных явлениях в атмосфере (ТАЯ), наблюдавшихся в других экспериментах. Характерные особенности ТАЯ: большая высота, большие пространственные размеры (сотни км), гигантская энергия ( $\sim 10 - 100$  кДж), маленькая длительность (<100 мс).

Рассмотрены некоторые предположения о возможных причинах наблюдения вспышек вне грозовых районов, наблюдения серий вспышек, а также излома распределения событий по количеству фотонов, выделенных в атмосфере.

**В главе 5** представлены результаты применения полученных в экспериментах Татьяна – 1,2 данных в измерениях космических лучей предельно высоких энергий с помощью орбитального детектора ТУС.

**В раздела 5.1** приведены ожидаемые оценки сигнала от полезного события, сигнала от шума в детекторе ТУС, а также ожидаемая экспозиция прибора в зависимости от уровня свечения атмосферы Земли.

Получены следующие результаты:

- 1) Оценка фонового свечения ночной атмосферы Земли в отдельных ячейках детектора ТУС.

Среднее число фотоэлектронов (ф.э.) в ячейках приёмника ТУС, генерируемое фотонами свечения ночной атмосферы, составляет «пьедестал», относительно которого колеблются значения числа ф.э. в тех интервалах времени, которые выбраны для наблюдения движения диска частиц ШАЛ.

Шум от свечения атмосферы Земли, на фоне которого будет происходить регистрация частиц ШАЛ, определяется как

среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  числа фотоэлектронов  $N_{\text{ф.э}}$  на фотокатоде ячейки для  $\tau = 12,8$  мкс от среднего значения, в предположении, что флуктуации числа фотоэлектронов описываются «нормальным» распределением.

В таблице 1 представлены значения  $\sigma$  для различных уровней свечения атмосферы, в районах Земли с минимальным и максимальным значением интенсивности свечения ночной атмосферы в безлунные ночи:  $J=6 \cdot 10^7$  фотон/см<sup>2</sup>с·ср ( $6 \cdot 10^5$  фотон/ м<sup>2</sup> ср·мкс) и  $J=2 \cdot 10^8$  фотон/см<sup>2</sup>с·ср ( $2 \cdot 10^6$  фотон/ м<sup>2</sup> ср·мкс) – над городами, над полярными сияниями. Там же представлено значение шума при полной луне в зените ( $2 \cdot 10^9$  фотон/ см<sup>2</sup> ср·с).

**Таблица 1.** Значения шума  $\sigma$  в зависимости от свечения ночной атмосферы  $J$ .

<b>J фотон/см<sup>2</sup>с·ср</b>	$6 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^9$
<b><math>N_{\text{ф.э}}(\text{ф.э})</math></b>	187	624	6247
$\sigma$	14	25	79

## 2) Оценка оптического сигнала ШАЛ в детекторе ТУС.

Количество фотонов от ШАЛ, на пути диска частиц, видимого в ячейке детектора (в м), рассчитывается по формуле:

$$I_s = N_{\text{max}}^e Y \zeta \frac{c}{1 + \cos \theta} \frac{\varepsilon S_{\text{mirr}}}{4\pi R^2} \quad (1)$$

где  $\zeta$  - прозрачность атмосферы Земли,  $S_{\text{mirr}} = 1,8 \text{ м}^2$  – площадь зеркала,  $N_{\text{max}}^e$  - количество электронов в максимуме ливня,  $Y = 4,7$  выход света флуоресценции на метр пути электрона,  $c$  – скорость света (в м/с),  $\varepsilon$  - коэффициент отражения зеркала,  $\theta$  - зенитный угол ливня,  $R$  – высота орбиты спутника.

Шум в ячейке, регистрирующей сигнал ШАЛ, зависит от выбранного

временного шага измерения. В системе отбора полезных событий выбран шаг 12,8 мкс и для него сигнал  $S$  равен  $S = I_s \rho \tau$  а шум  $\sigma$  зависит от интенсивности свечения атмосферы  $J$ . Соотношение сигнал/шум в ячейке детектора ТУС:

$$[S/\sigma(J)]_{\text{PMT}} = I_s \rho \tau / \sigma(J) \quad (2)$$

В таблице 3 представлена оценка отношения сигнала ШАЛ в максимуме развития ливня к шуму на фотокатоде отдельного ФЭУ в виде таблицы для ШАЛ с зенитным углом  $75^\circ$ , при среднем уровне свечения атмосферы земли  $J=10^8$  фотон/ см<sup>2</sup>с·ср в зависимости от энергии первичной частицы.

**Таблица 3.** Отношение сигнала к шуму на фотокатоде ФЭУ в зависимости от  $E_0$  для ШАЛ с  $\theta=75^\circ$

$E_0, \text{ЭэВ}$	100	150	200	250	300
$[S/\sigma]$	2,5	3,8	5,1	6,4	7,6

Сравнивая значения шума с сигналом ШАЛ можно грубо оценить пороговые значения энергии первичной частицы КЛ ПВЭ в различных условиях свечения ночной атмосферы.

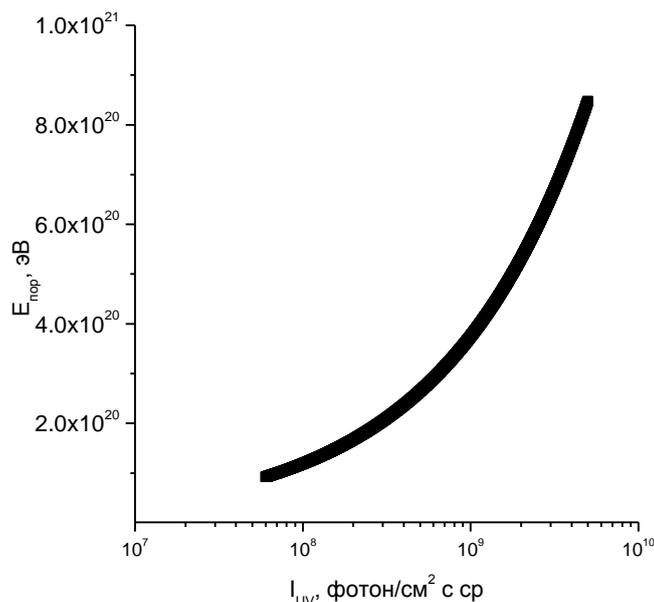
3) Оценка порогового значения энергии при регистрации КЛ ПВЭ детектором ТУС.

Принимая за пороговое значение  $E_{0\text{пор}}$ , при котором значения сигнала ШАЛ в максимуме значения превышают шум на уровне трёх сигма, получаем оценку  $E_{0\text{пор}}$  представленную в таблице 4. Поскольку энергетический спектр КЛ ПВЭ очень крутой (для энергий выше 50 ЭэВ показатель интегрального спектра около 4) , то очевидно, что большинство событий КЛ ПВЭ будет регистрироваться в районах с низкой интенсивностью свечения ночной атмосферы

**Таблица 4.** Пороговая энергия частиц КЛ ПВЭ в различных районах Земли в безлунные ночи и при полной луне.

<b>J, фотон/ см<sup>2</sup> ср с</b>	<b>σ, ф.э.</b>	<b>E<sub>пор</sub>, ЭэВ</b>
$3 \cdot 10^7$	10	65
$6 \cdot 10^7$	14	92
$2 \cdot 10^8$	25	167
$2 \cdot 10^9$	79	531

На рисунке 5 представлен график зависимости пороговой энергии регистрации КЛ ПВЭ детектором ТУС в зависимости от фона свечения ночной атмосферы Земли под детектором. Для удобства ось ОХ представлена в логарифмическом масштабе.



**Рисунок 5.** Пороговая энергия регистрации КЛ ПВЭ в зависимости от фона свечения ночной атмосферы Земли.

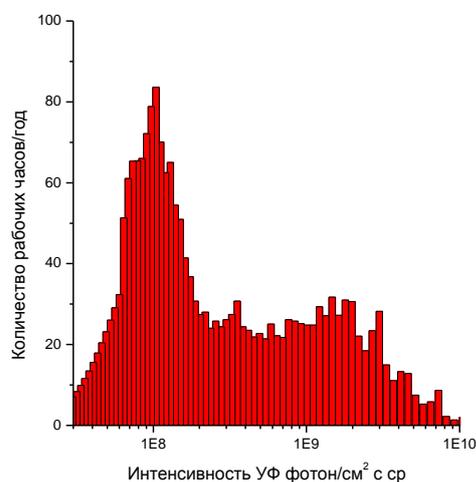
1) Оценка числа ожидаемых событий.

В таблице 5 и более подробно на рисунке 6 представлено ожидаемое количество для детектора ТУС рабочих ночных часов в год при различных интенсивностях атмосферы земли.

**Таблица 5.** Оценка ожидаемого количества рабочих часов детектора ТУС

<b>Интенсивность</b>	$3 \cdot 10^7 - 10^8$	$10^8 - 5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8 - 10^9$	$10^9 - 5 \cdot 10^9$
<b>Количество рабочих часов в год</b>	675	802	170	400

В таблице 6 представлено интегральное количество рабочих часов детектора ТУС, которое ожидается для различных значений пороговой энергии регистрации выше заданной.



**Рисунок 6.** Ожидаемое количество рабочих часов детектора ТУС в зависимости от интенсивности свечения атмосферы

**Таблица 6.** Интегральное количество рабочих часов для детектора ТУС.

<b>Е, ЭэВ</b>	60	90	150
<b>Количество рабочих часов/год (&gt;Е)</b>	2047	1860	980

Умножив геометрический фактор регистрации ШАЛ ( $S\Omega$ ) на количество часов работы для детектора ТУС при пороговой энергии выше заданной мы получим ожидаемое количество регистрируемых событий в год

при различных энергиях. Результат представлен в таблице 7 для ливней с зенитным углом  $< 60^\circ$  и  $> 60^\circ$ .

**В разделе 5.2** изложены результаты использования данных об атмосферных вспышках УФ при подготовке детектора ТУС к работе на борту спутника Ломоносов.

Проведена оценка количества фотонов в ячейке детектора, при котором наступает насыщение сигнала от ТАЯ в детекторе ТУС. Показано, что благодаря использованию в детекторе ТУС десятиразрядного АЦП, измеряющего сигнал каждую микросекунду, детектор ТУС сможет измерять изображение ТАЯ в событиях с малым числом фотонов вплоть до  $Q_a=5 \cdot 10^{22}$  (при минимальном фоне свечения атмосферы  $J$  фотон/см<sup>2</sup>с ср =  $6 \cdot 10^7$ ). Эти измерения в области ТАЯ с малым числом фотонов будут важны для объяснения природы этого явления, впервые выявленного в работе на спутнике «Гатьяна-2».

**Таблица 7.** Ожидаемое интегральное количество событий для детектора ТУС.

<b>E, ЭэВ</b>	<b>&gt; 60</b>	<b>&gt; 90</b>	<b>&gt; 150</b>
<b>Количество событий /год (&gt;E) <math>\theta &lt; 60^\circ</math></b>	39	3, 4	0, 09
<b>Количество событий /год (&gt;E) <math>\theta &gt; 60^\circ</math></b>	32	2,8	0,08

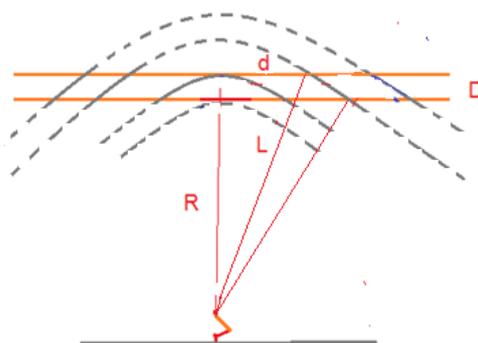
Транзиентные явления, энергия которых превышает пороговое значение насыщения, будут регистрироваться только на начальной стадии своего развития, до тех пор, пока количество фотонов в детекторе не превысит пороговое значение.

Сведения об изменении наклона распределения вспышек по числу фотонов в атмосфере при переходе от ярких вспышек  $Q_a > 10^{23}$  к неярким  $Q_a < 5 \cdot 10^{21}$ , а также изменение их географического распределения вызывают

особый интерес. Как показано выше, изучение таких вспышек до и после излома в распределении может быть продолжено с помощью детектора ТУС без насыщения сигнала в АЦП.

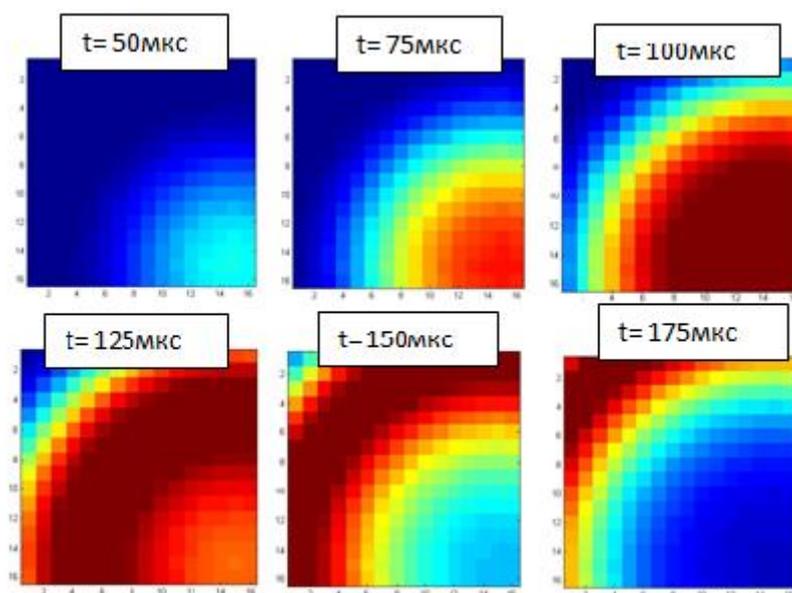
В разделе 5.2 также представлено описание элементарной модели разряда типа «эльф», возникающего под действием электромагнитного импульса (ЭМИ).

Распространяясь от источника (молнии) в нижней атмосфере в ионосферу ЭМИ ускоряет имеющиеся в ионосфере свободные электроны, которые возбуждают ионы молекул азота с их последующим излучением. Свечение эльфа начинается с момента  $t$ , когда ЭМИ достигает нижнего слоя ионосферы, расположенного по вертикали над источником, и далее распространяется по слою ионосферы в форме кольца с центром в этой же точке и радиусом  $d$ , зависящем от времени (рисунок 7).



**Рисунок 7.** Прохождение ЭМИ через слой ионосферы.  $R$ - радиус ЭМИ при первом проникновении в слой ионосферы,  $D$ -толщина слоя ионосферы,  $d$ - радиус «видимого» кольца свечения,  $L$ - радиус ЭМИ на стадии кольца.

На рисунке 8 представлен пример сигнала от моделированного разряда типа «эльф» в случае возникновения разряда на углу поля зрения детектора ТУС.



**Рисунок 8.** Развитие сигнала от разряда типа «эльф» в детекторе ТУС с центром на периферии поля зрения. Шаг по времени 25 мкс.

В отличие от события ШАЛ при измерении «эльфа» в течение короткого времени (25 мкс) сигналы появляются сразу на большом протяжении карты ячеек детектора, а затем это изображение «эльфа» изменяется гораздо медленнее движения одной точки события ШАЛ.

Показано, что даже в случае, если источник ЭМИ сдвинут относительно оптической оси детектора, короткий разряд типа эльф не имитирует сигнал от ШАЛ, имеющий в детекторе вид трека, образованного от последовательно срабатывающих друг за другом каналов детектора.

Сигналы от других типов TLE с большим числом фотонов и большей длительностью ещё сильнее отличаются от сигнала типа ШАЛ.

**В заключении диссертации** приведены основные результаты работы.

**Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах:**

- 1) Н. Н. Веденькин, А. В. Дмитриев, Г. К. Гарипов, П. А. Климов, В.С. Морозенко, И. Н. Мягкова, М. И. Панасюк, С.Н. Петрова, И. А. Рубинштейн, У. Салазар, С. И. Свертилов, В. И. Тулупов, Б. А. Хренов, В. М.

Шахпаронов, А.В. Широков, И.В. Яшин. УФ-излучение атмосферы и сопоставление вариаций его интенсивности с вариациями потоков электронов с энергиями  $> 70$  кэВ на орбите спутника (по данным ИСЗ «Университетский-Татьяна») Вестник МГУ, сер. 3 Физика Астрономия 2009 №4 с.89-93

2) В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, В.О. Барина, С. Ю. Бобровников, Н. Н. Веденькин, Н. А. Власова, Г. К. Гарипов, О.Р. Григорян, Т.А. Иванова, В. В. Калегаев, **В.С. Морозенко**, П. А. Климов, А. С. Ковтюх, С. А. Красоткин, Н. В. Кузнецов, С.Н. Кузнецов, Е. А. Муравьева, И. Н. Мягкова, Р. А. Ныммик, Н. Н. Павлов, Д.А. Парунакян, А.Н. Петров, В. Л. Петров, М. В. Подзолко, В. В. Радченко, С. Я. Рейзман, И. А. Рубинштейн, М. О. Рязанцева, Е. А. Сигаева, Э.Н. Сосновец, Л. И. Старостин, В. И. Тулупов, Б. А. Хренов, В. М. Шахпаронов, А. В. Широков, И. В. Яшин, В. В. Маркелов, Н. Н. Иванов, В. Н. Блинов, О. Ю. Седых, В. П. Пинигин, А. П. Папков, Е. С. Левин, В. М. Самков, Н. Н. Игнатьев, В. С. Ямников. Исследования космической среды на микроспутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» // Астрономический Вестник. 2011. №1. с.5 – 31.

3) Гарипов Г.К., П.А. Климов, **В.С. Морозенко**, Панасюк М.И., Хренов Б.А. Временные и энергетические характеристики УФ вспышек в атмосфере по данным спутника «Университетский-Татьяна» // Космические исследования. 2011. том. 49. №. 5. с. 391-398.

4) Атмосферные вспышки в ультрафиолетовом и красно-инфракрасном диапазонах по данным спутника «Университетский – Татьяна - 2 ». Н. Н. Веденькин, Г. К. Гарипов, П. А. Климов, В.В. Клименко, Е.А. Мареев, О. Мартинес, **В.С. Морозенко**, И. Пак, М. И. Панасюк, Е. Понсе, У. Салазар, В. И. Тулупов, Б. А. Хренов, И.В. Яшин // ЖЭТФ. 2011. том. 113. №. 5. с. 782-791.

5) G.K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, **V.S. Morozenko**, M. I. Panasyuk, S.N. Petrova, V.I. Tulupov, V.M. Shahparonov, N.N. Vedenkin, I.V.

Yashin, J.A. Jeon, S.M. Jeong, A. Jung, J.E. Kim, W.S. Kim, J. Lee, H.Y. Lee, G.W. Na, S.W. Nam, S.J. Oh, I.H. Park, J.H. Park, J.Y. Jin, M. Kim, Y.K. Kim, B.W. Yoo, Y.-S. Park, H.J. Yoo, C.H. Lee, H. Salazar, O.B. Martinez, E.L. Ponce, J.P. Cotsoni. Program of transient UV event research at Tatiana-2 satellite // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JA014765.

6) P. Klimov, G. Garipov, N. Kalmykov, **V. Morozenko**, M. Panasyuk, S. Sharakin, A. Shirokov, I. Yashin. Status of UHECR orbital fluorescence detector TUS. Proc. 12th ICATTP Conf. Italy. V.6, 2011.

7) B.A. Khrenov, M.I. Panasyuk, G.K. Garipov, N.N. Kalmykov, P.A. Klimov, **V.S. Morozenko**, S.A. Sharakin, A.V. Shirokov, I.V. Yashin, S.V. Biktemerova, A.A. Grinyuk, D.V. Naumov, L.G. Tkachev, A.V. Tkachenko, O.A. Saprykin, A.A. Botvinko, I. Park, J. Lee, G. Na, O. Martinez, H. Salazar, E. Ponce. Pioneering space based detector for study of cosmic rays beyond GZK Limit. UHECR 2012 – International symposium of future direction in UHECR physics, EPJ Web of Conferences, 2013. V. 53.

8) G. K. Garipov, B.A. Khrenov, P.A. Klimov, V.V. Klimenko, E.A. Mareev, O. Martines, E. Mendoza, **V.S. Morozenko**, M.I. Panasyuk, I.H. Park, E. Ponce, L. Rivera, H. Salazar, V.I. Tulupov, N.N. Vedenkin, I.V. Yashin. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. № 2. p. 370-379