

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д. В. Скобельцына

На правах рукописи

Климов Павел Александрович

ОРБИТАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПРЕДЕЛЬНО  
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 01.04.23 – физика высоких энергий

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва  
2009

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

Научный руководитель:

**Хренов Борис Аркадьевич**  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ

Официальные оппоненты:

**Кузьмичёв Леонид Александрович**  
доктор физико-математических наук,  
НИИЯФ МГУ

**Лубсандоржиев Баярто Константинович**  
кандидат физико-математических наук,  
ИЯИ РАН

Ведущая организация: **Институт космофизических исследований и аэронауки СО РАН, г. Якутск**

Защита диссертации состоится « 19 » июня 2009г. в 15 час. на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77 при Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова по адресу: 119992, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. стр. 5 (“19-й корпус НИИЯФ МГУ”), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИЯФ МГУ.

Автореферат разослан « 07 » мая 2009 г.

Учёный секретарь совета по защите

докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.77

профессор

Страхова С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Изучение спектра космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) имеет фундаментальное значение для теоретической и экспериментальной астрофизики. Ещё в 60-х годах 20 века было предсказано наличие обрезания спектра при энергиях свыше  $5 \cdot 10^{19}$  эВ, как следствие взаимодействия частиц с реликтовым излучением (предел Грейзена-Зацепина-Кузьмина). Однако, эксперименты, направленные на изучение спектра в этой области энергий дали противоречивые результаты. Наличие частиц с энергией выше ГЗК-предела, с одной стороны, стимулирует поиски близких источников (в радиусе  $\sim 100$  МПк), которые были бы способны ускорять частицы до столь больших энергий, и моделирование процессов ускорения в этих астрофизических объектах (активных ядрах галактик, пульсарах, скоплениях галактик), а с другой стороны, открывает возможности теоретических исследований, связанных с совершенно другими механизмами приобретения энергии частицами во Вселенной (распады сверхмассивных частиц, топологические дефекты).

В течение длительного времени КЛ ПВЭ изучаются наземными детекторами, среди которых российская установка в Якутске, установки AGASA, HiRes. При этом исследования КЛ ПВЭ осложнены очень низкой частотой прихода частиц, что требует создания наземных установок с большой площадью для увеличения статистики. Наибольшая из современных наземных установок Pierre Auger Observatory, обладает общей площадью  $3000 \text{ км}^2$ . Дальнейшее увеличение площади наземных установок нецелесообразно, к тому же, детектор, расположенный на земле, обладает рядом недостатков, в частности не полным обзором небесной сферы и неравномерностью экспозиции.

Другой путь – изучение КЛ ПВЭ по флуоресцентному треку широкого атмосферного ливня (ШАЛ) с борта искусственного спутника Земли. Такой детектор обладает большой площадью обзора, равномерностью экспозиции по

всему небу, не требует больших площадей на поверхности Земли. Создание таких детекторов является **актуальной** экспериментальной задачей современной физики космических лучей. Пионерский детектор такого типа, «Трековая Установка» («ТУС»), создаётся в НИИЯФ МГУ.

В данной работе приведены результаты разработки, моделирования, создания и тестирования первого лабораторного образца орбитального детектора КЛ ПВЭ «ТУС».

### **Цель работы**

При выполнении работы автором ставились следующие цели:

- 1) Разработка, создание и тестирование работы лабораторного макета фотоприёмника орбитального детектора КЛ ПВЭ «ТУС».
- 2) Моделирование и оптимизация параметров оптической системы детектора «ТУС».
- 3) Оценка эффективности работы орбитального детектора, порогов регистрации частиц, экспозиции, углового разрешения.
- 4) Изучение ультрафиолетового (УФ) свечения ночной атмосферы, как важного параметра, определяющего условия функционирования орбитального детектора КЛ ПВЭ «ТУС».

### **Основные результаты, полученные в диссертации**

1. По данным спутника «Университетский-Татьяна» получена карта интенсивности УФ свечения ночной атмосферы Земли и географическое распределение быстрых вспышек УФ. На основе этих данных произведены оценки УФ фона в будущих измерениях космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) детектором «ТУС».
2. Создан и испытан лабораторный макет фотоприёмника орбитального детектора «ТУС» из 16 ячеек. Разработано программное обеспечение логического блока электроники, позволяющее эффективно регистрировать и отбирать события КЛ ПВЭ.

3. Проведено полное моделирование работы орбитального детектора частиц КЛ ПВЭ, получена эффективность регистрации частиц КЛ ПВЭ при различных первичных энергиях и при различных значениях интенсивности фонового излучения атмосферы. Проведена оценка рабочей экспозиции детектора при различных энергетических порогах детектора. Предложенная методика измерений при различных фазах луны позволяет вдвое увеличить время экспозиции по сравнению с другими аналогичными приборами для частиц с энергией больше  $3 \cdot 10^{20}$  эВ.
4. Разработана и оптимизирована стратегия изучения глобальной анизотропии распределения источников КЛ ПВЭ с помощью орбитального детектора.
5. Разработана модель работы детектора со следящим зеркалом-концентратором и использованием матрицы фотоприёмника с переменным размером ячейки, и показано, что детектор такого типа позволит улучшить соотношение сигнал-шум в измерениях КЛ ПВЭ в два раза и повысить на порядок точность определения направления прихода первичной частицы в будущих экспериментах.

### **Научная новизна работы**

Создан **первый** лабораторный макет орбитального детектора «ГУС», разработаны оригинальные программы и алгоритмы работы электроники, нацеленной на регистрацию ШАЛ. Проведено тестирование работы лабораторного макета, и показана надёжность и эффективность функционирования.

В диссертации **впервые** проведено моделирование работы, оценка эффективности, энергетических порогов и экспозиции орбитального детектора КЛ ПВЭ с учётом **новейших** данных об УФ излучении ночной атмосферы, полученных спутником «Университетский-Татьяна». Рассмотрено функционирование детектора во всём диапазоне изменения интенсивности УФ

свечения ночной атмосферы Земли, и показано, что предложенный режим работы детектора с энергетическим порогом  $3 \cdot 10^{20}$  эВ при всех фазах луны позволяет получить экспозицию вдвое больше по сравнению с детектором, работающим только в безлунные ночи. Показано преимущество орбитального детектора перед наземными установками.

Детектором УФ излучения на борту спутника «Университетский-Татьяна» проведены первые орбитальные измерения свечения ночной атмосферы Земли с длиной волны 300-400 нм в столь широком динамическом диапазоне ( $10^6$ ) и в разных временных масштабах. Эти измерения позволили производить мониторинг средней интенсивности свечения и регистрацию транзитных световых явлений (0,1 – 100 мс). В работе приведены результаты обработки данных спутника «Университетский-Татьяна». Изучены медленные вариации УФ излучения и диапазон изменения интенсивности, а также вспышечные явления в верхних слоях атмосферы, которые могут быть как фоновым явлением для детектора КЛ ПВЭ, так и объектом специального исследования. Показана надёжность и достоверность результатов детектора УФ, путём сравнения с данными других спутниковых экспериментов.

Предложен алгоритм работы и **впервые** произведено моделирование следящего зеркала-концентратора для будущего орбитального детектора КЛ ПВЭ с использованием матрицы фотоприёмника с переменным размером ячейки, что позволяет улучшить соотношение сигнал-шум в два раза и повысить на порядок точность определения направления прихода первичной частицы.

### **Практическая ценность работы**

Созданный при выполнении данной работы лабораторный образец фотоприёмника является основой электроники орбитального детектора «ТУС». Разработанные программы и алгоритмы регистрации, обработки и записи событий войдут в состав программного обеспечения системы отбора ШАЛ орбитального детектора «ТУС». Данные алгоритмы обеспечивают высокую

эффективность отбора событий и могут быть использованы при создании последующих детекторов такого типа (проект «КЛПВЭ»).

Результаты моделирования работы следящего зеркала-концентратора показали эффективность использования подобной быстрой адаптивной оптики в орбитальных детекторах КЛ ПВЭ. Предложенная схема прибора позволит понизить порог регистрации ШАЛ, увеличить статистику набора событий, улучшить угловое разрешение прибора. Работа проведена по инициативе Research Center of MEMS Space Telescope (Корея). Результаты предназначены для создания орбитального детектора КЛ ПВЭ нового типа: MEMS Space Telescope. Разработанные алгоритмы управления следящим зеркалом уже успешно используются в детекторах транзитных атмосферных явлений, основанных на адаптивной MEMS оптике (телескоп MTEL на борту спутника «Татьяна-2»).

Результаты анализа измерений УФ излучения ночной атмосферы Земли, произведённых на спутнике «Университетский-Татьяна» в широком временном диапазоне (от быстрых вспышек до медленных вариаций) и широком энергетическом диапазоне (энергии в УФ излучении от 10 кДж до нескольких МДж) позволяют:

- 1) Оценить фон УФ излучения атмосферы и влияние транзитных явлений на измерения флуоресценции ШАЛ.
- 2) Проектировать детекторы ШАЛ с учетом частоты, энергии и пространственной структуры транзитных атмосферных явлений.
- 3) Развивать модели процессов возникновения электрических разрядов в верхних слоях атмосферы и проверять их достоверность в сравнении с полученными экспериментальными данными.

#### **Личный вклад автора**

Автором было проведено полное компьютерное моделирование работы оптической системы детектора «ТУС» (зеркала концентратора различных типов и световодов фотоприёмника). Обработка данных спутника «Университетский-Татьяна» по УФ фону ночной атмосферы Земли проводилась с помощью

программ, написанных автором работы. Решающий вклад автора в создании и тестировании лабораторного макета фотоприёмника детектора «ТУС», включая разработку электроники и программного обеспечения.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов диссертации обусловлена:

- использованием корректных методов исследования, применением моделей, основанных на современных представлениях развития ШАЛ. Данные расчетов продольного развития ШАЛ и флуоресцентного излучения основного потока частиц ШАЛ подтверждены современными экспериментальными данными наземных установок;
- сравнением полученных автором экспериментальных данных спутника «Университетский-Татьяна» о фоновом УФ свечении ночной атмосферы с результатами других экспериментов.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались на Международной конференции по космическим лучам (Merida, Mexico, 2007 г.), Всероссийской конференции по космическим лучам (Санкт-Петербург, 2008 г.), UNIVERSAT-2006 (Москва, 2006 г.), UNIVERSAT-2007 (Тайвань, 2007 г.), Международный гелиофизический год 2007 (Звенигород, 2007 г.), International workshop “YongPyong Astrophysics-2008” (Корея, 2008 г.), Ломоносовских чтениях (2004 – 2008 гг.), Школе молодых учёных «Гелиосфера и галактика» (Румыния, 2007 г.), Баксанской школе молодых учёных (2004 г.)

### **Публикации по теме диссертации**

1. В. А. Садовничий, М. И. Панасюк, С. Ю. Бобровников, Н. Н. Веденькин, Н. А. Власова, Г. К. Гарипов, О. Р. Григорян, Т. А. Иванова, В. В. Калегаев, **П. А. Климов**, А. С. Ковтюх, С. А. Красоткин, Н. В. Кузнецов, С. Н. Кузнецов, Е. А. Муравьева, И. Н. Мягкова, Н. Н. Павлов, Р. А. Ныммик, 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, А. В. Суханов, В. И. Тулупов, Б. А. Хренов,

- В. М. Шахпаронов, В. Н. Шевелева, 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  
Первые результаты исследования космической среды на спутнике «Университетский-Татьяна». // Космические исследования 2007, т.45, №4, с. 291-305.
2. O.E. Kalashev, B.A. Khrenov, **P. Klimov**, S. Sharakin, S.V. Troitsky, Global anisotropy of arrival directions of ultra-high-energy cosmic rays: capabilities of space-based detectors, JCAP03 (2008) 003, arXiv:0710.1382.
  3. V. Abrashkin, V. Alexandrov, Y. Arakcheev, J. Cotzomi, A. Diaz, M. Finger, G. Garipov, V. Grebenyuk, N. Kalmykov, B. Khrenov, S.H. Kim, **P. Klimov**, V.Koval, O. Martinez, S.W. Nam, D. Naumov, A. Olshevsky, M. Panasyuk, I.H. Park, J.H. Park, E. Ponce, A. Puchkov, C. Robledo, A. Rosado, I. Rubinstein, S. Sharakin, A. Silaev, L. Tkatchev, V.Tulupov, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, L. Villasenor, I. Yashin, N. Zaikin. Updated TUS space fluorescence detector for study of UHECR. // Advances in Space Research 2008, 41, p. 2079–2088.
  4. V. Abrashkin, V. Alexandrov, Y. Arakcheev, A. Cordero, J. Cotzomi, M. Finger, G. Garipov, V. Grebenyuk, N. Kalmykov, B. Khrenov, **P. Klimov**, V.Koval, O. Martinez, E. Moreno, D. Naumov, A. Olshevsky, M. Panasyuk, I. Park, E. Ponce, C. Robledo, S. Sharakin, L. Tkatchev, V.Tulupov, R. Tyukaev, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, A. Shirokov, L. Villasenor, I. Yashin, N. Zaikin, A. Zepeda, Space detector TUS for extreme cosmic ray study. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 2007, 166, p. 68-71.
  5. A. Cordero, P. Colin, J. Cotzomi, A. Chukanov, G. Garipov, V. Grebenyuk, L. Frolov, B. Khrenov, **P. Klimov**, O. Klimov, O. Martinez, E. Moreno, D.Naumov, Nguen Man Sat, P. Nedelec, Yu. Nefedov, A. Onofre, M. Panasyuk, I. Park, E. Ponce, S. Porokhvoi, A. Puchkov, C. Robledo, L. Tkachev, V.Tulupov, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, V. Sheveleva, A. Shirokov, L. Villasenor, I. Yashin and A. Zepeda, Status of the Space

- Experiment TUS for UHECR Study. // Proc. 29<sup>th</sup> ICRC. 2005, Pune (India), Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, Quest Publications, D-60, Vasant Villa, Amrut Nagar, Ghatkopar (W), Mumbai - 400 086, 2005, p.263-266.
6. Б.А. Хренов и **П.А. Климов**. Ожидается открытие. // Природа 2008, №4, с. 39-41.
  7. Гарипов Г.К., **Климов П.А.**, Хренов Б.А. глава №9 в электронном учебнике «Космические исследования и взаимодействие космической среды с системами и материалами космических аппаратов» , 2007, <http://slides.novalink.ru>
  8. G. Garipov, B. Khrenov, **P. Klimov**, Fluorescence of the atmosphere and cosmic rays. Experimental data of the “Universitetsky-Tatiana” satellite. // Rom. Astron. J. 2007, vol.17, Suppl., p. 91-96, Bucharest.
  9. S. Nam, S. Artikova, T. Chung, G. Garipov, J.A. Jeon, S. Jeong, J.Y. Jin, B.A. Khrenov, J.E. Kim, M. Kim, Y.K. Kim, **P. Klimov**, J. Lee, H.Y. Lee, G.W. Na, S.J. Oh, M. Panasyuk, I.H. Park, J.H. Park, Y.-S. Park, B.W. Yoo, H.J. Yoo, “A telescope for observation from space of extreme lightnings in the upper atmosphere”. // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A 2008, vol. 588, Issue 1-2, p. 197-200.
  10. **P.A. Klimov**, G.K. Garipov, B.A. Khrenov, M.I. Panasyuk, H. Salazar, V.I. Tulupov, I.V. Yashin. “The atmosphere UV background phenomena measured by detector on-board “Tatiana” satellite”. Proc. 30<sup>th</sup> ICRC. Merida. 2007. 5. P. 869–872.
  11. V. Abrashkin, V. Alexandrov, Y. Arakcheev, J. Cotzomi, A. Diaz, G. Garipov, V. Grebenyuk, A. Grinyuk, N. Kalmykov, B. Khrenov, S.H. Kim, O. Klimov, **P. Klimov**, V. Koval, O. Martinez, S.W. Nam, D. Naumov, A. Olshevsky, M. Panasyuk, I.H. Park, J.H. Park, E. Ponce, A. Puchkov, C. Robledo, A. Rosado, I. Rubinstein, B. Sabirov, H. Salazar, O. Saprykin, S. Sharakin, L. Tkatchev, V.Tulupov, Nguen Man Sat, L. Villasenor, I.

Yashin,. “Status or the TUS space detector preparation for UHECR study”.  
Proc. 30<sup>th</sup> ICRC. Merida. 2007. 5. P. 873–876.

12. **Климов П.А.** Моделирование работы трекового зеркала детектора для исследования космических лучей предельно высоких энергий. // Труды пятой Баксанской молодёжной школы экспериментальной и теоретической физики БМШ ОТФ – 2004, том 1, стр. 86-92.

13. **Климов П.А.** Моделирование работы трекового зеркала детектора для исследования космических лучей предельно высоких энергий. // Труды конференции «Ломоносов-2004».стр. 75-77.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность создания орбитального детектора КЛ ПВЭ «ТУС». Формулируется цель работы, её новизна и выносимые на защиту положения.

**В первой главе** кратко излагаются современные теоретические и экспериментальные проблемы и результаты, связанные с изучением КЛ ПВЭ. Распространение КЛ ПВЭ определяется взаимодействием с фотонами реликтового излучения, которое накладывает ограничение на расстояние от Земли до источника, и отклонением в межгалактических магнитных полях, которое при больших энергиях частиц мало, а значит, зарегистрированные частицы могут указать направление на источник, в котором они были ускорены. Рассмотрены различные гипотезы происхождения КЛ ПВЭ в рамках моделей “bottom-up” (ускорение в астрофизических объектах) и “top-down” (распад сверхмассивных частиц).

Описаны современные наземные установки регистрации ШАЛ (AGASA, HiRes, Pierre Auger Observatory) и приведены их результаты измерения спектра КЛ ПВЭ и поиска источников. Результаты экспериментов отличаются: на

установке AGASA не наблюдается обрезания спектра, а по данным других детекторов существует ГЗК-предел. На установке Pierre Auger Observatory наблюдается корреляция направлений прихода частиц КЛ ПВЭ с направлениями на ближайшие активные галактические ядра, хотя эти результаты носят предварительный характер и подвергаются критике.

Представлены современные проекты орбитальных детекторов КЛ ПВЭ («ТУС», «КЛПВЭ» и JEM-EUSO) и приводятся физические основы наблюдения частиц КЛ ПВЭ как флуоресцирующего трека в атмосфере Земли. Делается заключение о перспективности создания детекторов такого типа.

**Во второй главе** приводятся данные об УФ свечении ночной атмосферы Земли. Эта информация необходима для планирования и моделирования работы орбитального детектора КЛПВЭ, поскольку именно УФ фон в первую очередь определяет энергетический порог регистрации КЛ ПВЭ и время эффективной работы прибора.

**В разделе 2.1** излагаются современные мировые данные о свечении атмосферы. Медленные вариации свечения рассматриваются на основе данных спутниковых экспериментов «Космос-45» и GUVI (Global Ultraviolet Imager). Из результатов первого стоит отметить получение средней интенсивности излучения в диапазоне длин волн 250-400 нм – 400 релей ( $\sim 3,2 \cdot 10^7$  фотонов/см<sup>2</sup> с ср), поскольку в этом диапазоне наблюдается флуоресцентное свечение ШАЛ. Во втором эксперименте, в жестком УФ свечении (135,6 нм) наблюдаются полярные сияния и более слабое приэкваториальное свечение. Далее рассматривается классификация транзиентных световых явлений в верхних слоях атмосферы (“голубые струи” (Blue Jets), “красные духи” (Red Sprites) “эльфы” (Elves), гигантские струи) и приводятся результаты наземных наблюдений (наблюдения в обсерватории O’Brien университета Миннесоты), наблюдений с самолётов (Sprite95, EXL98) и эксперимента ISUAL на спутнике ROCSAT-2

**В разделе 2.2** приводится описание детектора УФ свечения расположенного на борту спутника «Университетский-Татьяна» и методики

эксперимента, излагаются результаты обработки данных эксперимента. Две важных особенности прибора делают его уникальным. Первая - высокое напряжение на делителях ФЭУ управляется током анода ФЭУ. Такое управление позволяет достичь рекордно широкого динамического диапазона ( $\sim 10^6$ ) в работе ФЭУ. Вторая - аппаратура детектора оснащена цифровым осциллографом, что позволяет измерять временной профиль интенсивности в разных временных шкалах (с шагом 1 мкс, 16 мкс, 256 мкс).

Результаты измерения:

1. Получена зависимость фона УФ излучения ночной атмосферы от фазы Луны (рис. 1). Изменение интенсивности свечения составляет от  $3 \cdot 10^7$  фотонов/см<sup>2</sup>ср с при фазе равной 0 % (новолуние) до  $10^9$  фотонов/см<sup>2</sup>ср с для фазы 100 % (полнолуние).

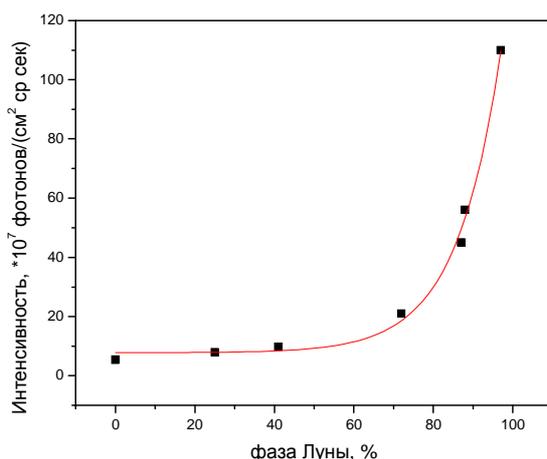


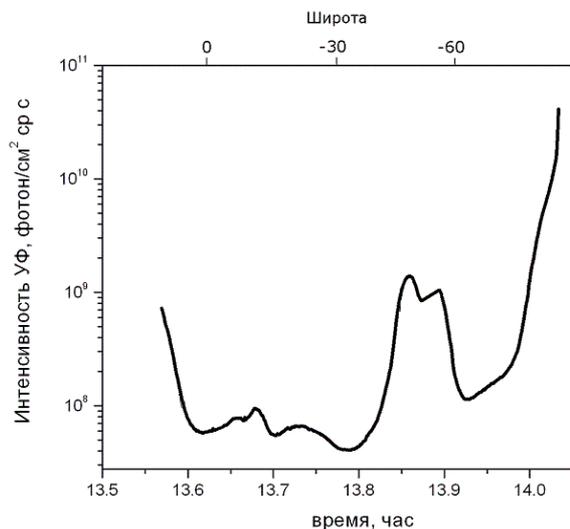
Рис. 1. Зависимость УФ излучения от фазы Луны.

2. Наблюдается повышение интенсивности УФ свечения в области овала полярных сияний (до  $10^9$  фотон/см<sup>2</sup> ср с, см. рис. 2), которое совпадает с данными других космических экспериментов, что свидетельствует о правильности работы аппаратуры и интерпретации данных.

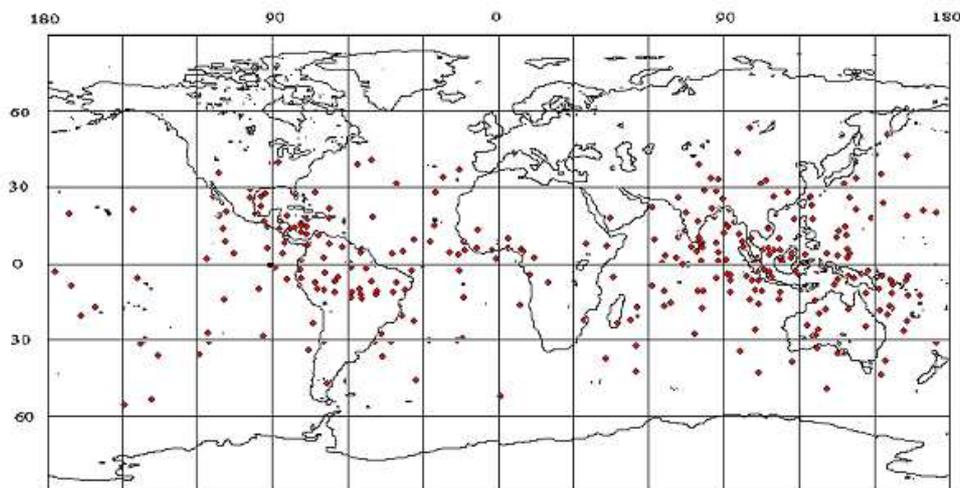
3. Получено географическое распределение вспышек УФ свечения длительностью от 0,1 до десятков мс (рис. 3).

4. Проведено сравнение данных спутника «Университетский-Татьяна» с данными других экспериментов, в частности с космическим экспериментом

ISUAL. Регистрируемые вспышки по своим характеристикам (длительности, энергии, пространственному распределению) близки к транзиентным световым явлениям в верхних слоях атмосферы, большая часть которых вспышки типа Elves.



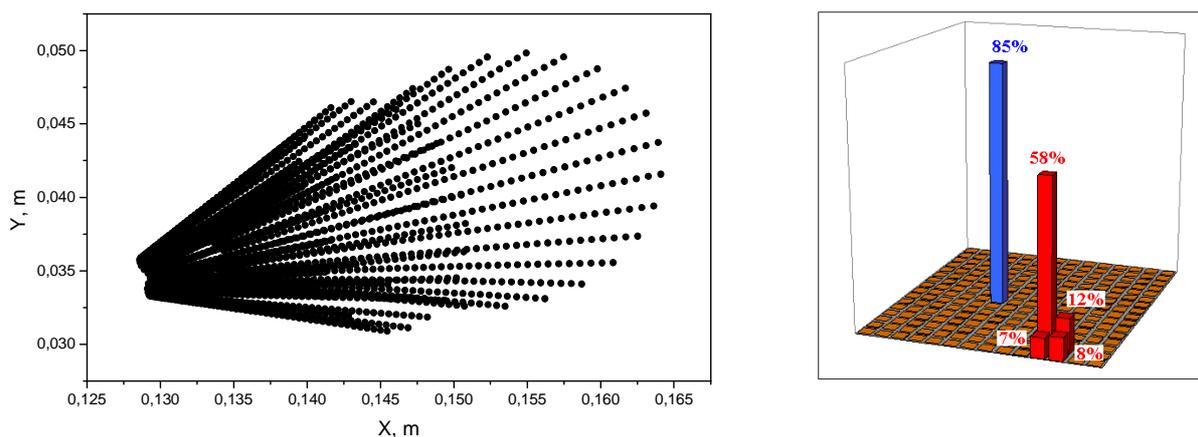
*Рис. 2. Измерения интенсивности УФ свечения в полярной области спутником «Университетский-Татьяна», 10 июля 2005 года.*



*Рис. 3. Распределение УФ вспышек по географической широте.*

**В третьей главе** изложены результаты моделирования оптических элементов детектора «ТУС» (зеркала-концентратора и световодов фотоприёмника).

В разделе 3.1 описано моделирование работы зеркала Френеля. Зеркало состоит из колец, профиль каждого кольца – параболоид вращения. По своей конструкции зеркало является плоским, состоящим из семи шестиугольных сегментов. Общая площадь зеркала  $2 \text{ м}^2$ , фокусное расстояние  $1,5 \text{ м}$ . На рис. 4 показано изображение от удалённого источника света, полученное в результате моделирования. Большая часть света сосредоточена в части изображения, которая всегда обращена к центру поля зрения. При этом показано, что сигнал распределён по ячейкам фотоприёмника так, что большая его часть лежит в одной ячейке (ближайшей к центру фотоприёмника среди сработавших ячеек). Это важно для разработки программ реконструкции параметров частицы, т.к. необходимо восстановление движения «истинного» (при отсутствии aberrаций) трека, которое соответствует движению «вершины» изображения.



*Рис. 4. Изображение удалённого источника света в плоскости фотоприёмника (слева) и распределение сигнала по ячейкам (справа).*

Так же важным элементом оптической части фотоприёмника является световод, обеспечивающий сбор света от квадратного входного окна к круглому фотокатоду ФЭУ. Необходима оптимизация размеров световода, обеспечивающего наибольшую эффективность светосбора в данной геометрии прибора. В разделе 3.2 описано детальное моделирование, в котором были найдены оптимальные размеры световода, обеспечивающие среднюю эффективность светосбора по всему фотоприёмнику  $80 \%$ .

В разделе 3.3 предложен итерационный алгоритм работы трекового зеркала для будущих орбитальных детекторов КЛ ПВЭ. Для реализации этого алгоритма, предлагается использовать иерархическую структуру фотоприёмника, расположенного в фокальной плоскости. Размер применяемых ячеек мал в центре приемника и увеличивается с удалением от центра. Изначально изображение источника, расположенного на краю поля зрения, попадает на периферию фотоприёмника, где расположены крупные ячейки.

Положение изображения находится как «центр тяжести» показаний сработавших ячеек:

$$\mathbf{R} = \frac{\sum_i \mathbf{r}_i J_i}{\sum_i J_i}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_i$  – положение середины  $i$ -го ФЭУ,  $J_i$  – интенсивность света, попавшего в этот ФЭУ. Такой расчет позволяет рассчитать центр изображения с ошибкой, заведомо меньшей размера ФЭУ.

Затем, по данным сработавших ячеек, грубо определяется направление на источник света.

$$\begin{cases} \theta = \arctg\left(\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}/f - 1\right), \\ \varphi = \arctg(y/x) \end{cases}, \quad (2)$$

где  $x$  и  $y$  – координаты изображения в плоскости фотоприёмника.

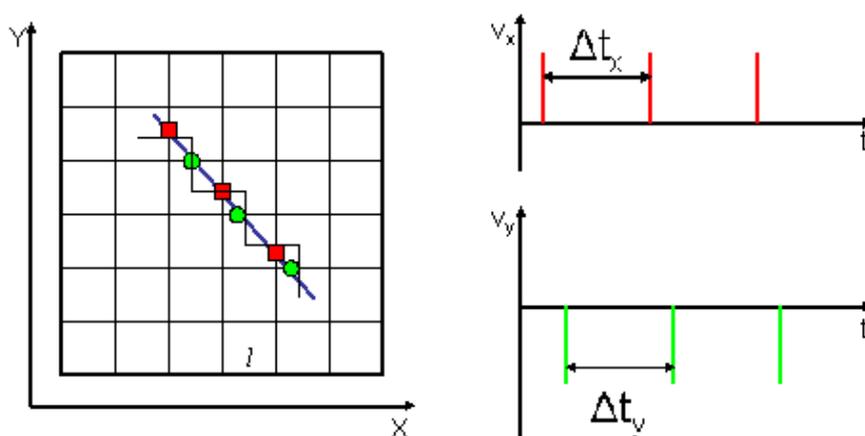
Зеркало перенастраивается (поворачивая микро зеркала в направлении источника), помещая изображение в область ячеек меньших размеров, т.е. более точных измерений, и алгоритм повторяется. Показано, что достаточно трёх итераций для повышения точности на порядок.

**В четвёртой главе** представлены результаты программ моделирования работы орбитального детектора и программы реконструкции параметров первичной частицы.

С помощью разработанного пакета программ произведено моделирование развития ШАЛ, флуоресценции света в атмосфере и преобразования светового сигнала в оптической системе детектора (зеркало Френеля и световоды). Для

моделирования ШАЛ и распространения света от ливня до детектора используются аппроксимация Ильиной-Калмыкова-Просина и модель атмосферы USA Standard (в параметризации Linsley). Данные программы позволяют получить параметры сигналов в детекторе при движении диска частиц ШАЛ, распределение сигналов по ячейкам и перемещение изображения диска ШАЛ в плоскости фотоприёмника.

Предложен алгоритм определения направления прихода первичной частицы (зенитный ( $\theta_0$ ) и азимутальный ( $\varphi_0$ ) углы) по проекциям скорости движения изображения по фотоприёмнику. Если рассматривать детектор с идеальным зеркалом, т.е. изображение удалённого источника всегда является точкой в фокальной плоскости, то появление сигнала в ячейке будет не плавным, а происходит скачком, при попадании изображения в данную ячейку. Тогда измеряемые проекции скорости движения изображения диска ШАЛ будут равны нулю пока оно находится в одной ячейке, но при переходе из одной ячейки в другую будет наблюдаться скачок скорости, равный  $l/\tau_s$ ,  $l = 1,5$  см (размер ячейки фотоприёмника),  $\tau_s = 0,8$  мкс – шаг измерения времени (см. поясняющий рис. 5).



*Рис. 5. Метод определения скорости движения изображения по плоскости фотоприёмника. Слева – часть фотоприёмника, прямая линия – истинный трек ШАЛ, ломаная линия – движение сигнала по фотоприёмнику, квадраты и круги – моменты перехода из ячеек, вдоль осей x и y соответственно. Справа – графики зависимости проекций скорости движения сигнала по фотоприёмнику от времени.*

Интервалы времени между скачками позволяют определить среднюю скорость движения изображения по плоскости фотоприёмника (проекции скорости):

$$v_x = \frac{l}{\Delta t_x}, \quad v_y = \frac{l}{\Delta t_y} \quad (3)$$

Углы рассчитываются по формулам:

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \frac{\theta_0}{2} = \frac{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{c} \frac{R}{F}, \\ \operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{v_y}{v_x} \end{cases}, \quad (4)$$

где  $R$  – расстояние от детектора до ШАЛ.  $F$  – фокусное расстояние зеркала-концентратора,  $v_x, v_y$  – проекции скорости движения изображения.

Но изображение, даваемое реальным зеркалом Френеля, не является точечным, и сигнал в каждый момент времени распределяется между несколькими соседними ячейками фотоприёмника. Это означает, что для применения рассмотренного метода определения углов необходимо заменить изображение точкой, которая бы перемещалась бы по фотоприёмнику также скачкообразно. Анализ изображения, которое даёт зеркало Френеля, показал, что «вершина» изображения, где находится большая часть сигнала, всегда направлена к центру фотоприёмника. Поэтому, за такую точку приняты координаты ближайшей к центру ячейки фотоприёмника из всех сработавших. Такой выбор позволяет применить описанный способ измерения скорости трека ШАЛ по пикам, связанным с переходом сигнала из одной ячейки в другую.

Описанная методика позволяет определять направление прихода первичной частицы с энергией  $10^{20}$  эВ при УФ фоне  $10^8$  фотон/см<sup>2</sup>ср с для горизонтальных ливней с точностью 3-4°.

Восстановление энергии первичной частица производится по числу электронов в максимуме ливня.

$$E_0 = N_{p.e.} \frac{E_1}{Yc\Delta t} \frac{4\pi R^2}{S} \frac{1}{p\chi\eta}, \quad (5)$$

где  $N_{p.e.}$  – число фотоэлектронов,  $E_l$  – параметр модели ливня,  $c\Delta t$  – перемещение ШАЛ за время  $\Delta t$  (12 мкс),  $R$  – расстояние от максимума ливня до детектора,  $Y$  – выход света флуоресценции (количество фотонов на метр пути электрона в атмосфере),  $p$  – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ,  $\chi$  – эффективность оптической системы,  $\eta$  – коэффициент прозрачности атмосферы.

При работе вблизи порога регистрации сильно влияние флуктуаций шумовых фотонов и точность определения энергии низкая. При большом соотношении сигнал-шум, неопределённость энергии связана с флуктуациями фотоэлектронов собственно от ШАЛ. Однако, при энергиях выше  $5 \cdot 10^{19}$  эВ количество фотоэлектронов в максимуме ливня за время 12 мкс (среднее время прохождения ливня через ячейку фотоприёмника) больше 100 р.е., а значит статистическая погрешность измерения энергии меньше 10 %.

Для проверки работы программы реконструкции энергии первичной частицы были промоделированы 1000 ливней с энергией  $10^{20}$  эВ, зенитным углом  $75^\circ$  (середина измеряемого диапазона углов) и разными азимутальными углами, при УФ фоне атмосферы  $10^8$  фотон/см<sup>2</sup>ср с, для центральной части поля зрения и периферийной. Гистограммы распределения реконструированной энергии приведены на рис. 6.

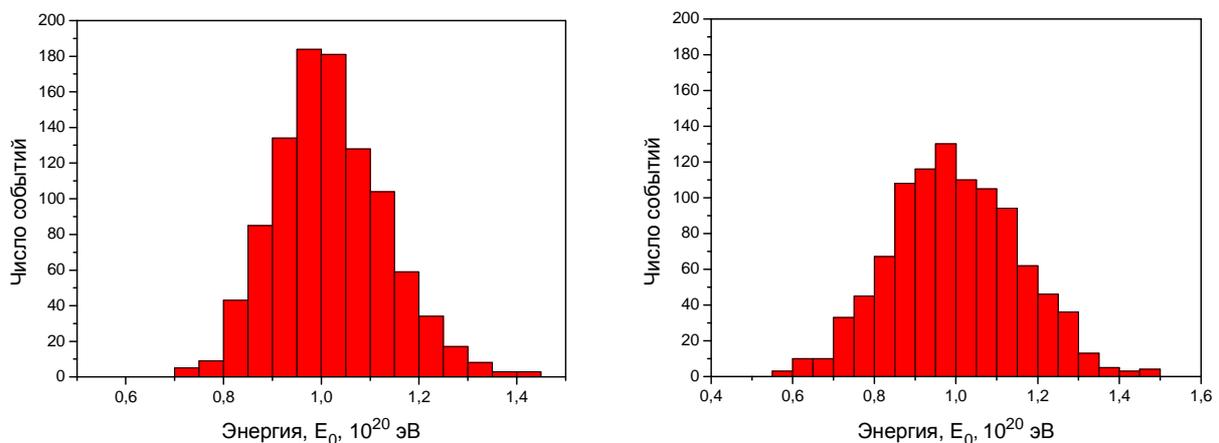


Рис. 6. Гистограммы реконструированной энергии частицы (первичная энергия  $10^{20}$  эВ,  $\theta_0 = 75^\circ$ ). Слева – центр поля зрения, справа – периферия поля зрения.

Точность определения энергии для ШАЛ в центре поля зрения – 10%, для периферии – 15 %.

**В пятой главе** описана электроника, алгоритмы работы и результаты тестирования лабораторного макета фотоприёмника детектора «ТУС».

Лабораторный макет фотоприёмника представляет собой два кластера ФЭУ, по 16 в каждом, объединённые общей платой управления. Каждый кластер обладает общей электроникой (системой низковольтного и высоковольтного питания, 16-канальным мультиплексором, АЦП и микросхемой программируемой логики).

Высоковольтное питание ФЭУ состоит из двух источников. Первый - для 1-6 динодов, а второй - для 7-10 динодов. Вторая часть ФЭУ (7-10 диноды) представляет собой вакуумный усилитель (ВУ), при изменении напряжения на котором изменяется коэффициент усиления ФЭУ. Это необходимо для уменьшения питания ФЭУ при больших интенсивностях УФ фона, что позволяет расширить диапазон измерения и потребление мощности прибора.

Для лабораторного макета была получена зависимость коэффициента усиления ФЭУ от напряжения ВУ:  $G(U_{HV})$  (рис. 7).

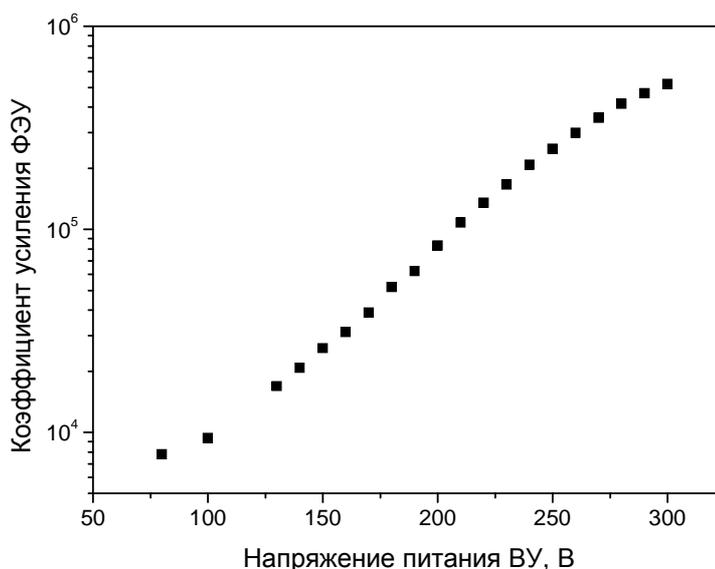


Рис. 7. Зависимость коэффициента усиления ФЭУ кластера от напряжения питания ВУ.

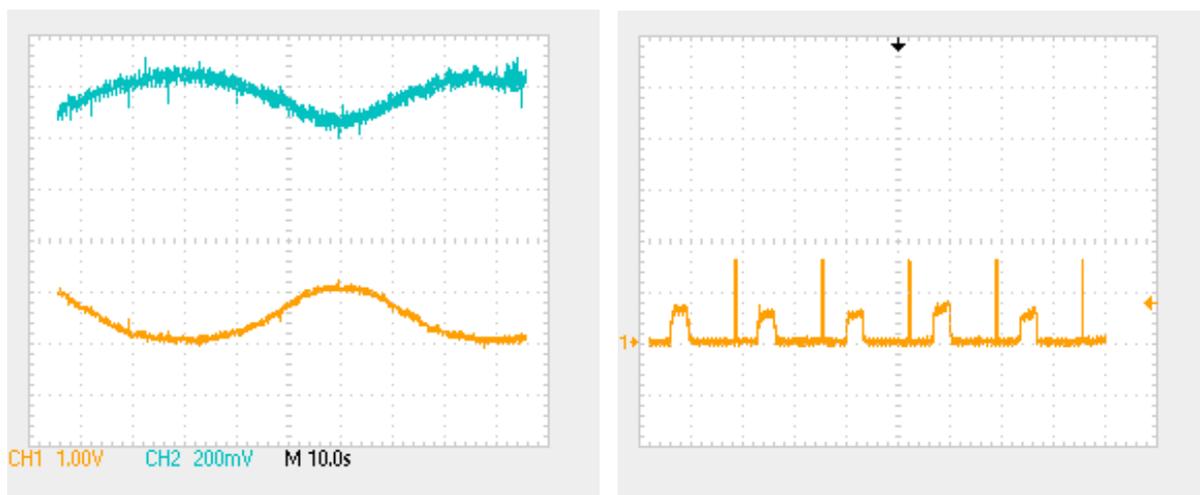
Данная зависимость позволяет по величине напряжения питания ВУ и амплитуде сигнала восстанавливать количество фотонов на входе ФЭУ:

$$N_{\gamma} = pN_{p.e.} = p \frac{N}{G(U_{HV})} = P \frac{UC_a}{eG(U_{HV})}, \quad (6)$$

где  $p$  – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ,  $U$  – амплитуда сигнала,  $C_a$  – ёмкость анодной цепи,  $e$  – заряд электрона.

Для тестирования системы автоматической регулировки усиления (АРУ) перед фотоприёмником располагался светодиод с диапазоном излучения 200 – 400 нм, равномерно освещающий все ФЭУ кластера. Интенсивность излучения светодиода пропорциональна напряжению питания. Имитация переменного УФ фона атмосферы проводилось путём подачи плавно изменяющегося напряжения на светодиод. Управляющий высоким напряжением сигнал должен изменяться противоположно изменению интенсивности. Результаты измерений приведены на рис. 8 (слева). Верхняя кривая – интенсивность УФ свечения, нижняя – управляющий сигнал высокого напряжения. Видно, что система АРУ реагирует на изменение условий освещённости должным образом, т.е. при увеличении света напряжение уменьшается.

Тестирование выдачи записанной информации позволяет проверить правильность функционирования всего процесса преобразования информации от получения её на ФЭУ в аналоговом виде, до записи её в память и передачу на плату управления. Для восстановления осциллограмм параллельно каналу передачи информации «плата кластера – плата управления» был подключен ЦАП, визуализировавший информацию, передаваемую битовыми потоками по протоколу SPI. На рис. 8 (справа) показаны записанные осциллограммы нескольких соседних каналов, которые равномерно освещались светодиодом. При этом проверялась правильность распределения сигнала по каналам (номера осциллограмм должны соответствовать номерам освещаемых каналов), а также равенство амплитуд выходного сигнала, т.е. равенство коэффициентов усиления ФЭУ.



*Рис. 8. Результаты тестирования работы лабораторного макета фотоприёмника. Слева: Изменение управляющего высоковольтными источниками напряжения в зависимости от интенсивности УФ свечения светодиода. Верхняя кривая – напряжение питания светодиода, нижняя – напряжение управления высоковольтными источниками. Справа: осциллограммы прямоугольного импульса в нескольких соседних каналах. Узкие вертикальные полосы показывают границы записи одной осциллограммы (64 интервала времени по 0,8 мкс).*

**В шестой главе** приведены оценки эффективности и экспозиции детектора «ТУС», сделанные на основе разработанной модели функционирования детектора и современных данных о спектре КЛ ПВЭ, а также описана оптимальная стратегия исследования глобальной анизотропии КЛ ПВЭ с помощью орбитального детектора.

В разделе 6.1 рассчитано полное время, проводимое спутником на теневой стороне, которое составляет около 35 % в год, в предположении орбиты МКС. При этом порог регистрации КЛ ПВЭ зависит от уровня УФ фона ночной атмосферы, который был измерен для разных фаз Луны детектором УФ излучения, находящимся на борту спутника «Университетский-Татьяна».

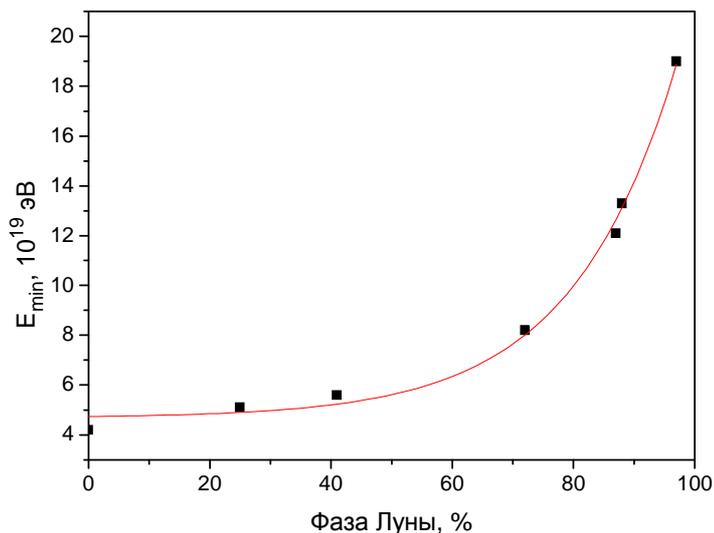
При отборе наклонных и горизонтальных ливней (количество сработавших ячеек фотоприёмника больше двух) частота ложных срабатываний триггера меньше раза в минуту (это предельная частота приема-передачи данных от

спутника) достигается при соотношении сигнал-шум равном 5. Пороговая энергия при этих параметрах триггерной системы составляет

$$E_{\text{пор}} = 5\sigma \frac{E_1}{Yc\Delta t} \cdot \frac{4\pi R^2}{S} \cdot \frac{1}{p\chi\eta}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – шум детектора,  $E_1$  – параметр модели ливня,  $Y$  – выход света флуоресценции,  $c\Delta t$  – перемещение ШАЛ за время  $\Delta t$  (12 мкс),  $S$  – площадь зеркала,  $R$  – радиус орбиты спутника,  $p$  – квантовая эффективность фотокатода ФЭУ,  $\eta = 0,75$  (средний коэффициент прозрачности атмосферы) и  $\chi = 0,8$  (эффективность оптической системы).

Полученная зависимость энергетического порога детектора ТУС от фазы Луны представлена на рис. 9.



*Рис. 9. Зависимость порога регистрации от фазы Луны.*

Доля дней в году, при которых фаза Луны меньше 40 % составляет примерно 45 %, и 68 % дней, для которых фаза Луны меньше 75 %. Итоговое эффективное время работы детектора «ТУС» для разных фаз Луны и соответствующие пороги регистрации КЛ ПВЭ приведены в таблице 1. Данные расчёты приведены для орбиты МКС, соответствуют триггеру  $5\sigma$ , и ливням с зенитным углом больше  $60^\circ$ .

Таблица 1. Пороговая энергия регистрации КЛ ПВЭ и эффективное время работы детектора «ТУС» для разных фаз Луны.

Фаза Луны, %	Интенсивность УФ свечения атмосферы фотон/см <sup>2</sup> ср с	Пороговая энергия для детектора ТУС (10 <sup>18</sup> эВ)	Эффективное время работы детектора «ТУС», %
0- 40	10 <sup>8</sup>	50	15
0- 75	2·10 <sup>8</sup>	100	23
0- 100	10 <sup>9</sup>	300	30

Таким образом, за счёт системы АРУ возможно увеличение времени экспозиции детектора, по сравнению с подобными приборами, работающими только в ночи с малой фазой Луны в 2 раза.

Для известного эффективного времени работы рассчитано ожидаемое количество событий КЛ ПВЭ в год для двух различных вариантов спектра (таблица 2).

Таблица 2. Количество событий КЛ ПВЭ в детекторе «ТУС» за год работы для двух возможных спектров, различных пороговых энергий, направлений регистрации частиц.

		5·10 <sup>19</sup> эВ	10 <sup>20</sup> эВ	3·10 <sup>20</sup> эВ
Спектр 1 γ = 1,84	60°<θ<90°	23	10	1,7
	30°<θ<90°	40	16	3
Спектр 2 γ = 3,1	60°<θ<90°	10	2	0,1
	30°<θ<90°	17	3,4	0,15

В разделе 6.2 показано, что для орбитального детектора «ТУС» экспозиция в течение года будет равномерной по всему небу.

Для прибора с плохим угловым разрешением и небольшим временем экспозиции предложена следующая стратегия исследования глобальной анизотропии. Выбираются два участка на небе, от которых ожидается

наибольшее отклонение (превышение и недостаток, в случае распределения источников в соответствии с распределением светящейся материи) от гипотезы изотропного распределения. Размеры областей и диапазон энергий выбирается заранее, чтобы обеспечить максимальную статистическую достоверность результата при минимальном времени экспозиции.

Распространение космических частиц моделировано с помощью специальной программы (Kalashev, Kuzmin, Semikoz, Sigl 2001; Kalashev 2006) для первичных протонов. Численные значения плотности распределения прихода протонов доступно в интернете на сайте <http://livni.inr.ac.ru/UHECRskymaps/>.

Исходя из карты направлений прихода протонов, полученной при гипотезе распределения источников в соответствии с распределением светящейся материи вблизи галактики и равномерной экспозиции детектора «ГУС», получена карта отклонения данного распределения от равномерного ( $\rho - \rho_0$ , где  $\rho$  – плотность событий при не изотропном распределении источников,  $\rho_0$  – плотность событий при изотропном распределении источников). Карта в супергалактических координатах приведена на рис. 10.

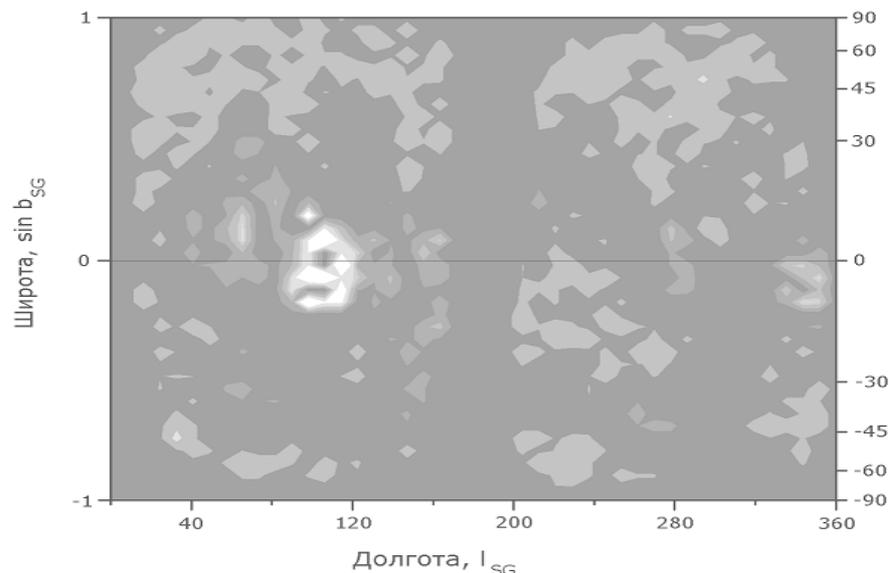


Рис. 10. Разница плотностей событий при гипотезе распределения источников в соответствии со светящейся материей и при гипотезе о равномерном распределении источников (белый цвет – избыток событий, серый – недостаток).

Статистически наиболее выгодными областями для анализа анизотропии оказались:

- 1)  $85^\circ < l_{SG} < 125^\circ$ ,  $-30^\circ < b_{SG} < 15^\circ$  - область максимального избытка событий в районе скопления Девы.
- 2)  $0^\circ < l_{SG} < 360^\circ$ ,  $35^\circ < b_{SG} < 90^\circ$  - область максимального недостатка событий.

Для достижения уровня значимости 95 % необходимо всего 55 событий по всей небесной сфере.

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

Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Гарнитура «Таймс». Печать цифровая.  
Тираж 100 экз. Заказ № Т-000

Отпечатано в типографии «КДУ»  
Тел./факс: (495) 939-57-32  
E-mail: [press@kdu.ru](mailto:press@kdu.ru)