

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ КОСМОСА

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ  
«МАЛЫЙ ЛИНЗОВЫЙ ТЕЛЕСКОП-СПЕКТРОМЕТР  
ТРАНЗИЕНТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРОЕКТА  
УНИВЕРСАТ-СОКРАТ»

Выполнил студент

614 группы

Штундер Ян Анатольевич

---

Научный руководитель:

зав.лаб. Климов Павел Александрович

---

Допущен к защите:

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

МОСКВА

2019

# Оглавление

ВВЕДЕНИЕ . . . . .	3
1. ФИЗИКА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА . . . . .	5
1.1.    Высоко-атмосферные транзиентные явления . . . . .	6
1.2.    Спектральный состав излучения различных типов транзиентных атмосферных явлений . . . . .	14
1.3.    Земные гамма всплески. Спектр излучения как индикатор механизма образования . . . . .	17
1.4.    Результаты исследований ТАЯ на спутниках МГУ . . . . .	20
1.5.    Космические эксперименты ISUAL и JEM-GLIMS. Сравнительный анализ научной аппаратуры . . . . .	25
2. МАЛЫЙ ЛИНЗОВЫЙ ТЕЛЕСКОП-СПЕКТРОМЕТР . . . . .	31
2.1.    Использование ПЛИС в разработке МЛТ . . . . .	34
2.2.    Спектрометр: электрические схемы и алгоритмы работы . . . . .	37
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СПЕКТРОМЕТРА МЛТ . . . . .	45
3.1.    Проверка работы системы автоматической регулировки управления высоким напряжением . . . . .	45
3.2.    Калибровка спектрометра . . . . .	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ . . . . .	57
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ . . . . .	58

## ВВЕДЕНИЕ

В стратосфере и мезосфере (высота 10 – 90 км) наблюдаются кратковременные (длительностью от одной до сотен миллисекунд) вспышки электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне. Масштаб пространства, на протяжении которого происходит свечение, десятки и даже сотни километров. Скорость распространения электрических разрядов, развивающихся в атмосфере, порядка  $10^2$  км/с. Такие высокие скорости наблюдаются в стримерном разряде, в котором фотоны играют роль «лидера».

В зависимости от механизма пробоя воздуха, теории возникновения молний и высоко атмосферных разрядов можно разделить на две группы. Первая группа основана на механизме обычного пробоя воздуха, т.е. на тепловой ионизации воздуха низкоэнергетичными электронами в присутствии электромагнитных полей. Вторая группа теорий основана на гипотезе о релятивистских «убегающих» электронах, являющихся причиной пробоя воздуха в верхней атмосфере. При наличии релятивистских электронов становится возможным образование тормозного гамма излучения (земные гамма вспышки, TGF).

Транзиентные атмосферные явления (ТАЯ) разделяют на несколько классов, в зависимости от их морфологии, механизма и времени развития: спрайты (sprites), голубые струи (blue jets), эльфы (elves) и др. Характерным для большинства разрядов является кратковременность вспышек: длительность порядка 1 – 100 миллисекунд. В некоторых разрядах наблюдается интенсивное ультрафиолетовое излучение (ближний УФ, длины волн 300 – 400 нм), а также рентгеновское и гамма – излучение.

Измерения спектров ТАЯ играют важную роль в исследовании этих явлений поскольку, во-первых, позволяют надежно отличать их от молниевых разрядов, во-вторых, дают информацию о высоте события и распределения по энергии электронов, участвующих в процессе. На сегодняшний день спектральные измерения проводились в ряде наземных экспериментов (для отдельных событий: спрайтов и голубых струй) и в космических экспериментах ISUAL и JEM – GLIMS.

Для дальнейшего изучения природы и спектра излучения молниевых разрядов и ТАЯ необходимо производить именно космические эксперименты. Это связано с тем, что, во-первых, верхняя атмосфера гораздо более

разряжена, чем нижняя, и практически не изменяет спектр излучения от источника (ТАЯ) до детектора, и, во-вторых, детектор, установленный на ИСЗ, обладает большим полем зрения и совершает постоянное движение вокруг Земли, что позволяет производить регистрацию в разных районах и набирать большую статистику событий. Исследования ТАЯ проводились на всех научно-образовательных спутниках МГУ: «Университетский – Татьяна», «Университетский – Татьяна-2», «Вернов» и «Ломоносов». Однако детекторы ТАЯ на спутниках МГУ не имеют ни спектрального, ни пространственного (за исключением «Ломоносова») разрешения, что не позволяет достоверно идентифицировать типы событий.

Цель настоящей работы заключается в создании, разработке и наземном тестировании малого линзового телескопа-спектрометра (МЛТ-С) транзитных атмосферных явлений (ТАЯ) и молниевых разрядов, который будет работать в составе научной аппаратуры спутникового эксперимента по исследованию ТАЯ. Прибор состоит из спектрометра и телескопа и за счет этого можно будет более точно разделить события и получить более подробную информацию об атмосферном электрическом разряде. Кроме того, можно будет сравнить две методики подсчета числа фотонов. Работа произведена в рамках проекта Universat-SOCRAT. Разработано программное обеспечение спектральной части детектора МЛТ-С, произведены лабораторные испытания работы алгоритмов опроса ФЭУ, автоматической регулировки усиления, записи данных, проведена калибровка четырех каналов спектрометра.

# 1. ФИЗИКА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Атмосферное электричество — это совокупность электрических явлений и процессов в атмосфере. При исследовании атмосферного электричества изучают электрическое поле в атмосфере, её ионизацию и проводимость, электрические токи в ней, объёмные заряды, заряды облаков и осадков, грозовые разряды и многое другое. Все проявления атмосферного электричества тесно связаны между собой и на их развитие сильно влияют локальные метеорологические факторы. Разделение электрического заряда происходит за счет сложных процессов, происходящих в грозовых облаках, а сопровождающие разрядные процессы замыкают глобальную электрическую цепь.

Известные электрические разряды в атмосфере можно разделить на два больших класса (тесно связанные друг с другом): низко высотные (молнии между облаком и Землей и между облаками) и высоко атмосферные (так называемые транзиентные световые явления).

Изучение первых было положено в 18 веке американским учёным Бенджамин Фрэнклином, экспериментально установившим электрическую природу молнии, и русским учёным М.В. Ломоносовым. Вторые же были случайно зарегистрированы лишь в конце 1980-х годов и в настоящее время активно исследуются [1].

## 1.1. Выско-атмосферные транзиентные явления

Только в последние два десятилетия начались изучаться, так называемые, транзиентные атмосферные явления (ТАЯ). В 1989 году, по счастливой случайности (во время тестирования, в условиях низкой освещенности, телевизионной камеры) было получено изображение нового явления [1]. Транзиентные атмосферные явления это собирательное название кратковременных (длительностью от одной до сотен миллисекунд) электромагнитных излучений, происходящих в широком диапазоне высот (стратосфера, мезосфера) от 10 до 90 км.

В настоящее время были зарегистрированы и классифицированы следующие типы ТАЯ: спрайты, распространяющиеся в ионосфере и двигающиеся вниз со скоростью до  $10^4$  км/с; гало (также называемое спрайтово гало), интенсивность свечения которых быстро убывает со временем; эльфы; голубые джеты, относительно медленно движущиеся фонтаны синего света, которые исходят из верхней части грозовых облаков и распространяются до высоты порядка 40 км и движущиеся вверх гигантские джеты, которые устанавливают электрическое взаимодействие между верхней частью грозовых облаков и нижней частью ионосферы [2–4]. Типы ТАЯ показаны на рис. 1.1.1.

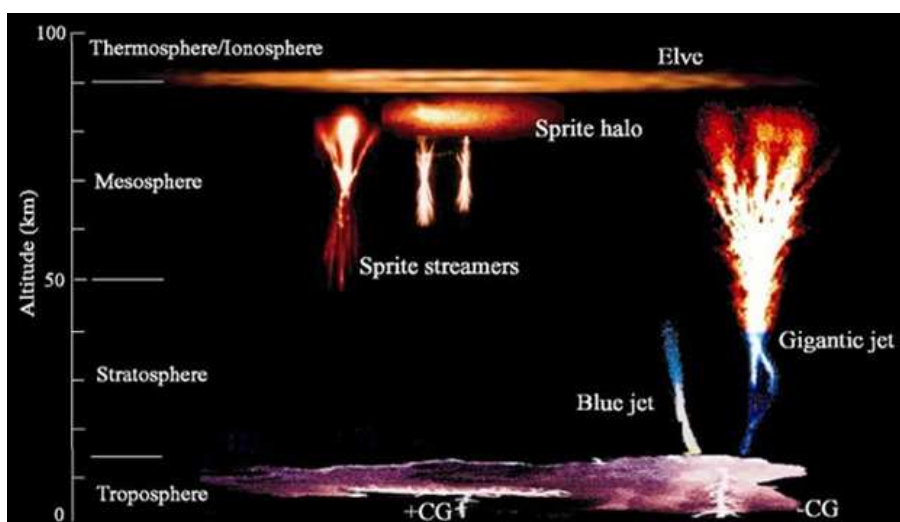


Рис. 1.1.1. Типы транзиентных атмосферных явлений в зависимости от высоты

### Спрайты (Sprites)

Спрайты являются одним из известных в настоящее время видов ТАЯ, происходящих в верхней атмосфере Земли, которые связаны с грозовой активностью. На рис. 1.1.2 приведен пример спрайта.



Рис. 1.1.2. Спрайт («carrot» – sprite)

Спрайты могут возникнуть в кластерах из двух, трех или более «carrot»-образных излучений, достигающих по горизонтали размер 50 – 100 км. Расстояние между элементами спрайтов составляет порядка 10 км. Спрайты также могут состоять из колоннообразных элементов, называемых C – sprites. Изображения с телескопов показали, что спрайты имеют сложную переплетающуюся структуру. Большая часть спрайтов вытянута в вертикальном направлении, вероятно, потому, что разряды выстраиваются преимущественно в вертикальном электрическом поле.

Спрайты возникают преимущественно на высотах 50 – 90 км. Самая яркая область спрайта — голова, располагается на высотах в среднем 66 – 74 км и имеет ярко красный цвет. Над головой часто, но не всегда, можно наблюдать тонкие вытянутые образования — волосы, имеющие тёмно – красный цвет, которые отделены от головы тёмной полосой и простирают-

ся до высоты около 90 км. Подобная тёмная полоса прослеживается также ниже головы спрайта, отделяя от него «усики» спрайта – более выраженные волокнистые образования, наподобие волос, располагающиеся ниже 66 км. «Усики» имеют тёмно – красный цвет в верхней части и фиолетовый – в нижней.

Высокая скорость съемки показала, что длительность спрайтов от нескольких мс до  $\sim 200$  мс, а так же, что разряды начинаются на высоте порядка 65 км [5, 6]. Развитие спрайта приведено на рис. 1.1.3.

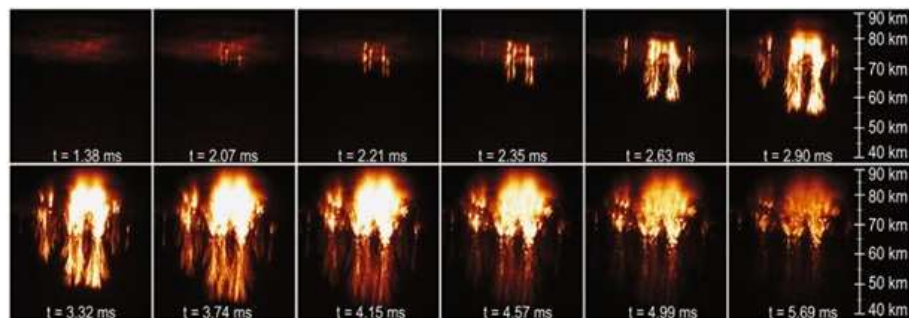


Рис. 1.1.3. Развитие спрайта

Детальный анализ яркостей нескольких единичных спрайтов показал, что их общая оптическая энергия составляет до 50 кДж за одно событие. Такую оптическую энергию можно получить от нескольких десятков тысяч мощных рубиновых лазеров. При средней длительности 3 мс мгновенная оптическая мощность этих отдельных спрайтов будет находиться в пределах 0.3 – 15 МВт [6].

Из приведенной спектральной на рис. 1.1.4 диаграммы видна четко выраженная спектральная линия с длиной волны  $\sim 670$  нм. Вклад в красное свечение спрайта дают линии 670 нм и 760 нм [7]

В последнее время было выяснено, что спрайты возникают не при обычных молниях, а только при положительной молнии «облако – земля». Дело в том, что большинство молний бьет из той части облака, которая заряжена отрицательно (она в среднем расположена ближе к земле). Но 10 % молний, достигающих земли, стартуют из области положительного заряда, а так как основная область расположения положительного заряда больше, чем отрицательного, то положительные молнии мощнее. Именно такие мощные разряды порождают спрайты, вспыхивающие в мезосфере примерно через сотую долю секунды после разряда класса «облако – земля» [8]

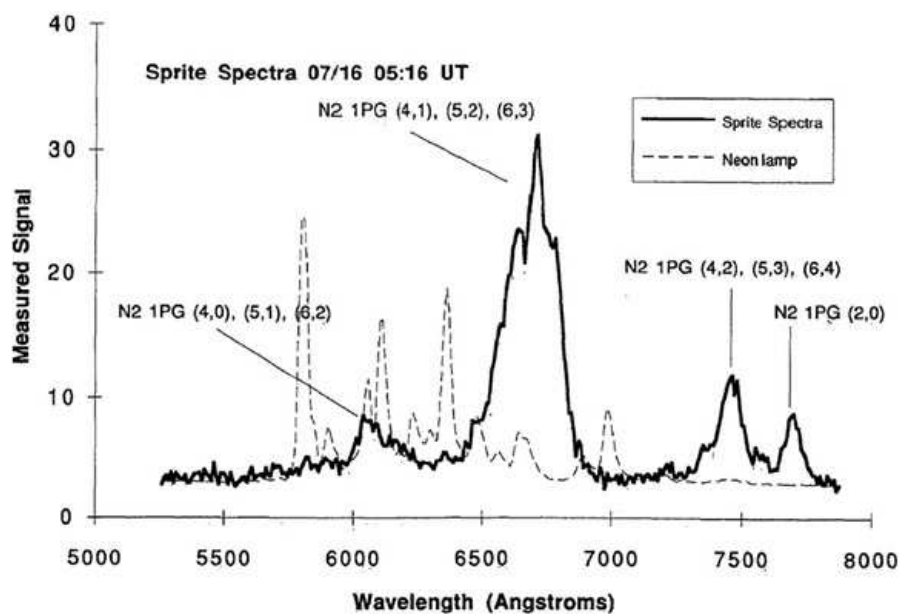


Рис. 1.1.4. Спектр спрайта. Толстая линия представляет собой спектр спрайта, а тонкая линия — спектр, откалиброванный неоновым светом

Спрайты довольно редко возникают по одиночке. Чаще они появляются парами или тройками [9]. Семейство спрайтов показано на рис. 1.1.5.



Рис. 1.1.5. Семейство спрайтов

Последние исследования показывают, что спрайты являются, фактически, группами маленьких (10 – 100 м) шаров ионизации, которые перемещаются вниз. Их движение происходит со скоростью около 0.1 от скорости света. К тому же выяснилось, что спрайтам иногда предшествует гало (ореол) — ещё один вид высоко атмосферной вспышки, о которой речь пойдёт

ниже.

## Голубые джеты (Blue jets)

Типичный джет наблюдается в виде вспышки, которая распространяется со средней скоростью  $\sim 100$  км/с от верхушки тропосферной молнии вверх в узком конусе. Средний угол конуса составляет порядка  $14^\circ - 15^\circ$ . На рис. 1.1.6 одно из таких изображений. По измерениям с самолетов была определена максимальная высота голубых джетов — около 45 км [6]. Многочисленные измерения показали, что длительность голубых джетов  $\sim 200$  мс. Голубые джеты в тропосфере являются как бы движущимися вверх продолжениями молний. Наблюдались сочетания двух джетов, которые шли друг за другом с интервалом 10 мс. Имеются примеры джетов, стартующих из одного места и следующих по одному и тому же пути с интервалом 50 – 70 мс [6]. Средняя частота возникновения джетов 2 – 3 в минуту. Максимальная яркость голубого джета может достигать яркости красного спрайта.



Рис. 1.1.6. Голубой джет

Спектр голубого джета пока хорошо не измерен, но предварительный анализ трехцветных телевизионных сигналов показывает, что отношение

голубого к зеленому в яркой части голубого джета около 5:1 при отсутствии красной компоненты.

Цвет джета меняется от ярко – белого у его основания до тёмно – синего у его вершины. Синий цвет данного явления также связан с ионизацией молекул азота, и их свечения не в красной полосе, как в случае эльфов и спрайтов, а в фиолетово – голубой за счёт более высокого давления на данной высоте [3, 4].

Синие джеты встречаются намного реже, чем спрайты. На протяжении 20 лет было получено всего около 100 изображений данного явления.

### **Гигантские джеты (Gigantic jets)**

Это явление впервые было зарегистрировано в 2001 году во время грозы над Оклахомой (США). Оно было описано как «гибрид синего джета и спрайта». Его верхняя часть напоминала спрайт, в то время как нижняя была подобна джету. Учитывая этот факт, а также то, что данное явление распространялось до высоты 70 км, оно получило название гигантский джет. На рис. 1.1.7 приведено изображение гигантского джета [10].

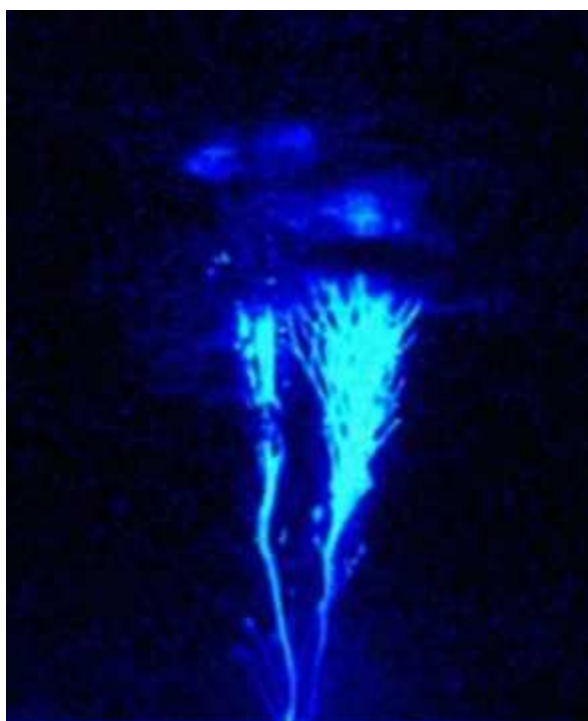


Рис. 1.1.7. Гигантский джет

Летом 2002 года во время грозы над Южно-китайским морем учёным Тайваня удалось сделать снимки пяти гигантских джетов, которые «связы-

вали» вершину грозового облака с ионосферой, т.е. их высота составляла около 90 км, что намного превосходит высоту распространения синих джетов [11]. Их продолжительность составила 200 – 400 мс (что намного длилительнее других явлений подобной природы). До этого случая уже высказывались предположения, что некоторые синие джеты могут устраивать «пробой» между облачностью и ионосферой, где наблюдается разность потенциалов около 300 кВ.

## Эльфы (Elves)

Эльф представляет собой обширную (до 500 км) расширяющуюся структуру, которая имеет форму диска, продолжительностью около 1 мс и толщиной примерно 10 – 20 км. Всего за 1 мс диаметр диска может вырасти до 300 и даже 700 км. Обычно эльфы появляются спустя 300 мкс после особенно мощного положительного грозового разряда между облаком и землёй в нижней ионосфере (E – регион) на высотах около 75 – 105 км и являются самыми высокими оптико – электрическими явлениями [12]. Стоит отметить, что огромная скорость расширения кольца эльфа, превышающая скорость света, конечно, не противоречит фундаментальным физическим законам. Скорость распространения электромагнитных волн остается постоянной. В данном случае речь идет о том, что сферический электромагнитный импульс, порождаемый разрядом молнии, пересекает почти горизонтальный слой нижней ионосферы. При этом скорость распространения фронта пересечения (взаимодействия) может быть больше скорости света [13, 14]. Данные вспышки наблюдаются прежде всего, в оптическом и ближнем ИК диапазонах электромагнитного спектра излучения. Цвет эльфов колеблется от тёмно – оранжевого до пурпурно красного.

Наиболее сильные грозовые разряды с пиковым током более 60 кА порождают электромагнитный импульс, мощностью около 10 ГВт. Мощность такого импульса, достаточна, чтобы проникнуть в нижнюю ионосферу. В ионосфере энергия этого импульса поглощается свободными электронами, что приводит к их возбуждению [15]. Возбуждённые электроны, сталкиваясь с окружающими молекулами газа (прежде всего азота), ионизируют их, заставляя светиться в красной области спектра. Ионизация происходит очень быстро, распространяясь радиально от области возбуждения и мы

видим расширяющееся светящееся кольцо — эльф. Таким образом, условия возникновения эльфов аналогичны возникновению спрайтов [16]. Несмотря на огромные размеры и высокую яркость (превосходящую яркость полярных сияний), эльфы являются настолько мгновенными, что человеческий глаз не в состоянии различить их, поэтому они регистрируются только высокочувствительными фотометрами, которые способны делать до 10 тыс. кадров в секунду [17]. Пример события, зарегистрированного в эксперименте ISUAL, показан на рис. 1.1.8

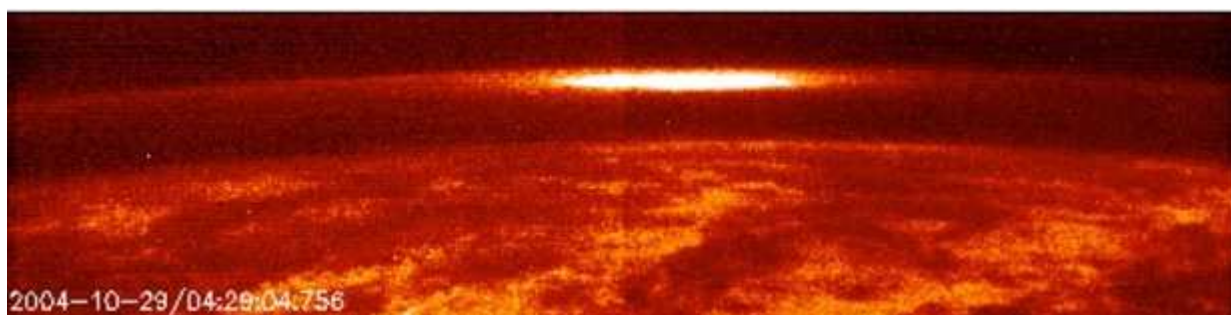


Рис. 1.1.8. Изображение эльфа, полученное в эксперименте ISUAL

## 1.2. Спектральный состав излучения различных типов транзиентных атмосферных явлений

Измерения спектров ТАЯ играют важную роль в исследовании этих явлений поскольку, во-первых, позволяют надежно отличать их от молниевых разрядов, во-вторых, дают информацию о высоте события и распределения по энергии электронов, участвующих в процессе. К сожалению, на сегодняшний день не так много экспериментальных данных относительно спектров излучений транзиентных явлений, более того измерений спектров событий типа эльф не существует вовсе. Среди ТАЯ лучше всего исследован спектр спрайтов.

### Спектр молниевых разрядов

Молния — высокоэнергетическое явление, в результате которого происходит распад молекул, содержащихся в воздухе ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ), на атомы. Поэтому, важной особенностью спектров молний, является присутствие атомарных линий излучения, которые в свое время отсутствуют в спектрах спрайтов. Это связано с тем, что плотность энергии, а следовательно и температура в стволе молнии больше чем в высокоатмосферных разрядах. Признаком высокой температуры (до 30000 К) во время разрядного процесса является довольно сильная линия  $H_\alpha$ .

В работе [18] были получены спектры молний в диапазоне длин волн 375 нм – 880 нм (рис. 1.2.1).

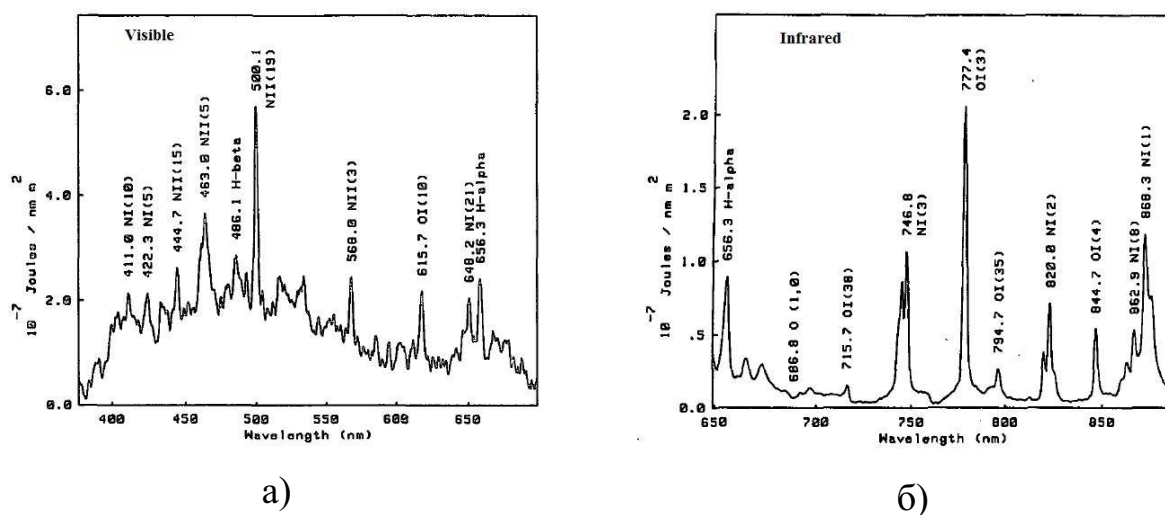


Рис. 1.2.1. Спектр молнии а) в видимом диапазоне, б) в ИК диапазоне

## Спектр спрайтов

Наблюдения оптических излучений на высотах между 60 – 90 км, связанные с гигантскими грозами, были в центре внимания многих наземных и авиационных исследований. В то время как полная феноменология излучения спрайтов была известна уже давно, их спектроскопическая структура исследуется только в настоящее время.

Радиационное высвечивание возбужденных молекул приводит к оптическим излучениям, которые внешне напоминают вспышки во время сияний. Но в отличие от сияний, которые длятся в течение нескольких часов, и в которых необходимо учитывать даже запрещенные переходы, красные спрайты имеют длительность миллисекунд. Таким образом необходимо учитывать только быстрые переходы в молекуле  $N_2$ . В работе [19] рассматриваются только состояния, показанные на рис. 1.2.2.

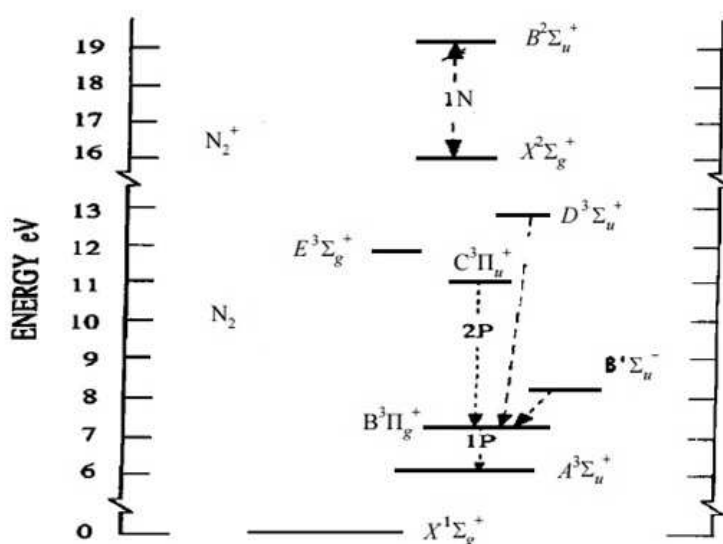


Рис. 1.2.2. Диаграмма электронных уровней энергии для азота. Соответствующие радиационные переходы показаны стрелками

В работе [20] с помощью регистрации цветными видеокамерми показали, что многие события типа спрайт обладают значительным количеством синего цвета в нижней части спрайта. Для азота есть два вероятных варианта для синего излучения, вторая положительная  $N_2$  и первая отрицательная  $N_2^+$  системы.

В работе [21] были измерены оптические спектры, зарегистрированных спрайтов, в области длин волн от 540 нм до 840 нм. Длины волн для различных переходов  $N_2$  (1P) показали хорошее соответствие с измеренным

спектром спрайтов (рис.2.). Так как молекула  $N_2$  является наиболее распространенной на высоте 40 – 90 км, то не удивительно, что её спектр наблюдается и у спрайтов. Приведенная полоса 3 – 1 обусловлена поглощением молекулы  $O_2$  (переход 0 – 0; 762 нм). Важно, что в спектре транзientа должна быть видна линия поглощения 762 нм, а в спектре молнии ее нет (рис. 1.2.3). Благодаря этой линии можно отличить высокоатмосферные ТАЯ от обычных молниевых разрядов. Также по линии 770 нм можно отличить ТАЯ от молнии. Линия 770 нм присутствует в спектре молний (используется в измерениях молний LIS как характерный признак молнии).

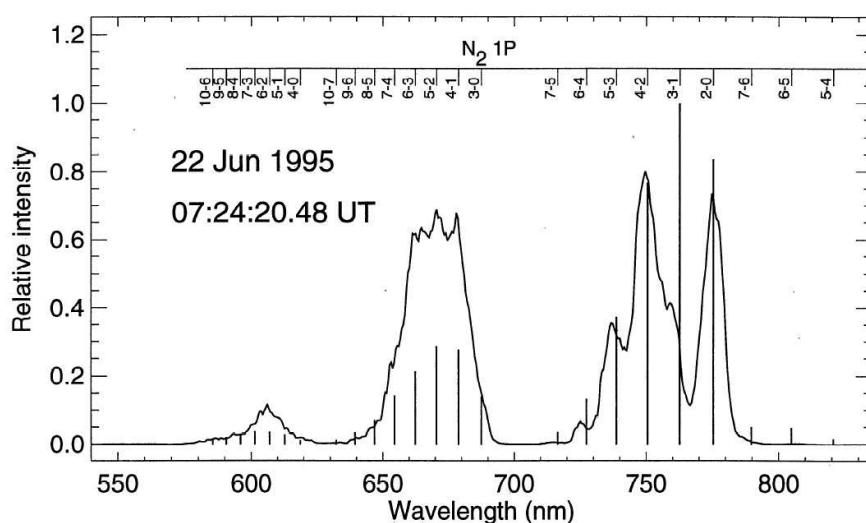


Рис. 1.2.3. Спектр события 07:24:20; 14 UT. Длины волн для различных переходов  $N_2$  (1P) отмечены сверху.

### 1.3. Земные гамма всплески. Спектр излучения как индикатор механизма образования

Быстрые и интенсивные всплески фотонов, происходящие в атмосфере Земли, известные как земные гамма – всплески. Они были впервые обнаружены в 1994 г. [22] с использованием детектора Burst and Transient Source Experiment на борту Комптонской гамма – обсерватории. Космические измерения показывают, что земные гамма – всплески обычно состоят из одного или нескольких импульсов, от нескольких десятков микросекунд до нескольких миллисекунд [23]. Энергетические спектры земных гамма – всплесков могут простираться до 100 МэВ.

Данные показывают, что TGFs тесно связаны с начальными этапами развития внутриоблачной молнии нормальной полярности, которая переносит отрицательный заряд вверх (+ IC) [24]. Более того, в работе [25] был проведен анализ начального пробоя, состоящего из 10 вспышек IC, которые испускали радиосигналы, похожие на сигналы, генерирующиеся при гамма-всплесках. Авторы предположили, что лавины релятивистских убегающих электронов вызвали импульсы начального пробоя.

Для интерпретации наблюдения земных гамма – всплесков предложены и разработаны два основных механизма. Первый механизм основан на релятивистских убегающих электронных лавинах (RREAs), который включает в себя ускорение и умножение релятивистских затравочных электронов (например, вторичных электронов космических лучей) под действием больших пространственных электрических полей во время гроз [26]. Т.к. было показано, что естественное фоновое излучение или широкие атмосферные ливни обеспечивают недостаточное количество затравочных электронов для теории основанной на релятивистских убегающих электронных лавинах. Поэтому были задействованы релятивистские механизмы обратной связи позитронов и рентгеновских лучей [27]. Другой механизм основан на образовании тепловых убегающих электронов на отрицательных коронных вспышках ступенчатого лидера молнии [28]. Эти два механизма представлены на рис. 1.3.1.

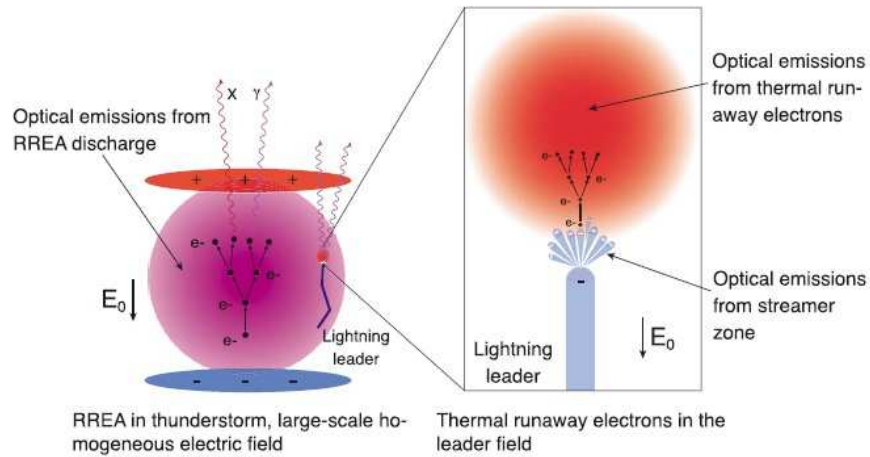


Рис. 1.3.1. Изображение двух механизмов TGFs [29]

В работе [28] исследуются оптические излучения, возникающие в результате радиационной релаксации возбужденных молекул нейтральных и ионизованных молекул азота для двух переходов,  $2PN_2$  ( $C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$ ) и  $1NN_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+ \rightarrow X^2\Sigma_g^+$ ).

На рис. 1.3.2 показаны оптические излучения  $2PN_2$  и  $1NN_2^+$ . Предполагается, что скорость непрерывных излучений тепловых убегающих электронов составляет  $10^{17} \text{ c}^{-1}$ .

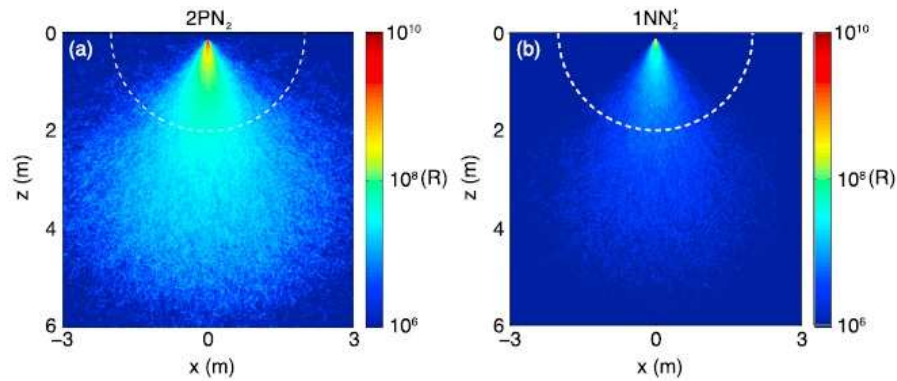


Рис. 1.3.2. Оптические излучения  $2PN_2$  и  $1NN_2^+$ , возникающие в результате непрерывного излучения тепловых убегающих электронов в поле лидера молнии 5 МВ

Оптические излучения  $2PN_2$  более интенсивны, потому что частота тушения при столкновениях между молекулами  $N_2^+$  ( $B^2\Sigma_u^+$ ) и воздуха значительно выше при этом давлении. Что еще более важно, что оптические излучения, вызванные ускорением тепловых убегающих электронов, намного менее интенсивны, чем оптические излучения стримера. При этом они пространственно разделены и спектрально отличаются друг от друга.

Хотя энергетические спектры фотонов в обоих механизмах хорошо согласуются со спутниковыми измерениями, между этими двумя механизмами имеются заметные различия. Вспышки молний не играют критической роли в теории релятивистских убегающих электронных лавин, и высокоэнергетические части распределения электронов и соответствующий спектр фотонов слабо зависят от величины однородного электрического поля, в то время как энергетический спектр гамма – излучения, испускаемого при ускорении тепловых убегающих электронов зависит от физических свойств и конфигураций пространственного электрического поля [29]. Это связано с тем, что вокруг вершины лидера молнии сильно неоднородные электрические поля.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и теоретические усилия, имеется мало данных об источниках земных гамма – всплесках. Оптические излучения обычно дают важные знания об энергетике электронов и движущемся электрическом поле в атмосферных разрядах и поэтому широко используются в исследованиях ТАЯ.

## 1.4. Результаты исследований ТАЯ на спутниках МГУ

Исследования ТАЯ проводились на всех научно – образовательных спутниках МГУ [30, 31] и продолжаются на спутнике «Ломоносов». Рассмотрим измерения на космических аппаратах «Университетский – Татьяна-2», «Вернов» и «Ломоносов».

На спутнике «Ломоносов» была установлена более усовершенствованная аппаратура (телескоп, имеющий пространственное разрешение и высокое временное разрешение), что позволило получить более детальные данные о транзиентных атмосферных явлениях (ТАЯ) по сравнению с данными спутников «Вернов» и «Татьяна-2». Основные различия между космическими аппаратами приведены в табл. 1.4.1

Таблица 1.4.1. Сравнение параметров детектора УФИК на спутниках «Татьяна-2», прибора ДУФ на спутнике «Вернов» и телескопа ТУС на спутнике «Ломоносов»

	«Татьяна-2»	«Вернов»	«Ломоносов»
Высота орбиты	850 км	650 – 830 км	500 – 550 км
Диаметр поля зрения	240 км	180 – 240 км	80 км
Диапазон длин волн	240 – 400 нм	270 – 380 нм	300 – 400 нм
	> 610 нм	> 610 нм	
Шаг измерения по времени	1 мс	0.5 мс	4 режима
ШАЛ	–	–	0.8 мкс
Короткие ТАЯ	–	–	25.6 мкс
Длинные ТАЯ	–	–	0.4 мс
Микрометеоры	–	–	6.6 мс
Длина осциллограммы	128 мс	128 мс	4 режима
ШАЛ	–	–	205 мкс
Короткие ТАЯ	–	–	6.6 мс
Длинные ТАЯ	–	–	105 мс
Микрометеоры	–	–	1.7 с
Разрядность АЦП	10	12	10

Принципиальная схема работы электроники приборов на трех спутниках в целом одинакова. Вместе с тем имеются важные отличия:

- 1) На спутнике «Вернов» увеличена частота сброса информации — каждые 4.5 секунды (на спутнике «Татьяна-2» каждую минуту)
- 2) На спутнике «Ломоносов» уменьшен шаг ( $t$ ) в измерении осциллограммы ТАЯ (на спутнике «Ломоносов» —  $t = 25.6$  мкс, на спутнике «Вернов» —  $t = 0.5$  мс, на спутнике «Татьяна-2» —  $t = 1.0$  мс). У прибора ТУС имеется 4 режима записи осциллограмм. Минимальный шаг ( $t_{min}$ ) при измерении осциллограммы в ТУС  $t_{min} = 0.8$  мкс.
- 3) На ИСЗ «Вернов» в детекторе УФИК используется 12 – разрядный АЦП (10 – разрядный на «Татьяне-2» и 10 – разрядный АЦП на спутнике «Ломоносов»)

Регистрация излучений происходила как на ночной, так и на дневной стороне орбиты спутника благодаря работе системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Движение спутника вокруг Земли позволяет получить статистику наблюдений практически по всему Земному шару. За время работы спутника «Татьяна-2» было зарегистрировано более 2000 событий. Географическое распределение УФ и ИК вспышек приведено на рис. 1.4.1.

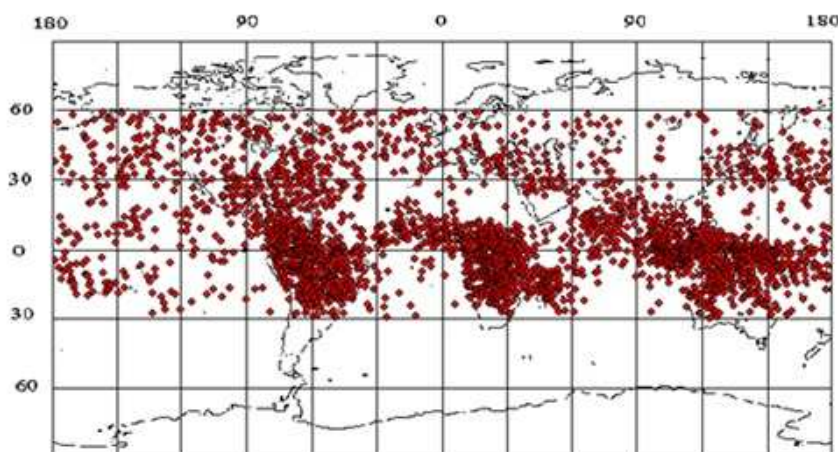


Рис. 1.4.1. Географическое распределение вспышек, зарегистрированных в эксперименте на борту спутника «Университетский – Татьяна-2»

На рис. 1.4.2 приведено географическое распределение событий ТАЯ по данным спутника «Вернов». На рис. 1.4.2 создается ложное впечатление

длительных последовательностей ТАЯ из-за эффекта наложения последовательных орбит.

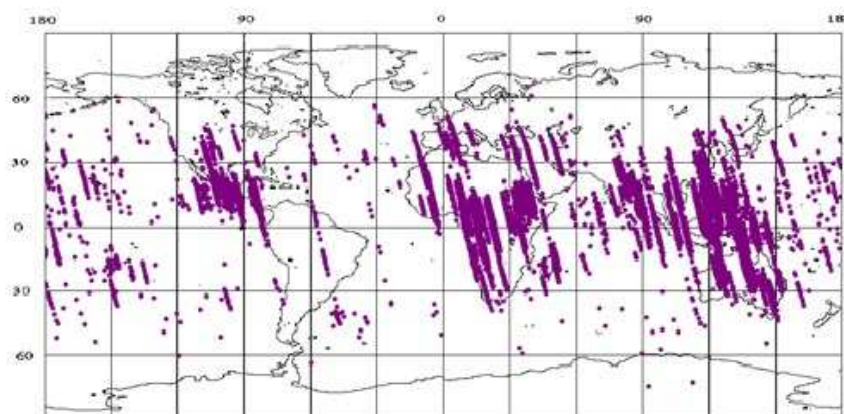


Рис. 1.4.2. Географическое распределение ТАЯ, зарегистрированных в эксперименте на борту спутника «Вернов»

Видно, что географическое распределение событий для двух экспериментов практически совпадает. Также можно заметить, что географическое распределение серий вспышек демонстрирует тесную корреляцию их координат с активными грозовыми районами.

Один из важнейших результатов, полученных в этих миссиях, это отношение сигнала в красном и синем каналах спектрометра (P). Данные спутника «Вернов» близки к данным «Татьяны-2» (рис. 1.4.3): максимальное число событий имеет отношение  $P = 0.1 - 0.3$ . С применением модели излучения ТАЯ от возбужденных молекул азота [32] можно сделать вывод о высоте событий. Наблюдаемое отношение  $P \sim 0.1 - 0.3$  ожидается для высот  $H = 60 - 70$  км.

Детектор «ТУС», установленный на борту спутника «Ломоносов», разработан как многофункциональный телескоп для измерения УФ свечения атмосферы Земли в разных временных диапазонах. Основные задачи телескопа:

- 1) регистрация космических лучей предельно высоких энергий
- 2) выяснение физической природы транзиентных световых явлений и их связь с атмосферным грозовым электричеством

Прибор «ТУС» состоит из сегментированного зеркала концентратора, фотодетектора, системы отвода фотоприемника и сенсора солнечного света.

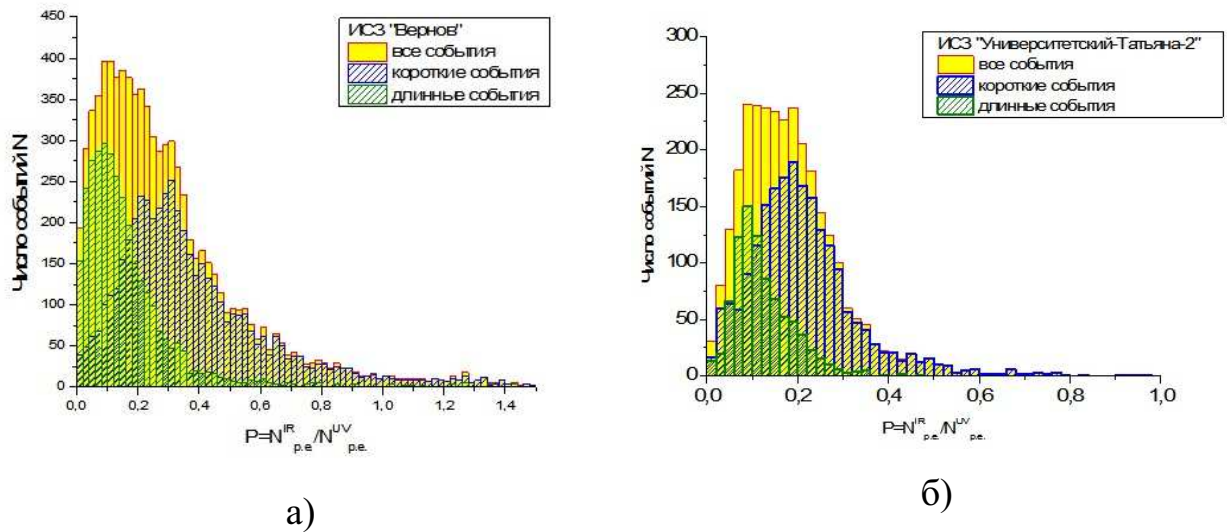


Рис. 1.4.3. Распределение транзиентных событий по отношению  $P$  сигнала в КИК и УФ каналах для спутников «Вернов» (а) и «Татьяна-2» (б) [33]

Излучение попадает на зеркало концентратор в фокусе которого расположен фотодетектор, состоящий из 256 ФЭУ Hamamatsu R1463. Если спутник повернется зеркалом в сторону Солнца, то сработает сенсор солнечного света и система отвода фотоприемника. В результате фотодетектор не выйдет из строя, т.к. окажется не в фокусе зеркала концентратора.

Преимущество детектора в том, что его пространственное разрешение позволяет идентифицировать некоторые типы ТАЯ, например, эльфы. Дугообразная форма сигнала видна на рис. 1.4.4, а короткая длительность сигнала показана на рис. 1.4.5. Все это говорит о том, что наблюдаемое событие является эльфом.

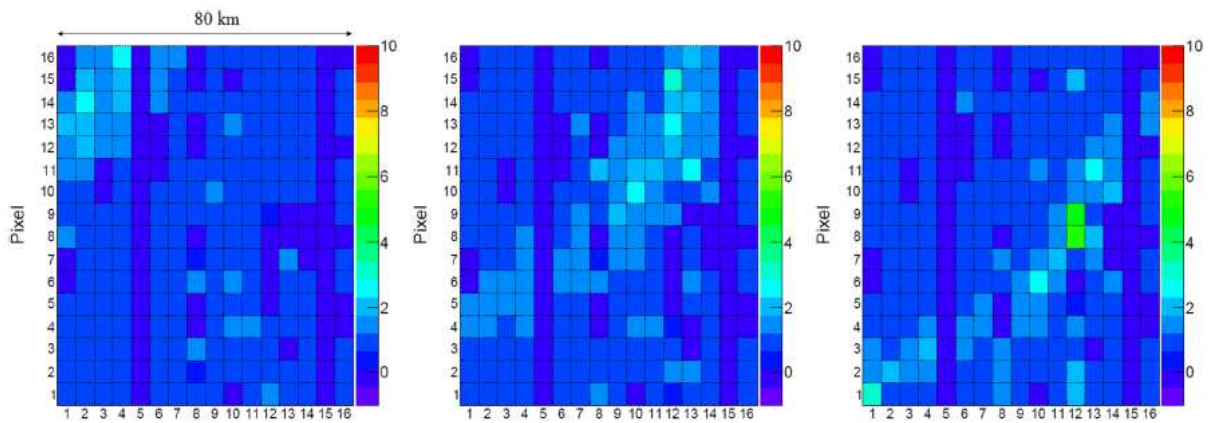


Рис. 1.4.4. Пример регистрации события типа эльф детектором ТУС. Снимки фокальной плоскости показывают движущийся дугообразный сигнал в поле зрения детектора.

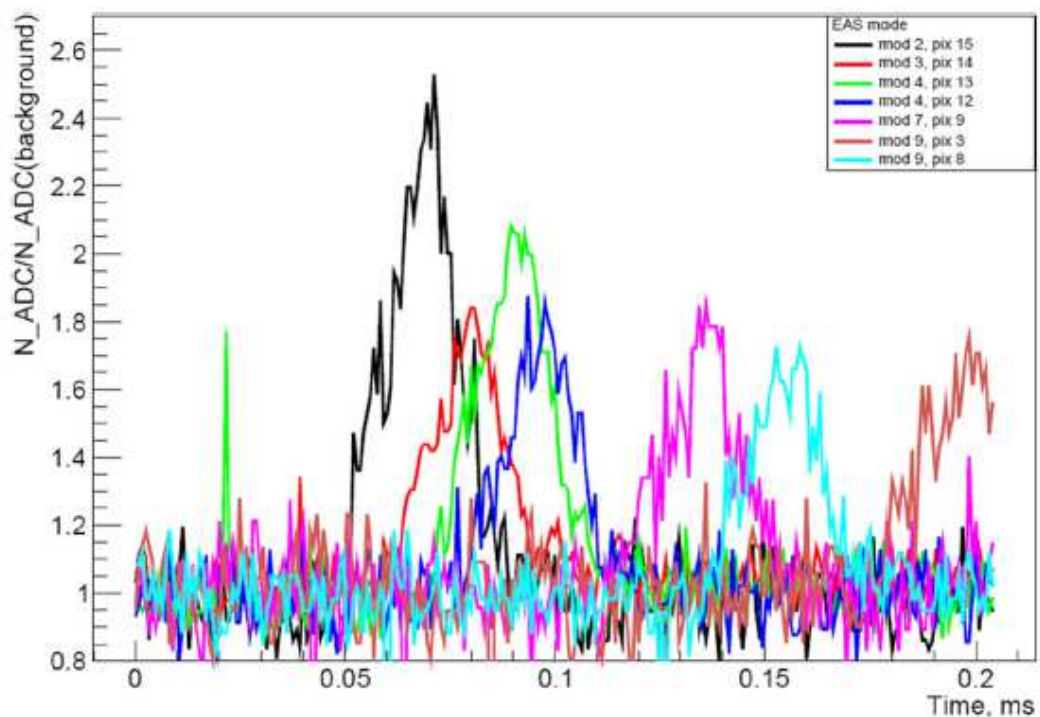


Рис. 1.4.5. Осциллограммы нескольких пикселей для события типа эльф, зарегистрированного 18 сентября 2016 года над континентальной Африкой

## 1.5. Космические эксперименты ISUAL и JEM-GLIMS. Сравнительный анализ научной аппаратуры

Одна из основных задач эксперимента JEM – GLIMS состоит в установлении способа возникновения ТАЯ и молний, соответственно. Так как излучения молнии и ТАЯ в основном перекрываются вдоль одной прямой наблюдения, когда спутник смотрит в направлении надира, необходимо различать их излучение. Один из способов — использование данных спектрофотометра, с помощью которой получают спектральную информацию с высоким временным разрешением.

Миссия JEM-GLIMS создана для наблюдения глобальных распределения молний и транзиентных атмосферных явлений путем объединения наблюдений с радио- и оптических датчиков. На рис. 1.5.1 показаны какие датчики установлены на японском экспериментальном модуле.

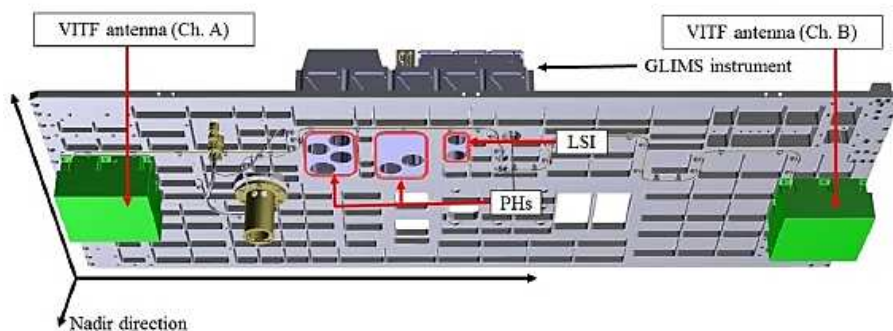


Рис. 1.5.1. Используемые датчики в JEM – GLIMS [34]

На рис. 1.5.2 показана иллюстрация триггерной системы на приборе GLIMS. Фотометры, регистрирующие данные при временном разрешении 50 мкс, работают как инструмент для запуска других датчиков. Если данные записываемые фотометрами превышают пороговое значение, триггер сработает и флаг запуска будет объявлен для всех других научных приборов (LSI-1 и VITF). LSI-1 сохранит четыре фрейма данных оптических изображений. VITF останавливает запись данных наблюдений через 100 мс от стартового флага и сохраняет записанные данные.

В работе [35] авторами был предложен новый метод для того, чтобы определить возникновение молний и транзиентных атмосферных явлений с использованием многоцветовых фотометрических данных, полученных с

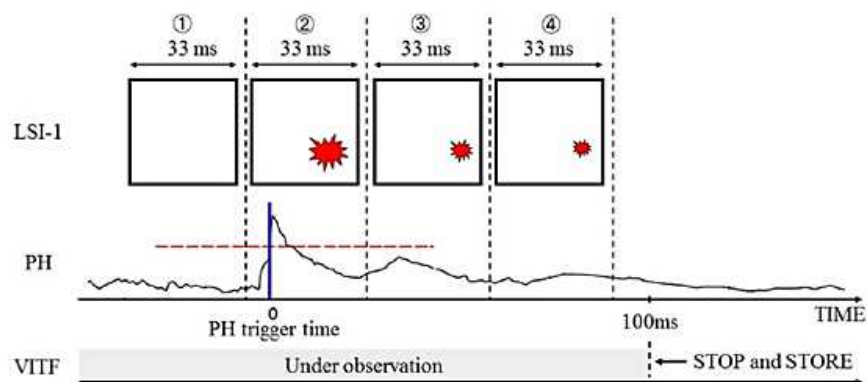


Рис. 1.5.2. Пояснение работы триггерной системы в приборе GLIMS

помощью космических измерений в надир. Авторы согласны, что рассчитанные спектральные формы ТАЯ явно отличаются от событий типа молнии. Полученные результаты показали, что интенсивность дальнего УФ сигнала и отношение  $\chi$  длин волн 337 нм к красному (609 – 753 нм) полезны для выявления возникновения ТАЯ. Если говорить о вероятности возникновения ТАЯ, то в случае грозовых событий, при  $\chi$  равном 0.95; 2.95; 14.79; вероятность возникновения спрайта равна 10%; 40%; 80% соответственно.

В эксперименте удалось классифицировать 1039 событий, причем 828 событий это были молнии, а 211 событий — молнии, сопровождающиеся ТАЯ. Глобальная карта распределения вспышек согласуется с ранее полученной картой: самые высокие активности молний и ТАЯ находятся над северным и южноамериканским континентом, африканским континентом, а также над азиатскими морскими регионами. Вероятность возникновения молнии и молний, сопровождаемых ТАЯ оказалась максимальной в экваториальной области. Вероятность обнаружить ТАЯ над океаном, больше чем вероятность обнаружить ТАЯ над землей. Вполне вероятно, что в эксперименте JEM – GLIMS, наблюдаемые ТАЯ являются эльфами, которые имеют тенденцию происходить чаще над океанами.

Если GLIMS одновременно наблюдает вспышку молнии и спрайта в направлении в надир, то излучения спрайта и молнии, по всей видимости, перекрывают друг друга, поэтому необходимо тщательно разбираться с данными с целью выявления излучения спрайтов. Одновременные данные фотометра показаны на рис. 1.5.3. Каждый график показывает временное изменение оптических излучений молнии и спрайта, измеренных в различных оптических полосах пропускания.

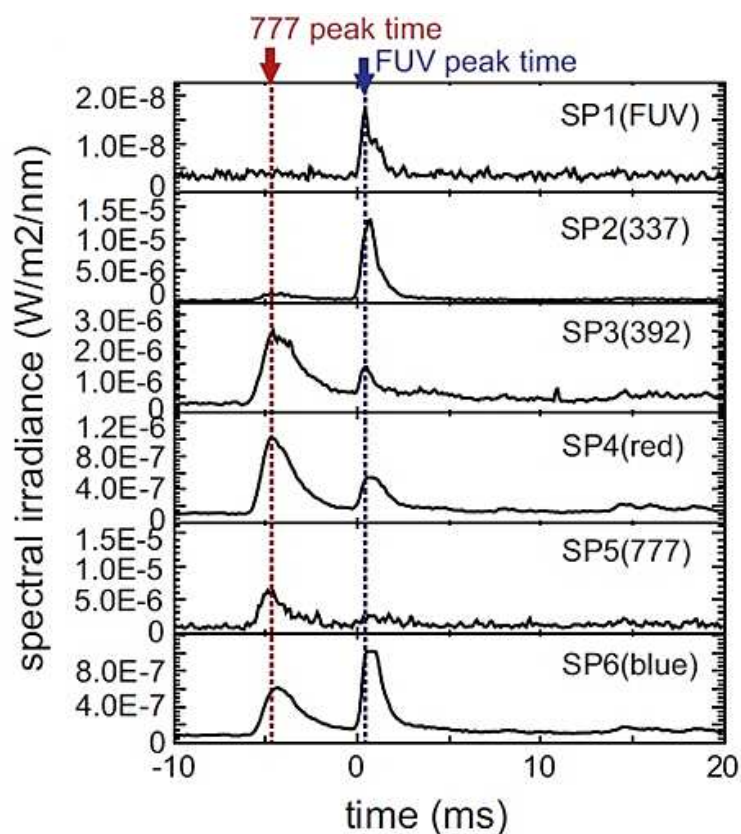


Рис. 1.5.3. Одновременные данные спектрофотометра. Первый пик (красная стрелка) является излучением молнии, в то время как второй пик (синяя стрелка) является комбинированным излучением спрайта и молнии

Одна из причин этого заключается в различии спектров молнии и спрайтов / эльфов. В то время как молния имеет сильное излучение в линии атомарного кислорода при 777 нм, спрайт не имеет сильных выбросов излучения в полосе пропускания SP5.

Рис. 1.5.4. показывает спектральную форму, рассчитанную на момент первого пика ( $T = -4.5$  мс, красные звездочки) и второго пика ( $T = 0.8$  мс, синие звездочки). Форма спектра определяется путем вычисления отношения между спектральным  $i$ -ым каналом SP к SP4.

Полученная спектральная форма отличается от излучения молнии и выбросов спрайтов. Относительная спектральная интенсивность излучения молнии слабее в более коротковолновой по сравнению со спрайтом. Это связано прежде всего с Рэлеевским рассеянием.

Можно заметить на рис. 1.5.3 (см. SP3, SP4, например), что уровень сигнала после второго пика немного выше уровня сигнала до первого пика. Эта связано, скорее всего, с наличием излучения от распространяющейся

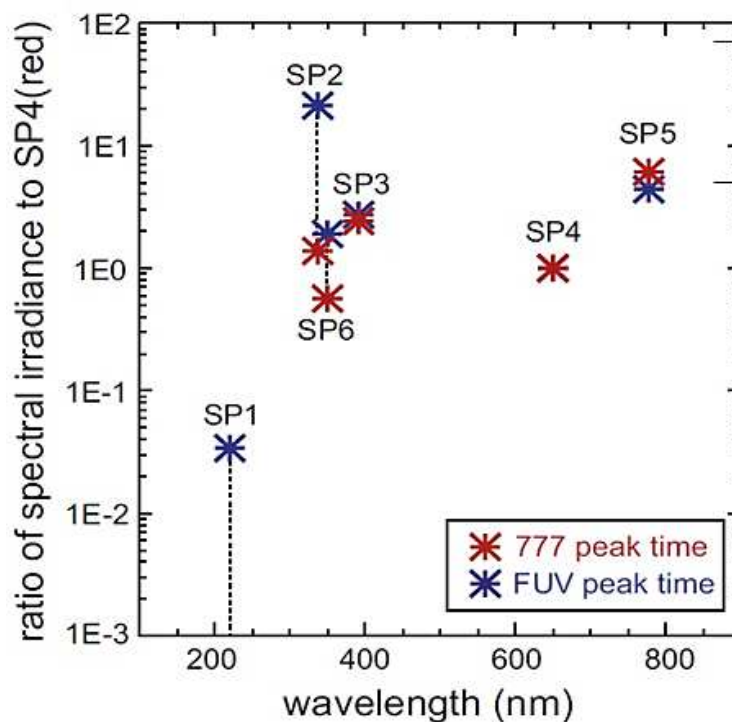


Рис. 1.5.4. Спектральная форма первого пика (красные звездочки) и второго пика (синие звездочки). Здесь форма спектра определяется путем нормализации интенсивности излучения в каждом канале фотометра к интенсивности красного канала (SP4)

молнии, которая начинается с первого пика и длится в течение нескольких десятков миллисекунд. Таким образом, наиболее вероятно, что вклад во второй пик вносит еще и молния. Следовательно, спектральная форма второго пика (синие звездочки) отражает спектр спрайта с небольшим вкладом молнии.

Экспериментом, в котором удалось набрать большую статистику регистрации ТАЯ различных типов, являются измерения с помощью комплекса аппаратуры ISUAL (Imager of Sprites and Upper Atmospheric Lightnings) на борту спутника FORMOSAT – 2, запущенного в 2004 году. Основной поставленной задачей этого проекта было определение пространственно – временной структуры высоко атмосферных разрядов для более детального изучения их свойств. В состав экспериментального оборудования входили CCD камера, шестиканальный спектрометр и матричный спектрофотометр. Каждый канал спектрометра имеет свой диапазон пропускания длин волн (таблица 1.5.1).

Таблица 1.5.1. Диапазоны пропускания каналов спектрометра для эксперимента ISUAL

№	Номер канала	Длины волн, нм
1	SP1	150 – 290
2	SP2	$337 \pm 2.8$
3	SP3	$391.4 \pm 2.1$
4	SP4	608.9 – 753.4
5	SP5	$777.4 \pm 2.1$
6	SP6	228.2 – 410.2

На рис. 1.5.5. показан пример регистрации спрайта.

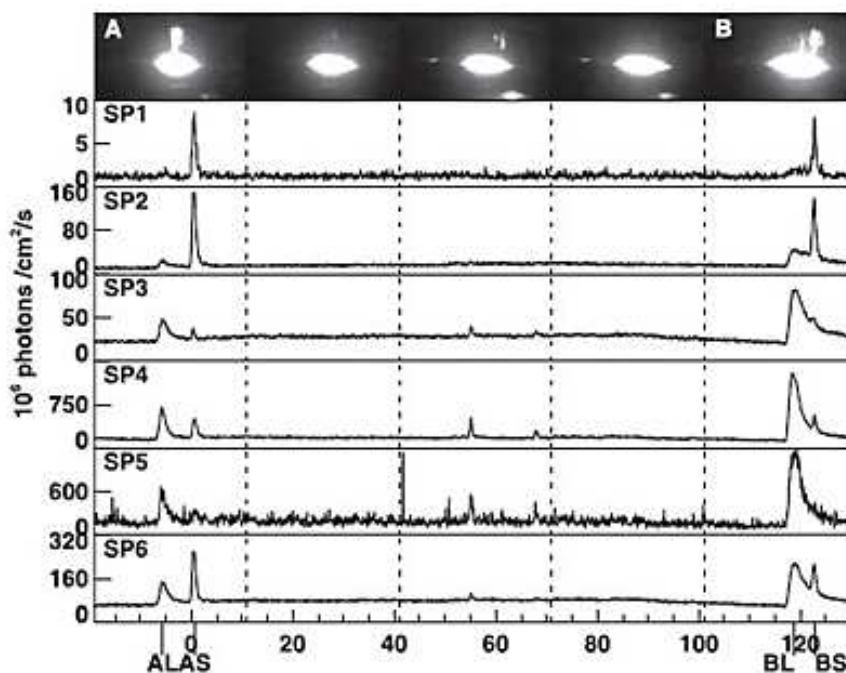


Рис. 1.5.5. Данные ISUAL об одном из спрайтов. Верхний ряд — видео кадры с длительностью 15 мс. Нижние ряды — данные о временном профиле события в различных спектральных каналах прибора

Комплекс приборов ISUAL за время работы зарегистрировал более 5000 различных типов транзиентных явлений, из которых 80% — эльфы, спрайты

и гало — около 20% и всего 13 гигантских струй. На рис. 1.5.6 показано географическое распределение спрайтов, эльфов, гало.

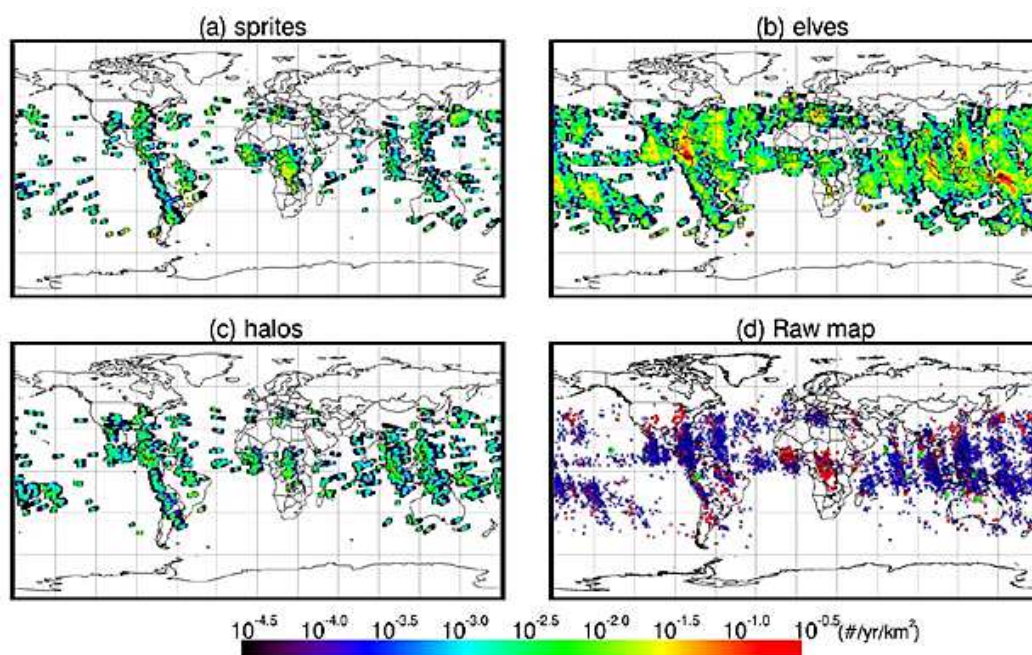


Рис. 1.5.6. Географическое распределение спрайтов, эльфов, гало

На всех рисунках видна схожая картина. Большая часть транзиентных явлений расположена над континентами, где частота молний, а значит и усиленных электрических полей, проявляется наиболее активно.

Одним из важных преимуществ ISUAL эксперимента к JEM – GLIMS эксперименту является точная идентификация ТАЯ.

## 2. МАЛЫЙ ЛИНЗОВЫЙ ТЕЛЕСКОП-СПЕКТРОМЕТР

Для дальнейшего изучения природы и спектра излучения молниевых разрядов и ТАЯ необходимо производить именно космические эксперименты. Это связано с тем, что, во-первых, верхняя атмосфера гораздо более разряжена, чем нижняя, и практически не изменяет спектр излучения от источника (ТАЯ) до детектора, и, во-вторых, детектор, установленный на ИСЗ, обладает большим полем зрения и совершает постоянное движение вокруг Земли, что позволяет производить регистрацию в разных районах и набирать большую статистику событий.

Кроме того, предыдущие спутники МГУ предоставили большое количество информации о свойствах ТАЯ, но в то же время возникли новые головоломки, которые могут быть решены только с помощью нового типа космического телескопа с возможностью измерений спектра.

В результате был разработан новый малый линзовый телескоп-спектрометр (МЛТ) для проекта Universat-SOCRAT, основанный на предыдущем опыте в производстве подобных систем в НИИЯФ МГУ. Этот детектор предназначен для мониторинга и измерения транзиентных атмосферных явлений с высоким (1 мкс) временным разрешением в ряде диапазонов длин волн. МЛТ обеспечит визуализацию событий, распределение энергии в спектре оптического излучения (от ближнего ультрафиолетового до ближнего инфракрасного диапазона) и временной профиль сигнала. Детектор состоит из двух основных частей:

- 1) Спектрометр
- 2) Телескоп

Трехмерная модель детектора показана на рис. 2.0.1. Размеры детектора составляют  $20 \times 20 \times 30$  см, общая потребляемая мощность около 10 Вт, а масса детектора не превышает 7,5 кг. Самая массивная часть – это алюминиевый короб, поэтому вес летной модели МЛТ может быть значительно уменьшен при использовании углепластика в механической конструкции. Входные окна телескопа и спектрометра расположены в направлении в надири и имеют черные бленды, которые защищают детектор от бокового освещения.

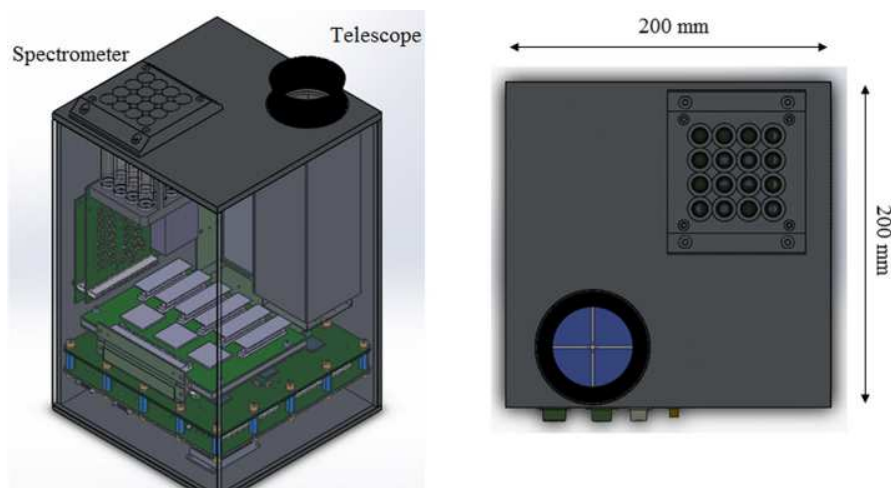


Рис. 2.0.1. Трехмерная модель МЛТ

Телескоп МЛТ основан на разработке прибора mini-EUSO (Capel et al. 2018) и представляет собой детектор с простейшей оптической системой, состоящей из одной линзы диаметром 5 см и фотоприемника. Линза имеет сферическую переднюю сторону (радиус кривизны равен 82,32 мм) и плоскую обратную сторону. Этот объектив обеспечивает в 50 раз большую чувствительность, чем детекторы на спутниках «Татьяна» и «Вернов» (возможно измерять ультрафиолетовые вспышки в атмосфере с количеством фотонов  $\sim 10^{15}$ ).

Фотоприемник телескопа МЛТ состоит из одной ячейки фотоприемника mini-EUSO (в mini-EUSO таких ячеек 9). Каждая ячейка является набором из четырех многоадных фотоэлектронных умножителей (МАФЭУ). Эти МАФЭУ расположены в фокальной плоскости линзы и каждый из них состоит из 64 пикселей. Каждый пиксель МАФЭУ имеет размер 3 мм, а фокусное расстояние оптической системы составляет 15 см. Для этой конфигурации разрешение телескопа составляет  $\sim 1^\circ$ , что обеспечивает пространственное разрешение на поверхности Земли  $\sim 10$  км при высоте спутниковой орбиты 500 км. Эти параметры приводят к наблюдаемой площади 25600 км<sup>2</sup> в атмосфере. Оптическая схема показана на рис. 2.0.2.

МАФЭУ работают в режиме счета фотонов, что обеспечивает высокую чувствительность детектора. Этот режим возможен благодаря использованию специализированных интегральных схем (ASIC) типа SPACIROC-3. SPACIROC-3 подсчитывает количество фотоэлектронов за временной интервал измерения (1 или 2.5 мкс). Эти временные интервалы определяют

временное разрешение телескопа детектора.

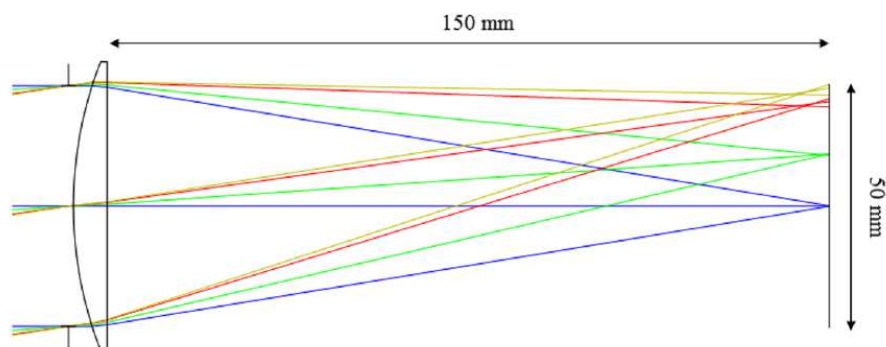


Рис. 2.0.2. Моделирование прохождения лучей в оптической системе МЛТ

Спектрометр состоит из 16 одноанодных ФЭУ Hamamatsu R1463, которые использовались в эксперименте ТУС [36] на борту спутника «Ломоносов» [37]. Эти ФЭУ составляют матрицу  $4 \times 4$ , и каждый ФЭУ имеет отдельный фильтр на входном окне. Это означает, что каждый ФЭУ измеряет излучение от всего поля зрения, но в указанном диапазоне длин волн. С помощью спектрометра МЛТ возможно будет:

- 1) провести классификацию ТАЯ по более сложному признаку, нежели было сделано в предыдущих экспериментах на космических аппаратах «Татьяна-2» и «Вернов». Выяснить долю событий, относящихся к известным типам высоко атмосферных разрядов, долю событий и спектральные особенности безмолниевых ТАЯ
- 2) отличить высоко атмосферные ТАЯ от обычных молниевых разрядов по спектральной линии поглощения  $O_2$  в атмосфере Земли (762 нм)
- 3) определить высоту развития разряда и его направление за счет динамики соотношения линий свечения в красном и УФ диапазонах длин волн и за счет использования телескопа

## 2.1. Использование ПЛИС в разработке МЛТ

Сердцем прибора является программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС). Прежде всего под ПЛИС понимаются микросхемы большой и сверхбольшой степени интеграции, которые разработчик может сам программировать, в отличие от ASIC (Application Specific Integrated Circuit). При программировании ПЛИС изменяется их внутренняя архитектура. Например, стандартные логические микросхемы выполняют заранее заложенные при их изготовлении функции, а ПЛИС может выполнять те функции, которые для нее определит программист. Современные ПЛИС допускают десятки тысяч перепрограммирований и неограниченное число раз конфигурирований.

По способу использования микроконтроллеры и ПЛИС мало чем отличаются друг от друга: и те и другие перед использованием необходимо программировать. Главное отличие микроконтроллеров от ПЛИС: при программировании микроконтроллер не изменяет свою архитектуру. После программирования микроконтроллера он последовательно выполняет команды, записанные в память. Причем выполнение одной команды может занимать несколько циклов процессора. ПЛИС в одном временном цикле параллельно обрабатывает некоторый объем данных, поступающих на все входы ПЛИС, поэтому быстродействие у ПЛИС намного больше чем у микроконтроллеров. Кроме того, каждый внешний вывод ПЛИС, за исключением небольшого числа выводов, является двунаправленным. Поэтому разработчику под ПЛИС предоставляется намного больше возможностей чем разработчику под микроконтроллеры. Естественно, цена и потребляемая мощность ПЛИС выше чем у микроконтроллеров. Поэтому функционально сложные и быстродействующие проекты реализуются на ПЛИС, а простые и не требующие высокого быстродействия – на микроконтроллерах.

На основе FPGA 7-й серии фирмой Xilinx производятся микросхемы семейства Zynq-7000, которые относятся к классу систем на кристалле (System on Chip). В устройствах Zynq-7000 процессорное ядро реализовано аппаратно. Основные параметры этих микросхем приведены ниже (таблица 2.1.1):

Таблица 2.1.1. Основные характеристики Zynq-7000

Процессор	Dual ARM Cortex-A9 MPCore
Частота	800 МГц
Кэш L1	32 Кбит команд и 32 Кбит данных
Кэш L2	512 Кбит
Встроенная память	256 Кбит
Каналы DMA	4

Модель архитектуры Zynq представлена на рисунке 2.1.1. Стоит обратить внимание, что Zynq состоит из двух основных частей: процессорной системы (PS), которая сформирована на двухъядерном процессоре ARM Cortex-A9, и программируемой логики (PL), которая базируется на FPGA. Эта система также имеет встроенную память, различные периферийные устройства и высокоскоростные интерфейсы.

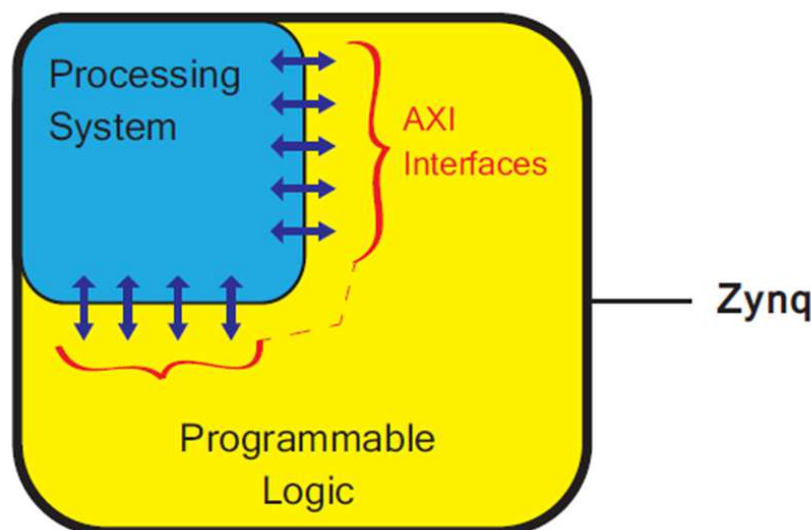


Рис. 2.1.1. Модель архитектуры Zynq

Блок PL идеален для реализации высокоскоростных подсистем потоков данных, в то время как блок PS поддерживает программное обеспечение и

операционные системы. Это означает, что общая функциональность любой спроектированной системы может быть распределена между аппаратным и программным обеспечением. Связь между блоками PL и PS устанавливается с помощью шины AXI (Advanced eXtensible Interface).

На основе системы на кристалле (Zynq - 7000) и ПЛИС (Artix-7) реализуется блок цифровой обработки данных прибор МЛТ. Блок-схема прибора показана на рисунке 2.1.2.

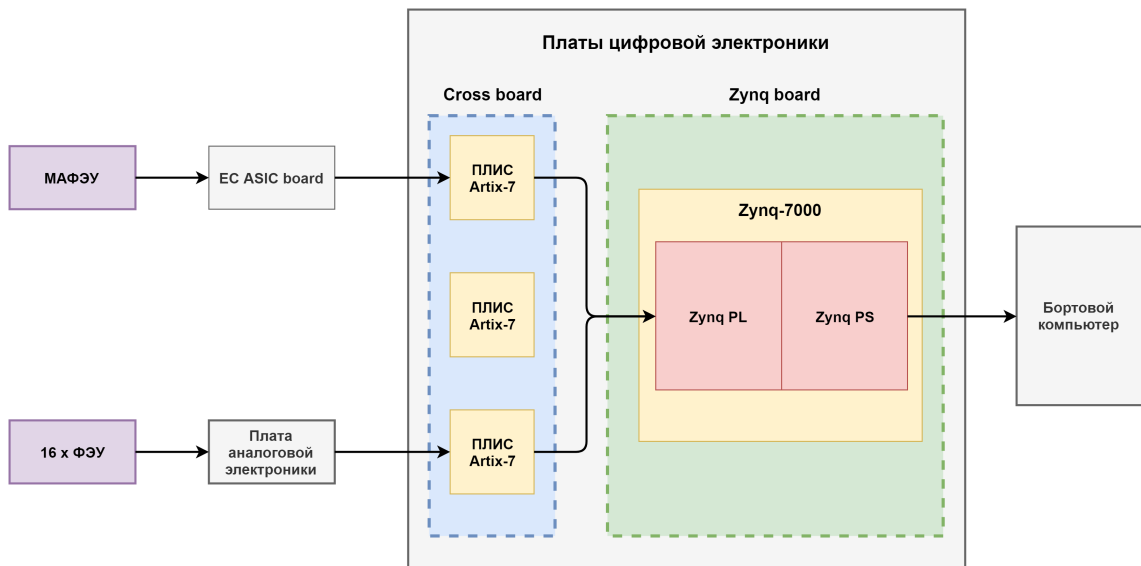


Рис. 2.1.2. Блок-схема МЛТ

Блок цифровой обработки данных разработан в рамках проекта mini-EUSO. Электроника и алгоритмы работы спектрометра являются предметом данной работы. Рассмотрим их подробнее.

## 2.2. Спектрометр: электрические схемы и алгоритмы работы

Электроника спектрометра МЛТ (блок обработки сигнала) предназначена для отбора полезных событий и обеспечения осциллографической записи событий типа ТАЯ, регистрируемых 16-ю фотоэлектронными умножителями с минимально возможным временным разрешением 1 мкс и с возможностью увеличения временного шага за счет цифрового интегрирования сигнала. Схема блока обработки данных приведена на рис. 2.2.1. Каждый ФЭУ является одним каналом спектрометра.

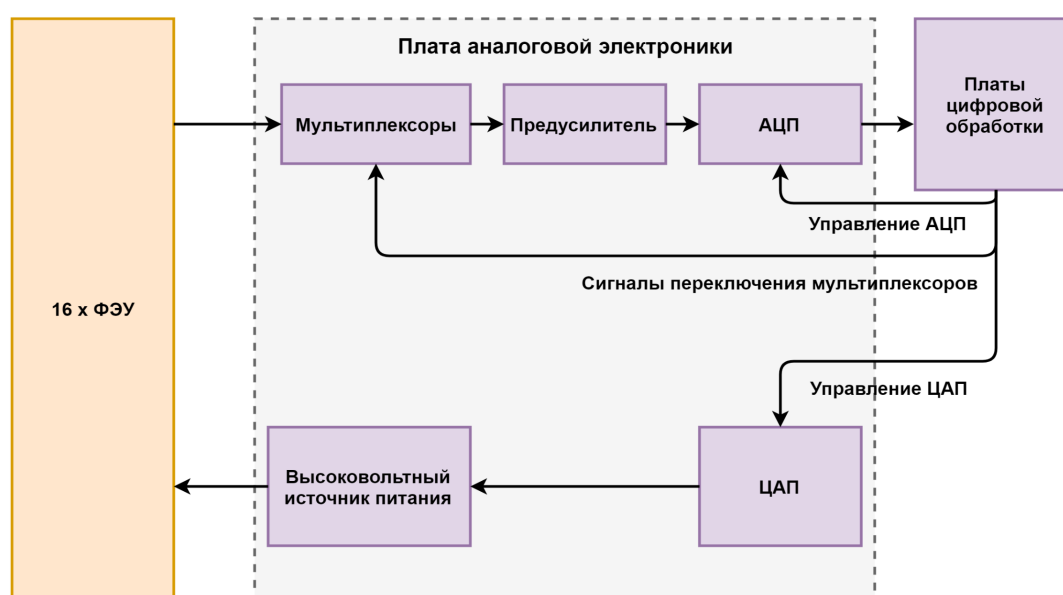


Рис. 2.2.1. Блок-схема формирования и обработки сигналов МЛТ

Сигналы с ФЭУ через мультиплексоры (AD8184) поступают на предусилитель и, далее, на вход 10-битного АЦП (AD9203). Применение мультиплексоров в данном приборе позволило избежать использования 16 АЦП, к недостаткам которых можно отнести высокое тепловыделение, а также большую стоимость.

В приборе реализовано автоматическое управление чувствительностью ФЭУ (коэффициентом усиления) за счет регулировки высокого напряжения при изменении уровня фоновой засветки детектора (система АРУ). АРУ является системой обратной связи, при увеличении освещенности происходит автоматическое уменьшение высокого напряжения, что приводит к уменьшению чувствительности ФЭУ и сохранению постоянного тока на его ано-

де.

Блок цифровой обработки сигналов (блок ЦОС) реализован на ПЛИС (ZYNQ-7000 и Artix-7), которые расположены на разных платах цифровой электроники рис. 2.1.2, является центральным узлом управления. Блок ЦОС выполняет следующие функции:

- 1) Прием 16 каналов спектральных данных с блока АЦП (Artix-7)
- 2) Переключение мультиплексоров (Artix-7)
- 3) Формирование пакетов данных (Artix-7)
- 4) Формирование пакетов данных для их записи в память (ZYNQ-7000)
- 5) Запись данных в память (ZYNQ-7000)
- 6) Управление ЦАП (ZYNQ-7000)
- 7) Автоматизированное управление высоким напряжением (ZYNQ-7000)
- 8) Триггеры отбора событий (ZYNQ-7000)
- 9) Отправление данных по COM-порту (ZYNQ-7000)
- 10) Отправление данных по Ethernet (ZYNQ-7000)

Также при использовании алгоритмов ЦОС блок осуществляет предварительную обработку сигнала в реальном времени на скорости получения данных. Предварительная обработка заключается в обнаружении сигнала на фоне шума (триггер) и запуске процесса записи на внешнюю систему хранения. Для обеспечения возможности сохранения сигнала до срабатывания триггера в блоке ЦОС реализовано быстродействующее ОЗУ размером 1 Гбайт, осуществляющее циклическую запись входного потока данных.

Данные, полученные с АЦП, проходят предварительную обработку и отправляются в систему хранения по Ethernet 10/100/1000BASE-T на скорости 1000 Гб/с. Совокупный поток данных с АЦП составляет  $10^3 \text{ мкс}^{-1} \times 10 \text{ бит} \times 16 \text{ каналов} = 160 \text{ Кбит/с}$ .

На матрице ФЭУ будет находиться 16 светофильтров, подобранных исходя из физических задач наблюдения ТАЯ. Параметры фильтров приведены в таблице 2.2.1. Каждый фильтр будет расположен над одним ФЭУ.

Таблица 2.2.1. Диапазоны измерения длин волн анализатора спектра для 16-ти каналов

№	Длины волн, нм	Примечания
1	200 – 400	Для сравнения со спутниками МГУ («Татьяна-1», «Татьяна-2», «Вернов») есть доля в красной области
2	> 600	
3	270 – 380	
4	$762.7 \pm 5$	«спрайт» — линия поглощения кислорода, от молнии не должно доходить
5	$777.4 \pm 5$	«молния» — самая яркая линия в молнии, используют в детекторе LIS
6	500.1	яркая линия в молнии + точно отсутствует в спектре спрайта
7	$337 \pm 5$	2PN — признак небольшой высоты события (т.к. самое короткое время высвечивания). Должна отсутствовать в молнии – по данным ISUAL
8	391.4	$1N^+$ — линия ионизированного молекулярного азота
9	427.8	$N_2^+$ — линии (встречаются в спектре авроры), признак присутствия источника ионизации (потoki частиц, высокая температура)
10	470.9	
11	690	Meinel band — показатель высокой энергии электронов и высоты события, т.к. время высвечивания велико: 14 us (высота тушения 85 – 90 км)
12	388.3	Излучение CN — спектральная линия молнии с постоянным током (мониторинг молний, которые могут вызывать лесные пожары)
13	399.8	$N_22P(1, 4)$ проанализирована в работе [38] в сравнении с линиями 427.8 нм и 470.9 нм

Продолжение на следующей странице

Таблица 2.2.1 – Продолжение с предыдущей страницы

№	Длины волн, нм	Примечания
14	294	линии системы $N_2(VK)$ – самое долгое время высвечивания (более 2 с), высота эффективного
15	313	тушения 145 км – показатель самых высоких событий
16	без светофильтра	Регистрация полного излучения молнии или ТАЯ

## Обратная связь через цифро-аналоговый преобразователь для автоматической регулировки высокого напряжения

Для осуществления высоковольтного питания ФЭУ выбран источник PHV 12 – 2.0K2500N фирмы TRACO. Этот источник обеспечивает стабильное выходное напряжение (5 %) в диапазоне от 0 до 2 кВ (для питания ФЭУ необходимо от 0.5 кВ до 1.2 кВ в зависимости от уровня освещенности) и ток нагрузки 2.5 мА.

Установка требуемого напряжения на источнике питания реализовано с помощью ЦАП (AD7303). По интерфейсу SPI ПЛИС цифровой части электроники передает значение кода выходного напряжения в диапазоне 0 – 255, что соответствует выходному напряжению ЦАП 0 – 3.0 В. В свою очередь, 3.0 В определяет максимальное высокое напряжение на ФЭУ. Зависимость высокого напряжения от кода ЦАП показана на рис. 3.6.

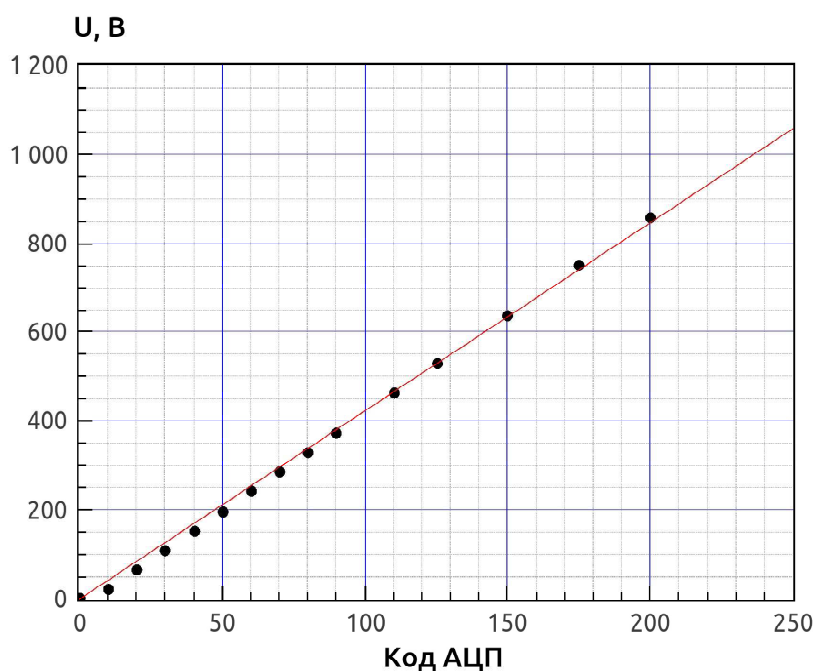


Рис. 2.2.2. Зависимость высокого напряжения от кода ЦАП

Модуль ЦАП представлен микросхемой AD7303 с двумя выходами. Данная микросхема предназначена для цифрового управления выходным напряжением. Интерфейс, по которому происходит управление ЦАП – SPI. Распиновка ЦАП представлена на рис. 2.2.3, назначение каждого контакта приведено в таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.2. Распиновка ЦАП AD7303

№ пина	Название пина	Назначение
1	$V_{out A}$	Аналоговый выход $A$ напряжения ЦАП
2	$V_{DD}$	Вход питания. Эти входом можно управлять максимальным выходным напряжением ЦАП, подавая напряжение в пределах от 2.7 В до 5.5 В
3	$GND$	Земля
4	$REF$	Пин для подачи внешнего опорного напряжения. При использовании внутреннего источника опорного напряжения, внешнее напряжение не должно быть подключено к $REF$ пину.
5	$SCLK$	Пин тактирования. Данные могут быть переданы на скоростях до 30 МГц.
6	$DIN$	Вход для передачи 16 битных последовательных данных
7	$\overline{SYNC}$	Инверсный вход для управления передачи данных
8	$V_{out B}$	Аналоговый выход $B$ напряжения ЦАП

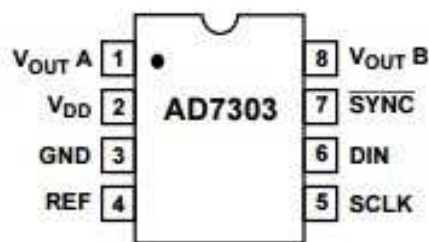


Рис. 2.2.3. Вид микросхемы AD7303

На рис. 2.2.4. показан временная диаграмма для передачи данных по SPI

протоколу. Данный интерфейс был разработан и реализован на языке VHDL (язык программирования микросхем XILINX).

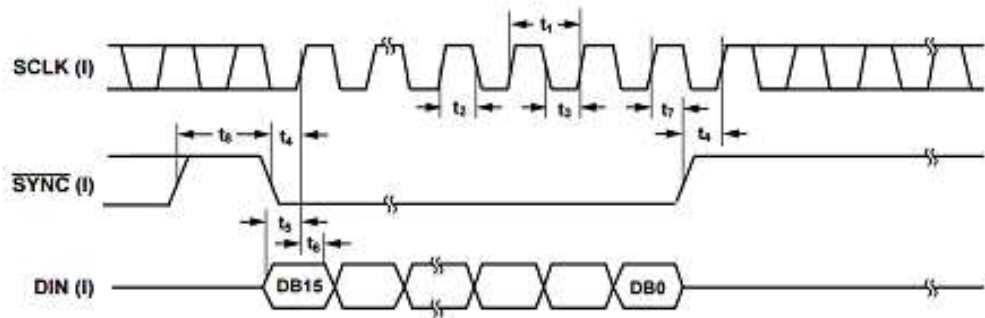


Рис. 2.2.4. Временная диаграмма для передачи 16 бит данных по SPI протоколу

На рис. 2.2.5. показана временная диаграмма, смоделированная в Test Bench (программной системе проверки реализации алгоритмов программирования цифровых сигналов ПЛИС) по передаче числа, увеличивающегося от 0 до 255 на единицу на каждом такте  $clk$ , на выход А.

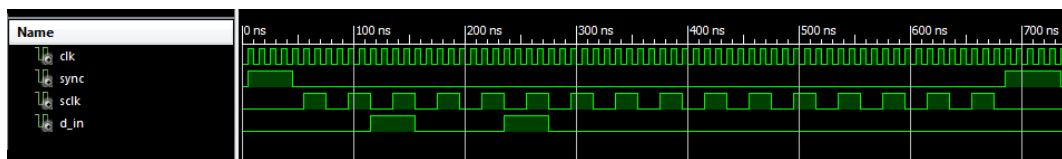


Рис. 2.2.5. Временная диаграмма для передачи 16 бит данных по SPI протоколу

Этот алгоритм был загружен в ПЛИС спектрометра. На рис. 2.2.6 представлена осциллограмма изменяющегося на выходе ЦАП напряжения по алгоритму, заданному ПЛИС (для примера реализовано и продемонстрировано пилообразное изменение).

Для управления высоким напряжением в приборе реализован следующий алгоритм. За время  $T$  происходит расчет среднего значения  $A_{HV}$  по всей матрице ФЭУ (есть возможность считать только по тем ФЭУ, которые работают в данный момент – т.е., например, если установлены только ФЭУ 0,1,2,3 – среднее рассчитывается по этим четырем ФЭУ). Затем устанавливается пороговое значение  $A_0$ , если рассчитанное среднее  $A_{HV}$  превышает  $A_0$ , то код высокого уменьшается на 1, если меньше – то увеличивается на 1. В случае если код равен 255, то ничего не прибавляется, т.к. произойдет



Рис. 2.2.6. Осциллограмма выходного напряжения ЦАП в ходе тестирования модуля управления высоким напряжением МАФЭУ (пример пилообразного сигнала)

переполнение и код станет равен 0, в случае если код равен 0 – ничего не отнимается. Такой простой алгоритм позволяет удерживать выходной сигнал с ФЭУ на уровне  $A_0$  при стационарном фоне (отсутствии ярких вспышек).

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СПЕКТРОМЕТРА МЛТ

#### 3.1. Проверка работы системы автоматической регулировки управления высоким напряжением

Прежде чем работать со спектрометром необходимо проверить правильность работы алгоритма управления высоким напряжением. Эта проверка происходила в два этапа: без ФЭУ (сигнал имитировался с помощью генератора) и с ФЭУ.

Рисунок 3.1.1 отображает работу алгоритма управления высоким напряжением. Сигнал, в виде медленной синусоиды, подается с генератора на один из каналов мультиплексоров. Благодаря этому иммитируется сигнал, который приходит с ФЭУ, что позволяет проверить алгоритм управления высоким напряжением.

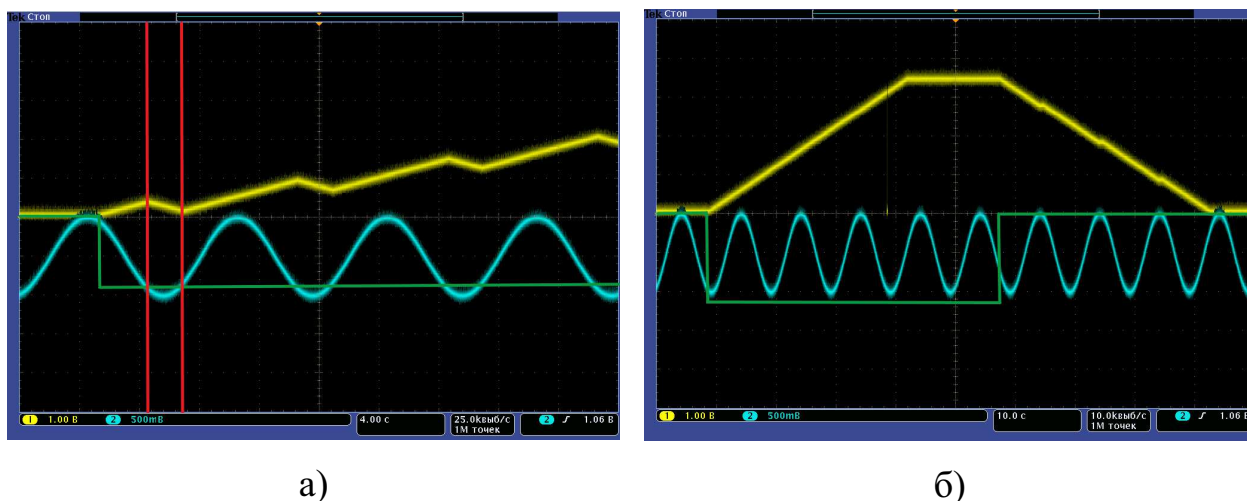


Рис. 3.1.1. Результат работы алгоритма управления высоким напряжением. Синим показан сигнал с генератора, желтым – сигнал на выходе ЦАП. Зеленая линия показывает установленный порог. а) Порог  $A_0 = 400$  в кодах АЦП; б) При возрастании сигнала на выходе ЦАП порог  $A_0 = 600$  в кодах АЦП, затем порог был изменен до значения  $A_0 = 0$  в кодах АЦП

На рисунке 3.1.1 а) сигнал на выходе ЦАП, управляющий источником высокого напряжения (сигнал на выходе ЦАП обозначен желтым цветом) начинает возрастать до тех пор пока сигнал, подаваемый с генератора (сигнал с генератора обозначен синим цветом), меньше порога (порог обозначен зе-

ленным цветом). Как только сигнал с генератора превышает порог, сигнал на выходе ЦАП начинает уменьшаться. Аналогично для рисунка 3.1.1 б).

На рисунке 3.1.2 показана работа алгоритма управления источником высоковольтного напряжения при подключении к прибору четырех ФЭУ. В данном случае ФЭУ освещаются с помощью светодиода, поток УФ излучения контролируется при помощи калиброванного фотодиода и измерителя мощности фирмы Ophir. Для наглядности на один график нанесены зависимости кода АЦП  $N_{ADC}$  от мощности излучения  $W$ , регистрируемой каждым из четырех ФЭУ и зависимость кода ЦАП  $M$  от мощности излучения, регистрируемой всеми ФЭУ. Можно отметить, что пока ФЭУ находится «в тени» (освещенность мала) и код АЦП не достиг установленного порога, код ЦАП не меняется и равен 255, т.е. ФЭУ работают с максимальным усилением. При засветке ФЭУ код АЦП достигает порога, а код ЦАП начинает уменьшаться, причем нелинейно. Можно сделать заключение, что алгоритм управления высоким напряжением при включенных ФЭУ работает верно: удерживает значения выходного сигнала на уровне заданного порога.

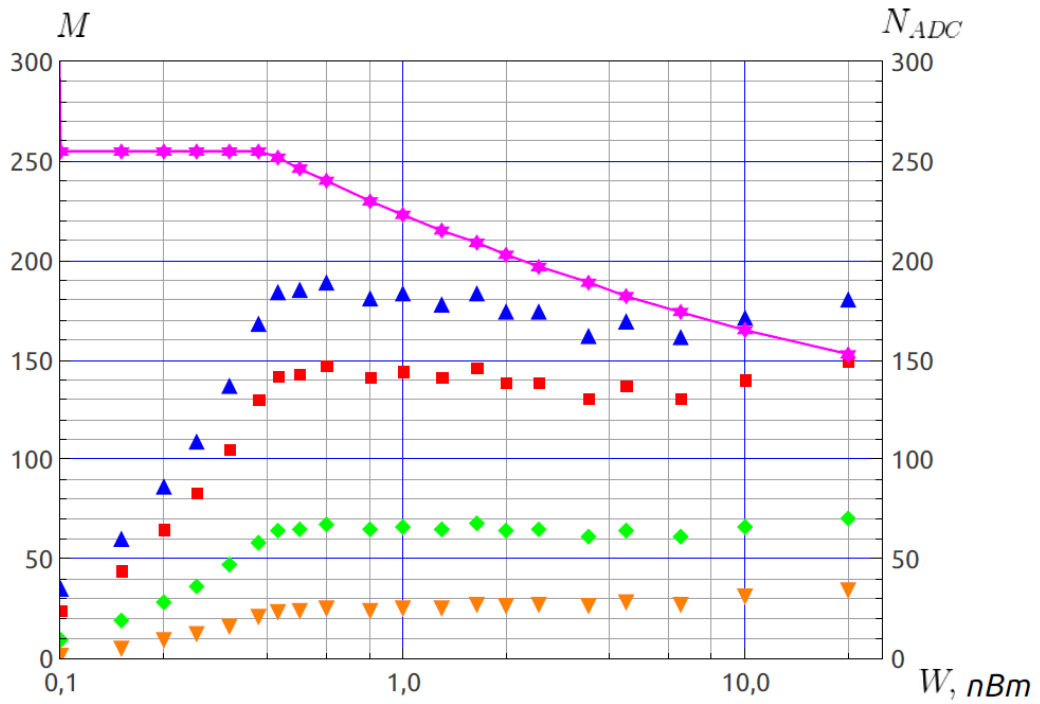


Рис. 3.1.2. Работа алгоритма управления источником высоковольтного напряжения при подключении к прибору четырех ФЭУ. Оранжевым отмечен график зависимости кода ЦАП от мощности излучения, регистрируемой всеми ФЭУ. Зеленым – график зависимости кода АЦП от мощности излучения для ФЭУ 2; черным – график зависимости кода АЦП от мощности излучения для ФЭУ 4; красным – график зависимости кода АЦП от мощности излучения для ФЭУ 3; синим – график зависимости кода АЦП от мощности излучения для ФЭУ 1;

### 3.2. Калибровка спектрометра

Следующий важный шаг в подготовке детектора к работе – калибровка фотоэлектронных умножителей, т.е. определение их коэффициентов усиления и установки пересчета кодов АЦП в количество зарегистрированных фотонов.

Схема эксперимента показана на рис. 3.2.1. Все ФЭУ помещаются в темные кожухи, чтобы минимизировать случайное попадание света извне. Контроль освещенности ФЭУ осуществляется с помощью измерителя мощности и калиброванного фотодиода (NIST) фирмы Ophir. ФЭУ намного чувствительнее чем используемый в эксперименте фотодиод, поэтому перед каждым ФЭУ были установлены коллиматоры, уменьшающие эффективную площадь ФЭУ до  $\sim 1 \text{ мм}^2$ . Перед установкой, на расстоянии 400 мм, находится светодиод, который равномерно освещает все элементы установки, которые, в свою очередь, помещаются в черный короб. В короб свет снаружи практически не попадает о чем свидетельствует показание фотодиода (0.01 нВт).

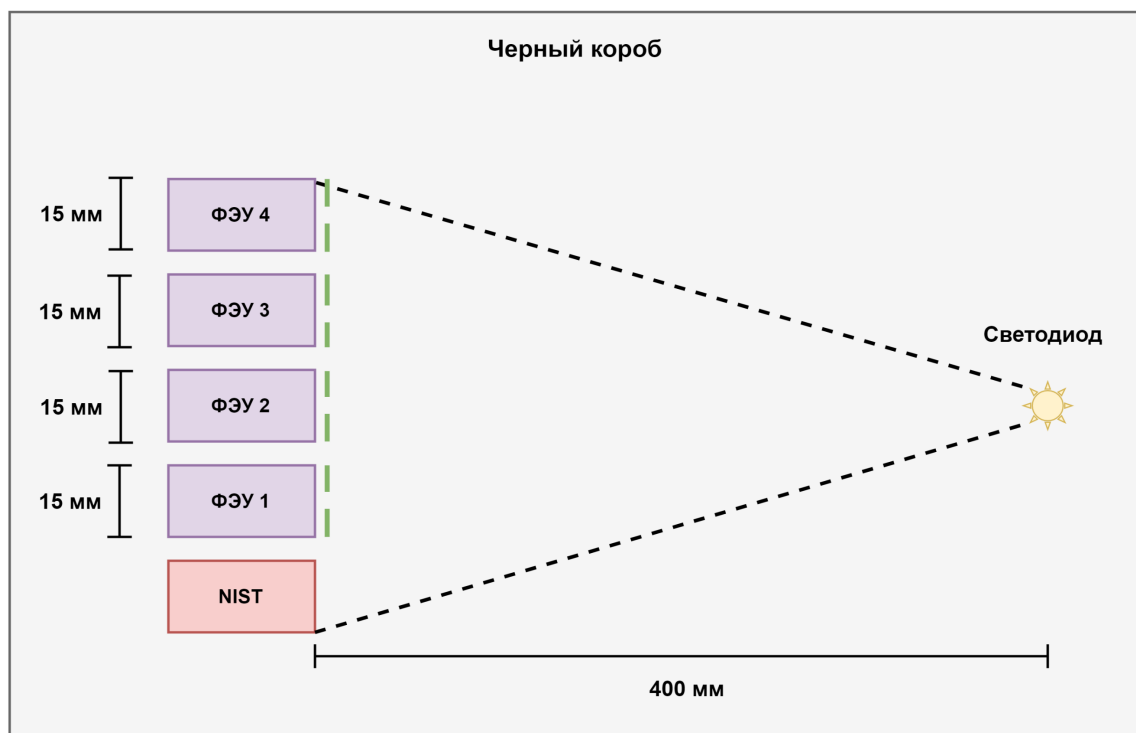


Рис. 3.2.1. Схема эксперимента. Зеленым отмечены коллиматоры, которые установлены вплотную к ФЭУ

Т.к. перед ФЭУ установлены коллиматоры, то интенсивность попадающая на каждый элемент установки прямо пропорциональна площади на которую падает свет от источника. С помощью фотодиода можно измерить мощность попадающего на него излучения. В свою очередь, мощность излучения прямо пропорциональна интенсивности излучения. Следовательно:

$$W = W_0 \cdot \frac{S_{PMT}}{S_{NIST}} \quad (3.2.1)$$

где  $W_0$  – мощность излучения регистрируемая фотодиодом;

$W$  – мощность излучения которая попадает на соответствующий ФЭУ;

$S_{NIST}$  – площадь активной области фотодиода;

$S_{PMT}$  – площадь коллиматора перед ФЭУ

Коллиматоры перед ФЭУ имеют диаметр  $d = 1$  мм. Площадь окна фотодиода  $144 \text{ мм}^2$ . Соответственно:

$$\frac{S_{PMT}}{S_{NIST}} = \frac{\pi d^2}{4 \cdot S_{NIST}} \quad (3.2.2)$$

В таблице 3.2.1 приведены измеренные мощности излучения светодиода  $W_{PMT}$ , зарегистрированные определенными ФЭУ, а также геометрическое отношение площадей.

Таблица 3.2.1. Калибровка ФЭУ с коллиматорами

$W_{NIST}$	4.2				мкВт
$W_{PMT}$	10	11	7.0	7.5	нВт
$\frac{S_{PMT}}{S_{NIST}}$	5.45				$\times 10^{-3}$

## Калибровка ФЭУ спектрометра при максимальном усилении

Как было сказано выше, в память спектрометра записываются осциллограммы сигналов, снимаемых с анодов ФЭУ, в течении 1024 мкс. Для того чтобы построить график зависимости кода АЦП ( $N_{ADC}$ ) от числа фотонов ( $N_{ph}$ ) при фиксированном напряжении необходимо рассчитать среднее значение  $\bar{N}_{ADC}$ , стандартное отклонение  $\sigma_{ADC}$  и пересчитать мощность излучения, регистрируемую каждым ФЭУ, в число фотонов. Для вычисления числа фотонов, регистрируемых ФЭУ, необходимо разделить мощность излучения, которое регистрирует ФЭУ на энергию одного фотона. Длина волны светодиода равна 375 нм ( $\lambda = 375$  нм).

$$N_{ph} = \frac{W \cdot \Delta t}{h\nu} = \frac{W \cdot \lambda \Delta t}{hc} \quad (3.2.3)$$

В таблице 3.2.2 приведены среднее значение  $\bar{N}_{ADC}$ , стандартное отклонение  $\sigma_{ADC}$ , а также число фотонов регистрируемое каждым ФЭУ за одну секунду.

По данным таблицы 3.2.2 построим графики зависимости кода АЦП ( $N_{ADC}$ ) от числа фотонов ( $N_{ph}$ ) при фиксированном напряжении для всех ФЭУ (рис. 3.2.2). Видна линейная зависимость кода АЦП от мощности излучения, что означает, что ФЭУ работают в нормальном режиме.

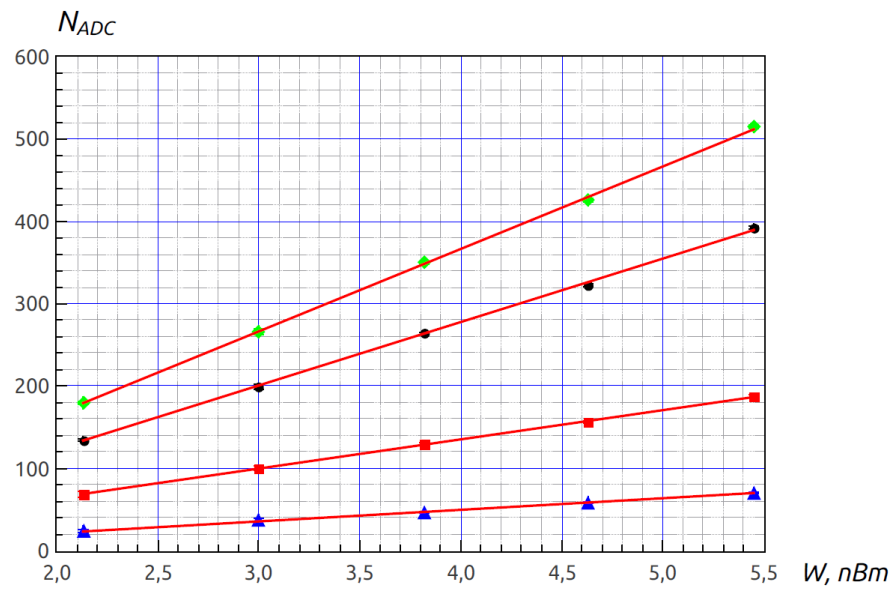


Рис. 3.2.2. Зависимость кода АЦП от мощности излучения, зарегистрированным определенным ФЭУ. Зеленные точки – ФЭУ2; черные точки – ФЭУ4; красные точки – ФЭУ3; синие точки – ФЭУ1

Таблица 3.2.2. Данные для четырех ФЭУ

	ФЭУ 1	ФЭУ 2	ФЭУ 3	ФЭУ 4	$W_{NIST}$ , нВт
$W$ , пВт	2.13	2.13	2.13	2.13	0.39
$N_{ph}$ , $10^6$	4.01	4.01	4.01	4.01	
$\bar{N}_{ADC}$	23.3	179.4	68.2	134.3	
$\sigma_{ADC}$	1.838	1.900	3.492	1.138	
$W$ , пВт	3.00	3.00	3.00	3.00	0.55
$N_{ph}$ , $10^6$	5.65	5.65	5.65	5.65	
$\bar{N}_{ADC}$	37.2	265.9	100.1	198.7	
$\sigma_{ADC}$	2.056	3.780	2.518	3.218	
$W$ , пВт	3.82	3.82	3.82	3.82	0.70
$N_{ph}$ , $10^6$	7.19	7.19	7.19	7.19	
$\bar{N}_{ADC}$	46.3	350.0	129.5	263.7	
$\sigma_{ADC}$	0.849	1.572	1.413	1.284	
$W$ , пВт	4.63	4.63	4.63	4.63	0.85
$N_{ph}$ , $10^6$	8.73	8.73	8.73	8.73	
$\bar{N}_{ADC}$	58.6	425.8	156.5	322.6	
$\sigma_{ADC}$	0.914	1.890	1.335	1.911	
$W$ , пВт	5.45	5.45	5.45	5.45	1.00
$N_{ph}$ , $10^6$	10.28	10.28	10.28	10.28	
$\bar{N}_{ADC}$	70.0	514.9	187.6	392.8	
$\sigma_{ADC}$	0.820	2.316	1.689	1.866	

Расчитаем коэффициент усиления ФЭУ. Сигнал с анода ФЭУ поступает на  $RC$ -цепочку (рис. 3.2.3). Так как у нас стационарный сигнал, то ток пойдет через резистор.

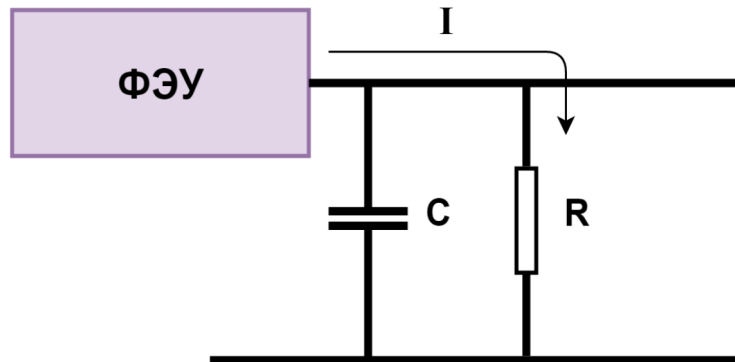


Рис. 3.2.3. Стационарный сигнал, снимаемый с анода ФЭУ

Напряжение на резисторе с одной стороны можно найти из з. Ома, а с другой стороны его можно выразить через код АЦП ( $N_{ADC}$ ).

$$U = I \cdot R = \alpha \cdot N_{ADC} \quad (3.2.4)$$

где  $\alpha = 1/512$  – коэффициент пересчета кода АЦП в напряжение.

Ток, по определению:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (3.2.5)$$

С другой стороны его можно выразить из 3.2.4. Таким образом:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\alpha \cdot N_{ADC}}{R} \quad (3.2.6)$$

Заряд на аноде можно выразить через число фотоэлектронов на фотокатоде  $N_{p.e.}$ . В свою очередь,  $N_{p.e.}$  связано с числом фотонов  $N_{ph}$  через коэффициент пропорциональности  $p$ . Этот коэффициент называется квантовой эффективностью ФЭУ и для ФЭУ, используемых в спектрометре,  $p \sim 0.2$ .

$$\Delta q = eGN_{p.e.} = peGN_{ph} \quad (3.2.7)$$

где  $G$  – коэффициент усиления ФЭУ.

Мощность падающего излучения на ФЭУ можно выразить следующим образом:

$$W = \frac{E}{\Delta t} = \frac{N_{ph} \cdot \frac{hc}{\lambda}}{\Delta t} \quad (3.2.8)$$

Решая систему из уравнений 3.2.6 – 3.2.8 можно найти коэффициент усиления  $G$ :

$$G = \frac{\alpha \cdot N_{ADC}}{R} \frac{hc}{eWp\lambda} \quad (3.2.9)$$

Учитывая, что сопротивление резистора анодной цепи каждого ФЭУ 20 кОм, найдем коэффициенты усиления при определенном значении  $N_{ADC}$  из таблицы 3.2.2 используя формулу 3.2.9 (таблица 3.2.3).

Таблица 3.2.3. Коэффициенты усиления для всех ФЭУ

	ФЭУ 1	ФЭУ 2	ФЭУ 3	ФЭУ 4
$W$ , пВт	3.82	3.82	3.82	3.82
$\bar{N}_{ADC}$	37.2	265.9	100.1	198.7
$G$ , $10^6$	20.0	142.8	53.8	106.7

Стоит отметить, что полученные коэффициенты усиления для ФЭУ завышенны. С учетом тестирования электроники, завышенные значения  $G$ , возможно, связаны с тем, что реальная площадь фотодиода, который непосредственно регистрирует излучение, на несколько порядков меньше площади окна фотодиода.

Таким образом, зная коэффициент усиления и код АЦП можно сигнал перевести в количество фотонов, зарегистрированных спектрометром. Для стационарного сигнала формула перевода выглядит следующим образом:

$$N_{ph} = \frac{\lambda \cdot N_{ADC}}{R} \frac{\Delta t}{epG} \quad (3.2.10)$$

## Калибровка ФЭУ спектрометра в импульсном режиме

При подаче импульсного сигнала на ФЭУ (рис. 3.2.4), на аноде также будет формироваться сигнал в виде импульса (рис. 3.2.5).



Рис. 3.2.4. Импульсный сигнал, подаваемый на светодиод. Период сигнала 400 мкс

Далее импульс попадет на  $RC$ -цепочку. Конденсатор зарядится до напряжения  $U$ . С другой стороны напряжение можно выразить через код АЦП ( $N_{ADC}$ ).

$$U = \frac{\Delta q}{C} = \alpha \cdot N_{ADC} \quad (3.2.11)$$

где  $\alpha = 1/512$  – коэффициент пересчета кода АЦП в напряжение.

Как уже говорилось выше, заряд на аноде можно выразить через число фотоэлектронов на фотокатод  $N_{p.e.}$ . В свою очередь,  $N_{p.e.}$  связан с числом фотонов  $N_{ph}$  квантовой эффективностью  $p \sim 0.2$ .

$$\Delta q = e\tilde{G}N_{p.e.} = pe\tilde{G}N_{ph} \quad (3.2.12)$$

где  $\tilde{G}$  – коэффициент усиления ФЭУ в импульсном.

Мощность падающего излучения на ФЭУ можно выразить следующим образом:

$$W = \frac{E}{\Delta t} = \frac{N_{ph} \cdot \frac{hc}{\lambda}}{\Delta t} \quad (3.2.13)$$

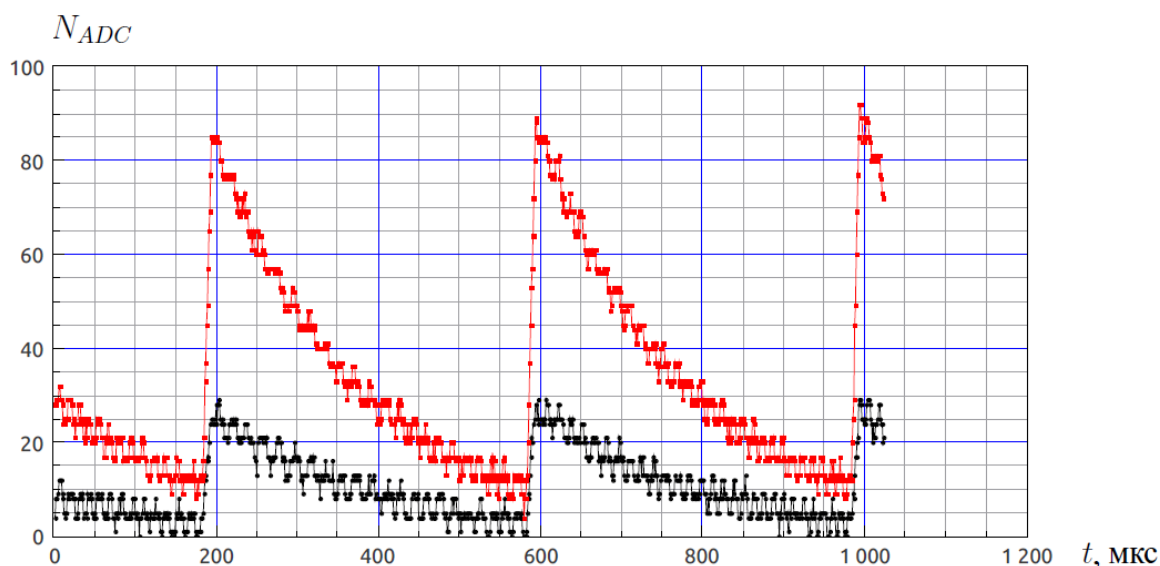


Рис. 3.2.5. Сигнал, снимаемый с анода ФЭУ. Красный – анод ФЭУ2; Черный – анод ФЭУ4

Решая систему из уравнений 3.2.11 – 3.2.13 можно найти коэффициент усиления  $G$ :

$$\tilde{G} = \alpha \cdot N_{ADC} \cdot C \frac{hc}{eWp\lambda\Delta t} \quad (3.2.14)$$

Таким образом, зная коэффициент усиления и код АЦП в импульсном режиме, можно сигнал перевести в количество фотонов, зарегистрированных спектрометром.

$$N_{ph} = \frac{\lambda \cdot N_{ADC} \cdot C}{pe\tilde{G}} \quad (3.2.15)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной работы был произведен обзор существующих экспериментальных данных по типам высоко атмосферных транзиентных явлений, спектров ТАЯ и молниевых разрядов и выполнена следующая работа по созданию спектрометра МЛТ:

- 1) Разработаны и реализованы на языке VHDL программирования ПЛИС (в PL части) алгоритмы управления различными системами спектрометра МЛТ: мультиплексоры, ЦАП и АЦП. Экспериментально проверена правильность работы алгоритмов управления и сбора информации.
- 2) В процессорной части (PS) Zynq-7000 реализованы на языке C и экспериментально протестированы алгоритмы записи данных в память
- 3) Реализован и экспериментально проверен алгоритм автоматической регулировки источника высокого напряжения
- 4) Проведена калибровка четырех каналов спектрометра для стационарного сигнала.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Franz R., Nemzek R., Winckler J. Television image of a large upward electric discharge above a thunderstorm system // *Science*. 1990. Vol. 249. P. 48–51.
2. Raizer Y., Milikh G., Shneider M. Leader–streamers nature of blue jets // *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. 2007. Vol. 69. P. 925–938.
3. Pasko V., Inan U., Bell T. Blue jets produced by quasioleostatic pre–discharge thundercloud fields // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. P. 301–304.
4. Pasko V. Theoretical modeling of Sprites and Jets, in: *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges* // NATO science series. 2006. Vol. 225. P. 255–311.
5. McHarg M., Stenbaek-Nielsen H., Kanmae T. Observations of streamer formation in sprites // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34.
6. Sentman D., Wescott E., et al. Preliminary results from Sprite94 aircraft campaign: 1. Red Sprites // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22. P. 1205–1208.
7. Mende S., Rairden R., Swenson G. Sprite Spectra; N2 1 PG band identification // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22. P. 2633–2636.
8. Yair Y. Observations of transient luminous events from earth orbit // *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*. 2006. Vol. 126. P. 244–249.
9. Pasko V., Inan U., Bell T. Sprites as luminous columns of ionization produced by quasioleostatic thundercloud fields // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. P. 649–652.
10. Pasko V. Blue jets and gigantic jets: transient luminous events between thunderstorm tops and the lower ionosphere // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 2008. Vol. 50, no. 12.
11. Su H., Hsu R., et al. Gigantic jets between a thundercloud and the ionosphere // *Nature*. 2003. Vol. 423. P. 974–976.

12. Fukunishi H., Takahashi Y., Kubota M. Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. P. 2157–2160.
13. Surkov V., Hayakawa M. Underlying mechanisms of transient luminous events: a review // *Annales Geophysicae*. 2012. Vol. 30. P. 1185–1212.
14. Marshall R., Inan U., Glukhov V. Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 115.
15. Taranenko Y. N., Inan U. S., Bell T. The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: Excitation of optical emissions // *Geophysical Research Letters*. 1993. Vol. 20. P. 2675–2678.
16. Aleksandrov N., Bazelyan E., et al. The ionization kinetics and electric field in the leader channel in long air gaps // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1997. Vol. 30, no. 11. p. 1616.
17. Yue J., Sharon L., et al. Concentric gravity waves in the mesosphere generated by deep convective plumes in the lower atmosphere near Fort Collins, Colorado // *Journal of Geophysical Research*. 2009. Vol. 114.
18. Orville R., Richard E., Henderson W. Absolute Spectral Irradiance Measurements of Lightning from 375 to 880 nm // *Journal of the Atmospheric Science*. 1984. Vol. 41. P. 3180–3187.
19. Milikh G., Valdivia J., Papadopoulos K. Model of red sprite optical spectra // *Geophysical Research Letters*. 1997. Vol. 24. P. 833–836.
20. Sentman D., Wescott E., et al. Preliminary results from the Sprites94 Aircraft Campaign: 1. Red sprites // *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22. P. 1205–1208.
21. Hampton D., Wescott E., et al. Optical spectral characteristics of sprites // *Geophysical Research Letters*. 1996. Vol. 23. P. 89–92.
22. Fishman G., Bhat P., et al. Discovery of Intense Gamma-Ray Flashes of Atmospheric Origin // *Science*. 1994. Vol. 264. P. 1313–1316.

23. Fishman G., Briggs M., et al. Temporal properties of the terrestrial gamma-ray flashes from the Gamma-Ray Burst Monitor on the Fermi Observatory // Journal of Geophysical Research. 2011. Vol. 116.
24. Stanley M., et al. A link between terrestrial gamma-ray flashes and intracloud lightning discharges // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33.
25. Marshall T., Briggs M., et al. Initial breakdown pulses in intracloud lightning flashes and their relation to terrestrial gamma ray flashes // Journal of Geophysical Research. 2013. Vol. 118. P. 10907–10925.
26. Gurevich A., Milikh G., Rossel-Durpe R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // Physics Letters A. 1992. Vol. 165. P. 463–468.
27. Dwyer J. Source mechanisms of terrestrial gamma-ray flashes // Journal of Geophysical Research. 2008. Vol. 113.
28. Xu W., Celestin S., Pasko V. Optical emissions associated with energetic electrons produced by stepping leaders in cloud-to-ground lightning discharges // Geophysical Research Letters. 2015. Vol. 42. P. 5610–5616.
29. Xu W., Celestin S., Pasko V. Optical emissions associated with terrestrial gamma ray flashes // Journal of Geophysical Research. 2015. Vol. 120. P. 1355–1370.
30. Садовничий В.А., Панасюк М.И., др. и. Исследования космической среды на микроспутниках Университетский – Татьяна и Университетский – Татьяна-2 // Астрономический Вестник. 2011. Т. 45, № 1. С. 5–31.
31. Panasyuk M., Svertilov S., et al. RELEC mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft // Advances in Space Research. 2016. Vol. 57. P. 835–849.
32. Milikh G., Valdivia J., Papadopoulos K. Spectrum of red sprites // Atmospheric Terrestrial Physics. 1998. Vol. 69. P. 907–915.
33. Климов П.А., Гарипов Г.К., др. и. Транзиентные атмосферные явления по результатам измерений на спутнике «Вернов» // Atmospheric Terrestrial Physics. 1998. Т. 69. С. 907–915.

34. Kikuchi H., Morimoto T., et al. Direction-of-Arrival Estimation of VHF Signals Recorded on the International Space Station and Simultaneous Observations of Optical Lightning // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. Vol. 54. P. 3868–3877.
35. Adachi T., Mitsuteru S., et al. Identifying the occurrence of lightning and transient luminous events by nadir spectrophotometric observation // Journal of Atmospheric and Solar – Terrestrial Physics. 2016. Vol. 145. P. 85–97.
36. Klimov P., Panasyuk M., et al. The «TUS» detector of extreme energy cosmic rays on board the «Lomonosov» satellite. // Space Science Reviews. 2017. Vol. 212, no. 3–4. P. 1687–1703.
37. Sadovnichii V., Panasyuk M., et al. «Lomonosov» Satellite – Space Observatory to Study Extreme Phenomena in Space // Space Science Reviews. 2017. Vol. 212, no. 3–4. P. 1705–1738.
38. Armstrong R., Lyons W., Nelson T. Multi-color photometric measurements of ionization and energies in sprites // Geophysical research letters. 2000. Vol. 27. P. 653–656.