

ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ГРОВОЗОВЫХ РАЗРЯДАХ. АКАДЕМИЧЕСКИЙ МИКРОСПУТНИК «ЧИБИС-М»

Л.М. Зелёный¹, В.Н. Ангаров¹, М.Б. Добрян¹, В.М. Готлиб¹, С.И. Климов¹, В.Г. Родин¹,
В.Н. Назаров¹, А.В. Гуревич², Г.К. Гарипов³, М.И. Панасюк³, С.И. Свертилов³, И.В. Яшин³,
В.В. Богомолов³

1 - ИКИ РАН

2 - ФИ РАН

3 - НИИЯФ МГУ

sklimov@iki.rssi.ru

Введение.

В последние годы обнаружен ряд физических явлений в атмосфере, фундаментально изменивших наше представление о грозовых разрядах.

1. В наблюдениях с космических астрофизических обсерваторий COMPTON (1991-2000 г.г.) и RHESSI (запущен в 2002 г.) обнаружены исключительно мощные импульсы гамма излучения (TGF), идущие от Земли. Энергия импульсов достигает десятков кДж. COMPTON и RHESSI не предназначались специально для грозовых исследований. Поэтому, проводившиеся на них измерения не носят комплексного характера и не обладают достаточным временным разрешением.

2. Обнаружена генерация коротких (~ 5 мкс) одиночных радиоразрядов, приводящих к излучению радиоимпульсов сверхвысокой мощности (до 100 ГВт и выше). Импульсы генерируются в грозовых облаках на больших высотах 13-20 км. Такие импульсы создают радиоизлучение в очень широком диапазоне частот, наблюдаемое на расстояниях до нескольких тысяч километров.

Природа этих всплесков была совершенно не понятна. Но когда проанализировали различные теоретические модели, наиболее принятой и наиболее завершённой концепцией явилось то, что гамма кванты земных гамма вспышек являются квантами тормозного излучения электронов, возникающие по какой-то неожиданной причине. Ни одна теория атмосферных разрядов существовавших к тому времени не предсказывала такого сильного ускорения. Электроны ускоряются до релятивистских энергий сталкиваясь с довольно редкими атомами атмосферы, но, тем не менее, создают сильное тормозное излучение и дают эти гамма-всплески. Самое удивительное, что гамма-кванты не могут попасть на Землю, в плотных слоях атмосферы они быстро гибнут. Минимальная высота, из которой эти кванты могут выйти, - 12-20 километров, что в общем-то довольно высоко для такого типичного представления о молниевом разряде.

В российской школе теоретиков ФИАН во главе с академиком Александром Викторовичем Гуревичем была построена модель пробоя на убегающих электронах (ПУЭ) [Гуревич А.В., К.П. Зыбин, УФН 2001]. Определяющую роль в этой модели играют электроны релятивистских энергий. Рождающаяся в ходе развития пробоя лавина убегающих электронов служит источником гамма излучения. Особенностью этого вида пробоя является то, что он происходит в низких электрических полях, но требует для своей инициации затравочных частиц высокой энергии. Одновременно рождается исключительно большое число электронов низких энергий. Движение этих электронов в электрическом поле грозы рождает мощный импульс радиоизлучения [Gurevich et. al., Phys. Lett., 2003]. Принципиальную роль в развитии ПУЭ играют космические лучи высоких энергий [Gurevich et. al., Phys. Lett., 2004].

Впервые разработан комплекс измерительной аппаратуры, ориентированный на изучение грозовых разрядов и перекрывающий практически весь спектр связанных с

разрядом электромагнитных излучений, включая гамма-излучения. В ходе работ, проведенных в ИКИ РАН совместно с кооперацией, изготовлен и прошёл в 2011г. полный цикл наземных испытаний академический микроспутник «Чибис-М» (общая масса 40 кг) с комплексом научной аппаратуры (КНА «Гроза», масса 10.8 кг) для исследования новых физических процессов при высотных атмосферных грозных разрядах [1].

Доставка «Чибис-М» на орбиту осуществлялась с использованием инфраструктуры Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). В транспортно-грузовом корабле (ТГК) «Прогресс М-13М» микроспутник «Чибис-М» 02 ноября 2011 г. был доставлен на РС МКС. Перед отделением от МКС, выполнившего свои функции ТГК, российские космонавты установили транспортно-пусковой контейнер (ТПК) с «Чибис-М» на верхнем шпангоуте «Прогресс М-13М». После отделения от МКС 24 января 2012 г. «Прогресс М-13М» по специальной программе совершил манёвр по поднятию своей орбиты на высоту 513 км. По команде с Земли 25 января 2012 г. в 03 часа .. минут «Чибис-М» вышел из ТПК и начал автономную работу на орбите.

1. КНА «Гроза».

Для понимания проблемы происхождения TGF очень важно получить данные о высотном грозном разряде, его радио-, видимом и ультрафиолетовом излучении. Важно, чтобы наблюдения этих излучений имели высокую субмикросекундную синхронизацию по времени, т.е. фиксировались на одном космическом аппарате. Решению этих задач посвящен проект микроспутника «Чибис-М» [2].

Новизна предлагаемого подхода к исследованию новых физических механизмов электрических разрядов в атмосфере заключается в:

- 1). Требованиям субмикросекундного временного разрешения измерительной аппаратуры и разработке принципиально новой бортовой системы сбора и обработки высокоопросной информации, которые осуществляют одновременную регистрацию процессов, происходящих в радио, оптическом и гамма диапазоне.
- 2). Разработке, с учетом имеющегося задела и поставленной фундаментальной задачи, специальной космической платформы и комплекса научной аппаратуры;

Разработка космического эксперимента, оснащенного специальной измерительной аппаратурой и ориентированного на исследования разрядов на больших высотах, является уникальным проектом по количеству и скорости измеряемых одновременно параметров. Подобный проект до настоящего времени нигде в мире не проводился и не планируется в ближайшее время, несмотря на возрастающий интерес к проблеме происхождения и механизма разрядов в верхних слоях атмосферы.

Приборный состав КНА «Гроза» и научная кооперация:

- Рентген-гамма детектор – РГД (НИИЯФ) с диапазоном рентгеновского и гамма-излучения 0.02-1.0 МэВ [3];
- УФ детектор – ДУФ (НИИЯФ) спектра излучения от УФ (180-400 нм) до ИК (650-800нм) [4];
- Радиочастотный анализатор – РЧА (ИКИ РАН) в диапазоне частот 26 – 48 МГц [5];
- Цифровая камера – ЦФК (ИКИ РАН) с пространственным разрешением 300 м и экспозицией 15 кадров/сек;
- Магнитно-волновой комплекс – МВК (ЛЦ ИКИ РАН и НКА Украины, Университет Ётвоша, Венгрия) в диапазоне частот 100 – 40000 Гц;
- Блок накопления данных БНД (ИКИ РАН) [6];
- Передатчик 2.2 ГГц с антеннами – ПРД2.2 (ИКИ РАН).

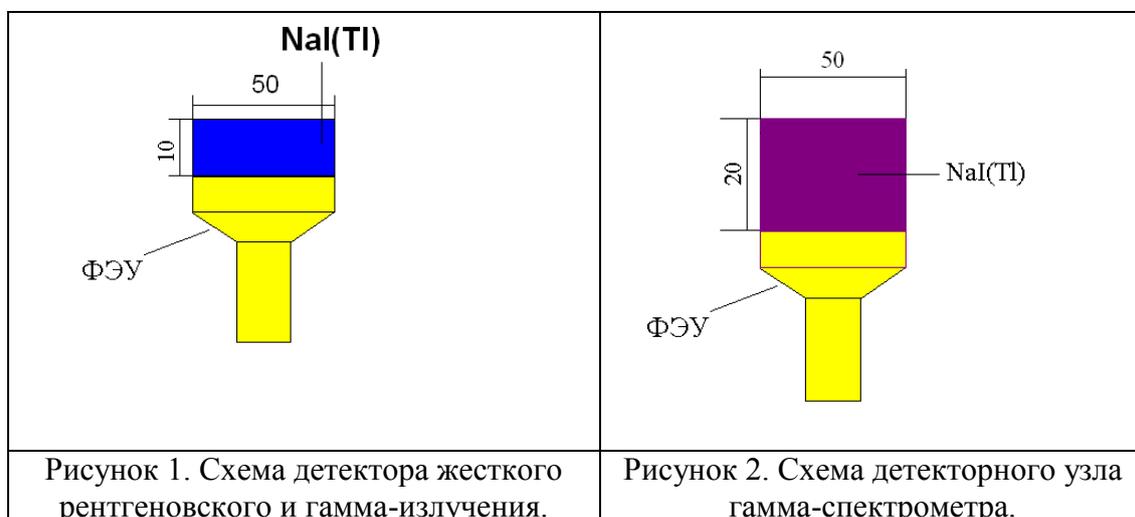
2. Информационная организация КНА «Гроза».

Каждый прибор КНА «Гроза» имеет кольцевую память (КП) имеющую фиксированный размер на несколько событий. Общий размер памяти прибора определяется максимальной длительностью события этого прибора, который задают постановщики эксперимента. Длительность события может регулироваться по командам. Пример: РЧА-1 с, РГД-20 мс, ДУФ-100 мс. Телекомандами с Земли могут задаваться и другие параметры оцифровки события: период оцифровки (дискретизация по времени), критерий «событие произошло» (СП, триггер), размер «до» и «после» события. События происходят случайным образом, поэтому при записи в КП делается привязка к бортовому времени, оформление массива события (заголовок, нумерация и т.д.). В КП пишется только событие соответствующее критерию СП. При отсутствии события в КП пишется следующий цикл возможного события.

Логику работы КНА «Гроза» рассмотрим на примере рентген-гамма детектора РГД, предназначенного для регистрации спорадических возрастаний (всплесков) жесткого рентгеновского и гамма-излучения (диапазон энергий фотонов 0.02-1.0 МэВ) высотных атмосферных разрядов. Для регистрации гамма-излучения используются сцинтилляционные детекторы, на основе кристаллов NaI(Tl) диаметром размером 5 см и толщиной 1.0 и 2.0 см. Как известно кристалл NaI(Tl) обладает среди плотных неорганических сцинтилляторов максимальной конверсионной эффективностью и, соответственно, наилучшим световыходом при заданной конфигурации [7].

Детекторный узел рентгеновского и гамма-излучения состоит из трех детекторов жесткого рентгеновского и гамма-излучения (50-500 кэВ) и одного детектора – гамма-спектрометра (0.05-1.0 МэВ), а также конструктивных элементов крепления детекторов. Оси детекторов рентгеновского излучения и гамма-спектрометра должны быть сонаправлены друг с другом.

Упрощенная схема детектора жесткого рентгеновского и гамма-излучения приведена на рис. 1. Каждый детектор выполнен на основе сцинтиллятора NaI(Tl) с размерами - $\varnothing 5.0 \times 1.0$ см, который просматривается фотоумножителем (ФЭУ) Hamamatsu R1306 с диаметром фотокатода 5.0 см. С ФЭУ сочленен делитель высокого напряжения Hamamatsu E1198-05. Детекторный узел гамма-спектрометра выполнен на основе сцинтиллятора NaI(Tl), размеры которого $\varnothing 5.0 \times 2.0$ см. Сцинтиллятор просматривается фотоумножителем Hamamatsu R1306 с диаметром фотокатода 5.0 см. С ФЭУ сочленен делитель высокого напряжения Hamamatsu E1198-05. Упрощенная схема гамма-спектрометра приведена на рис.2.



В ходе эксперимента осуществляется непрерывная запись показаний детекторов прибора РГД. Выходной сигнал детекторов, осуществляющих запись временного профиля всплеска, оцифровывается с разрешением не менее 100 нс и записывается в течение интервала времени, который задается ресурсами внутренней КП прибора (не менее 20 мс), после чего должно происходить перезаписывание в КП последующего набора показаний. Таким образом, в КП памяти всегда хранится текущая последовательность оцифрованных показаний детекторов длительностью 20 мс. Параллельно с записью оцифрованных сигналов от каждого из 4-х детекторов осуществляется запись числа отсчетов (сигналов, амплитуда которых превышает порог, соответствующий энерговыделению в детекторе 25 кэВ), аккумулируемых за интервал 3 мс и за интервал времени длительностью 1 с (длительность этого интервала может изменяться по команде с Земли) предшествующий трехмиллисекундному интервалу. Путем суммирования отсчетов в канале каждого детектора за 1 с интервал, предшествующий 3 мс, определяется уровень фона. Превышение количества отсчетов, суммируемых за 3 мс, уровня фона на определенное число «сигма» в заданном числе детекторов (этот уровень и количество сработавших детекторов устанавливаются по команде с Земли, исходное значение – 3σ не менее, чем двух детекторах) является признаком события. В этот момент должен вырабатываться триггер прибора (ТП) – прямоугольный импульс длительностью 1 мкс. При этом содержимое КП в интервале от 8 мс до ТП и в течение 12 мс после ТП переписывается в буферную память прибора. Аналогичным образом содержимое кольцевой памяти может фиксироваться по назначенному от другого прибора (РЧА или ДУФ) внешнему триггеру, поступающему в блок РГД из блока БНД-Ч. При этом содержимое КП в интервале от 8 мс до триггера и в течение 12 мс после триггера переписывается в буферную память прибора.

В момент появления ТП также вырабатывается строб длительностью 10 мс, который поступает в блок БНД-Ч и служит для выработки триггера комплекса (ТК). В случае совпадения этого stroba с аналогичным stroбом, вырабатываемым прибором РЧА или ДУФ в блоке БНД-Ч вырабатывается триггерный сигнал - ТК, запускающий ЦФК и служащий для фиксации содержимого кольцевой памяти приборов комплекса, в том числе и РГД. В случае фиксации по ТК переписывается в буферную память прибора содержимое кольцевой памяти в интервале от 15 мс до триггера и в течение 5 мс после триггера. По командам с Земли может быть изменена длина записи в кольцевой памяти – 50 мс и длительность stroba – 5 мс и 25 мс. В случае длины записи в кольцевой памяти 20 мс события считаются независимыми, т.е. соответствующие показания записываются из кольцевой памяти в буферную, как независимые последовательности, если интервал между их началом больше 10 мс. В противном случае они записываются как одно событие. В буферную память прибора также осуществляется непрерывная запись числа отсчетов от каждого из четырех детекторов за 1 с для контроля фоновых показаний детекторов. При заполнении буферной памяти прибора в БНД-Ч выставляется запрос на считывание, по которому содержимое буферной памяти переписывается в БНД-Ч для передачи на Землю. После окончания переписывания данных из прибора в БНД-Ч содержимое буферной памяти обнуляется и она готова к записи последующего набора данных.

Научный комитет проекта признал, что на начальном этапе оптимальным вариантом регистрации молниевых разрядов является такой, когда команда о начале регистрации разряда (триггер) приборами КНА «Гроза» поступает от радиочастотного анализатора РЧА, как наиболее скоростного прибора, измеряющего интенсивность радиоизлучений в характерном для грозовых разрядов диапазоне 26-48 МГц. Анализирующая часть прибора позволяет отделить скоростные, широкополосные сигналы, характерные для искомых высотных разрядов от других и на основе этого анализа подать команду на включение других приборов КНА.

Научной задачей прибора РЧА является прием, анализ и регистрация электрической активности высотных молниевых разрядов в радиодиапазоне 26...48 МГц, характеризующихся широкой полосой частот и микросекундной длительностью. На рис.3 приведена структурная схема прибора.

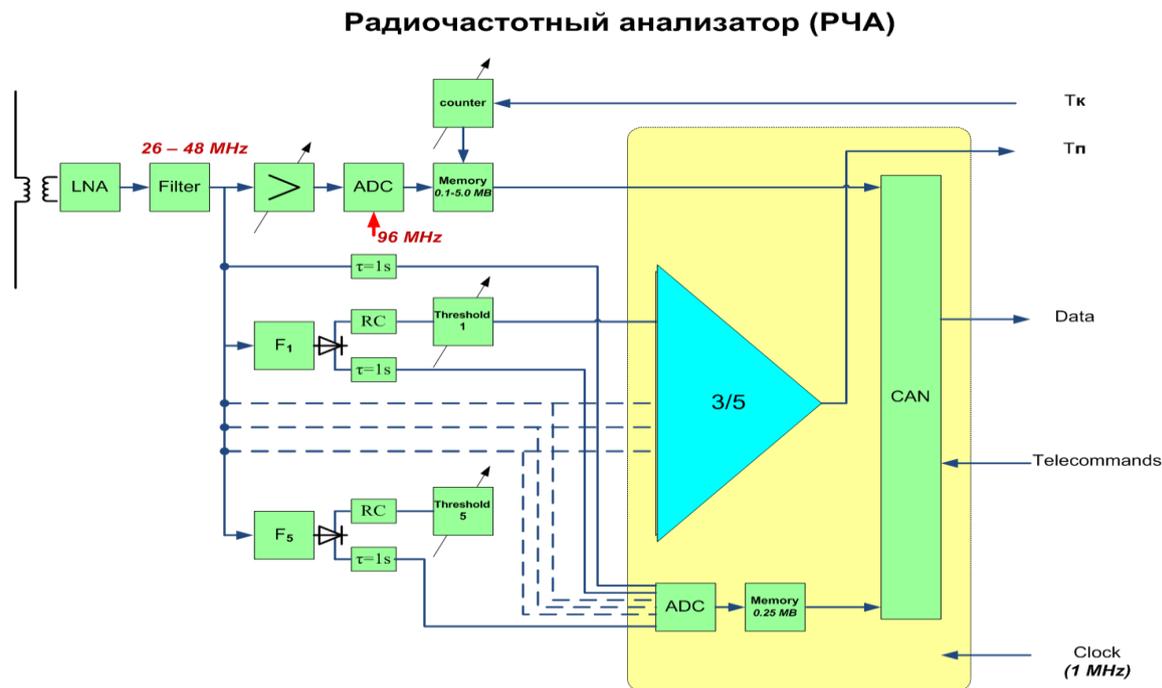


Рис.3. Структурная схема прибора.

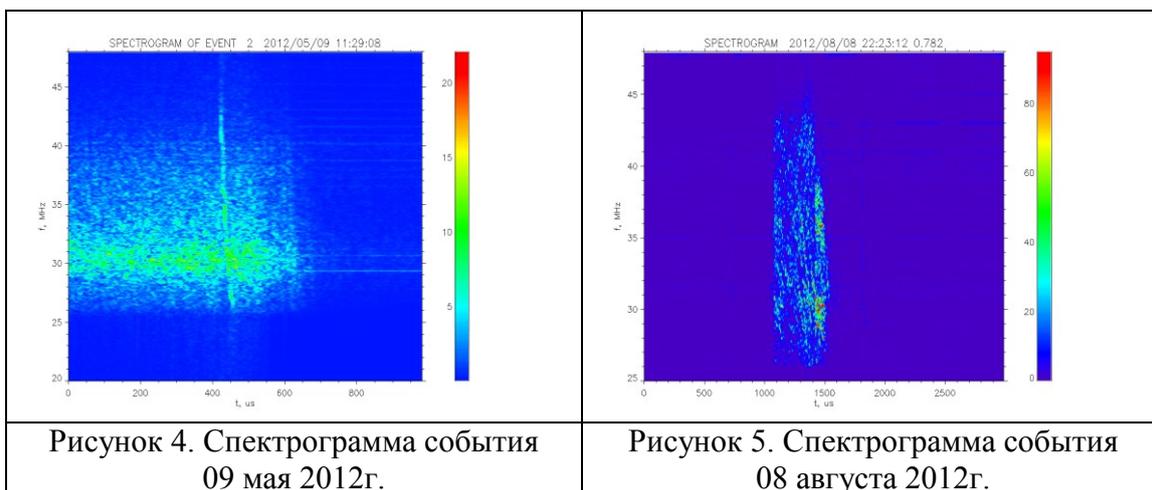
Прибор включает в себя анализатор спектра, состоящий из пяти полосовых фильтров, равномерно расставленных в рабочем диапазоне. На выходе каждого из фильтров анализатора установлены пороговые элементы и далее мажоритарная схема выработки сигнала регистрации (триггер события). По триггеру события в кольцевую память прибора записывается радиосигнал в течение определенного временного интервала, устанавливаемого по командам с Земли. При этом событие оказывается записанным в середине выбранного временного интервала. Триггер события может использоваться другими научными приборами спутника для регистрации в этот же момент молниевых разрядов в ультрафиолетовом, инфракрасном, гамма диапазонах излучения.

Основные характеристики РЧА:

- диапазон регистрируемых частот 26...48МГц, -
- частота дискретизации сигнала, записываемого в кольцевую память - 96 МГц,
- длительность записи кольцевой памяти - 1...50 мс,
- разрядность АЦП - 8 разрядов,
- точность привязки триггера к бортовому времени - 1мкс
- различение полезного сигнала на фоне техногенных помех,
- установка всех основных параметров по командам с Земли.

За время работы «Чибис-М» прибором РЧА были определены на Земле зоны наиболее интенсивных техногенных помех и зоны наиболее перспективные для регистрации молниевой активности. Программа включений РЧА выбирается в настоящее время с учетом этих зон. За прошедшие 8 месяцев работы микроспутника в 2012 году зарегистрировано несколько сотен срабатываний триггера, из них более сотни, связанных с короткими и мощными грозowymi разрядами.

На рис. 4, 5 приведены спектрограммы некоторых грозowych разрядов.

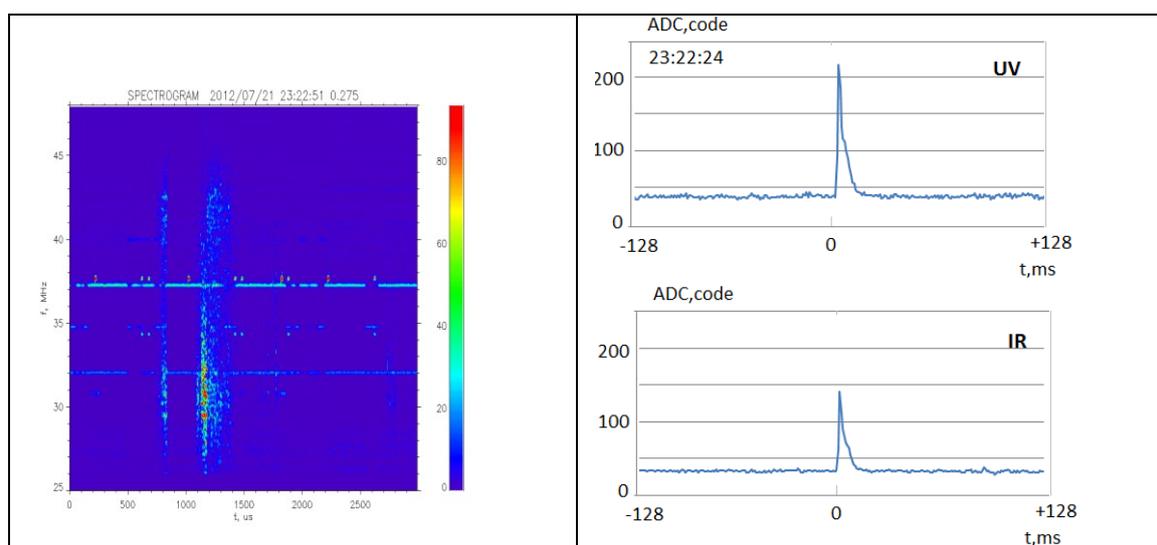


По оси ординат рис. 4, 5 отложено время регистрации разряда на интервале записи в КП в микросекундах. По оси абсцисс – регистрируемая частота в МГц. Интенсивность сигнала изображена цветом. Спектрограммы построены на базе в тысячу отсчетов, взятых за 10 мкс, что и определяет их разрешающую способность. На приведенной на рис. 4, и последующих рисунках, на спектрограммах можно видеть светлые горизонтальные линии - это узкополосные сигналы, связанные, скорее всего, с работой наземных передатчиков.

Из приведенных примеров можно видеть разный характер регистрируемых разрядов. На рис. 4 видны множественные короткие разряды, следующие с интервалом 50...100мкс в течение приблизительно 1мс. Повышенная грозовая активность на интервале примерно 400 мкс проявляется на рис. 5.

3. Результаты анализа данных КНА «Гроза» по событию 21.07.2012.

В период наблюдения грозовой активности 21.07.2012 работа приборов КНА «Гроза» происходила по триггеру, формируемому прибором РЧА.



Спектрограмма события, по которому РЧА выработал триггер, представлена на рис. 6. Спектральный, автокорреляционный и кросскорреляционный анализ этого события подчёркивает «грозовой» характер данного события. Данные, зафиксированные детектором ультрафиолета ДУФ на момент прихода триггера РЧА, представленные на рис. 7, по характеру соотношения UV и IR детекторов также свидетельствуют о «грозовой» природе данного события.

Пример графического отображения всплесковых данных прибора РГД, сформированных при обработке триггера 21.07.2012, 23:22:56 приведен на рис. 8, 9. На рис. 8 показана диаграмма время-амплитуда, на которой для каждого случая взаимодействия гамма-кванта с одним из четырех сцинтилляционных детекторов точками отображаются момент времени и амплитуда, пропорциональная энерговыделению. Время отсчитывается по таймеру прибора с точностью до 6 мкс. Ноль шкалы времени соответствует моменту инициализации внутреннего таймера прибора. Момент триггера лежит в пределах, отмеченных на рисунке вертикальными линиями, соответствующими границам времени фиксации первого из послетриггерных событий в детекторах. Точность привязки временной шкалы к моменту триггера определяется статистикой и как правило составляет ~20 мс.

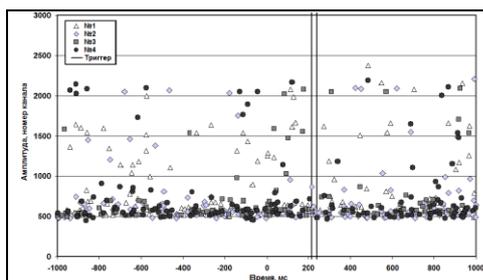


Рисунок 8. Прибор РГД. Диаграмма время-амплитуда всплескового массива, сформированного по триггеру РЧА.

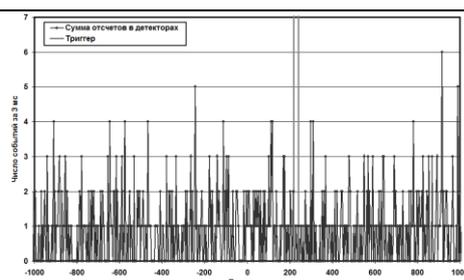


Рисунок 9. Прибор РГД. Временной ход суммарного числа случаев взаимодействия 4-х детекторов за 3 мс.

На рис. 9 виден статистический разброс показаний прибора, обусловленный прежде всего случайными флуктуациями числа отсчетов в детекторах. Для определения порогового уровня, при превышении которого можно сделать вывод о статистически значимом увеличении потока гамма-квантов, требуется дополнительный анализ распределения пиков на этом ряду по амплитуде.

В настоящее время Научный комитет проекта организывает Программу орбитальных измерений скоординированных с подспутниковыми наблюдениями на геофизических обсерваториях а также с мировой сетью ОНЧ наблюдений грозových разрядов. Проведенные 21 июля 2012г. орбитальные ионосферные измерения осуществлены вблизи «Индонезийского» кластера мировой сети WWLLN (рис. 10).

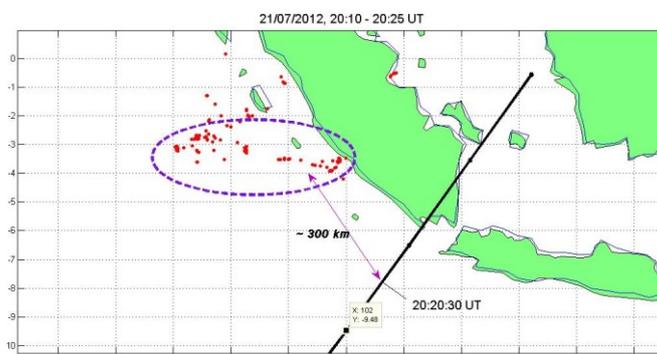


Рисунок 10. Пример подспутниковой трассы «Чибис-М» 21 июля 2012г.

Благодаря точной временной привязке орбитальных измерений, сеть WWLLN могут быть точно идентифицированы грозовые разряды на Земле, вызвавшие электромагнитные излучения, зарегистрированные на «Чибис-М».

Заключение.

Анализ полученной с первого академического микроспутника «Чибис-М» телеметрической информации и её физическая интерпретация свидетельствует о правильности создания КНА «Гроза», позволившего впервые провести мониторинг эффектов грозовой активности в ионосфере в широком диапазоне электромагнитных излучений.

Данная работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ 06-02-08076-офи, 09-05-13587-офи_ц, 10-05-93107.

Литература.

1. Zelenyi, L.M., et all. Micro-satellite “Chibis” – universal platform for development of methods of space monitoring of potentially dangerous and catastrophic phenomena. Selected Proceedings of the 5th International Symposium of the International Academy of Astronautics, Berlin, April 4-8, 2005. Edited by Hans-Peter Roeser, Rainer Sandau, Arnoldo Valenzuela. Walter de Grueter, Berlin, New York, p. 443-451, 2005.
2. Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, 139 с.: табл., ил., цв.ил.
3. Гуревич, А.В., Л.М.Зеленый, С.И. Климов. Научные задачи миссии «Чибис-М». Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, с. 7-26.
4. Гарипов, Г.К., С.И.Свертилов, И.В.Яшин. Физические характеристики и алгоритмы выработки триггеров прибором РГД. Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, с. 49-58.
5. Гарипов, Г.К., С.И.Свертилов, И.В.Яшин. Физические характеристики и алгоритмы выработки триггеров прибором ДУФ. Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, с. 58-63.
6. В.М.Готлиб, В.Н.Каредин, А.К.Тоньшев, В.Ю.Гаретов. Радиочастотный анализатор–регистратор молниевой активности для микроспутника «Чибис-М». Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, с. 72-78.
7. В.Н.Ангаров, В.М.Козлов, А.А.Новиков, С.А.Наганов, С.А.Шестаков. Миссия «Чибис-М». Сборник трудов выездного семинара, серия «Механика, управление и информатика»/Под ред. Р.Р.Назирова. М.: ИКИ РАН, 2009, с. 90-98.
8. Цирлин Ю.А., Глобус М.Е., Сысоева Е.П. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами (М.: Энергоатомиздат, 1991).