



ПКЛ1
ID:172



ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОНОВЫХ ВРЕМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ПРОТОТИПОМ СИСТЕМЫ АНТИСОВПАДАТЕЛЬНЫХ СЧЕТЧИКОВ КОСМИЧЕСКОГО ГАММА- ТЕЛЕСКОПА ГАММА-400

Архангельская И.В.¹

(IVArkhangelskaya@merphi.ru, +79588157326),

**Архангельский А.И.¹, Гальпер А.М.^{1,2}, Леонов А.А.^{1,2}, Сучков С.И.,
Топчиев Н.П.², Юркин Ю.Т.¹, Часовиков Е.Н.¹**

¹Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Россия, Москва

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия, Москва

1. Компоненты фона на высокоапогейной орбите.

Фоновые условия в спутниковых γ -детекторах

определяются, в основном, шестью компонентами:

- 1) диффузное космическое γ -излучение**
- 2) атмосферное γ -излучение**
- 3) локальный фон γ -излучения и нейтронов от прямых взаимодействиях космических лучей, в том числе и солнечных (КЛ и СКЛ), с веществом детектора и КА**
- 4) фон, вызванный распадом нуклидов, образованных во взаимодействиях КЛ и СКЛ, а так же частиц радиационных поясов Земли (включая Южно-атлантическую магнитную аномалию) – РПЗ с веществом детектора и КА**
- 5) нестационарные события и высыпания электронов;**
- 6) излучение дискретных космических источников.**

Компоненты 1) и 6) не зависят от положения КА в магнитном поле Земли, но остальные величины определяются потоком КЛ и СКЛ, геомагнитной жесткостью обрезания (2-5), протонной дозой, накопленной при прохождении КА областей РПЗ, а также величиной промежутка времени от момента пролета данных областей до проведения измерений (5).

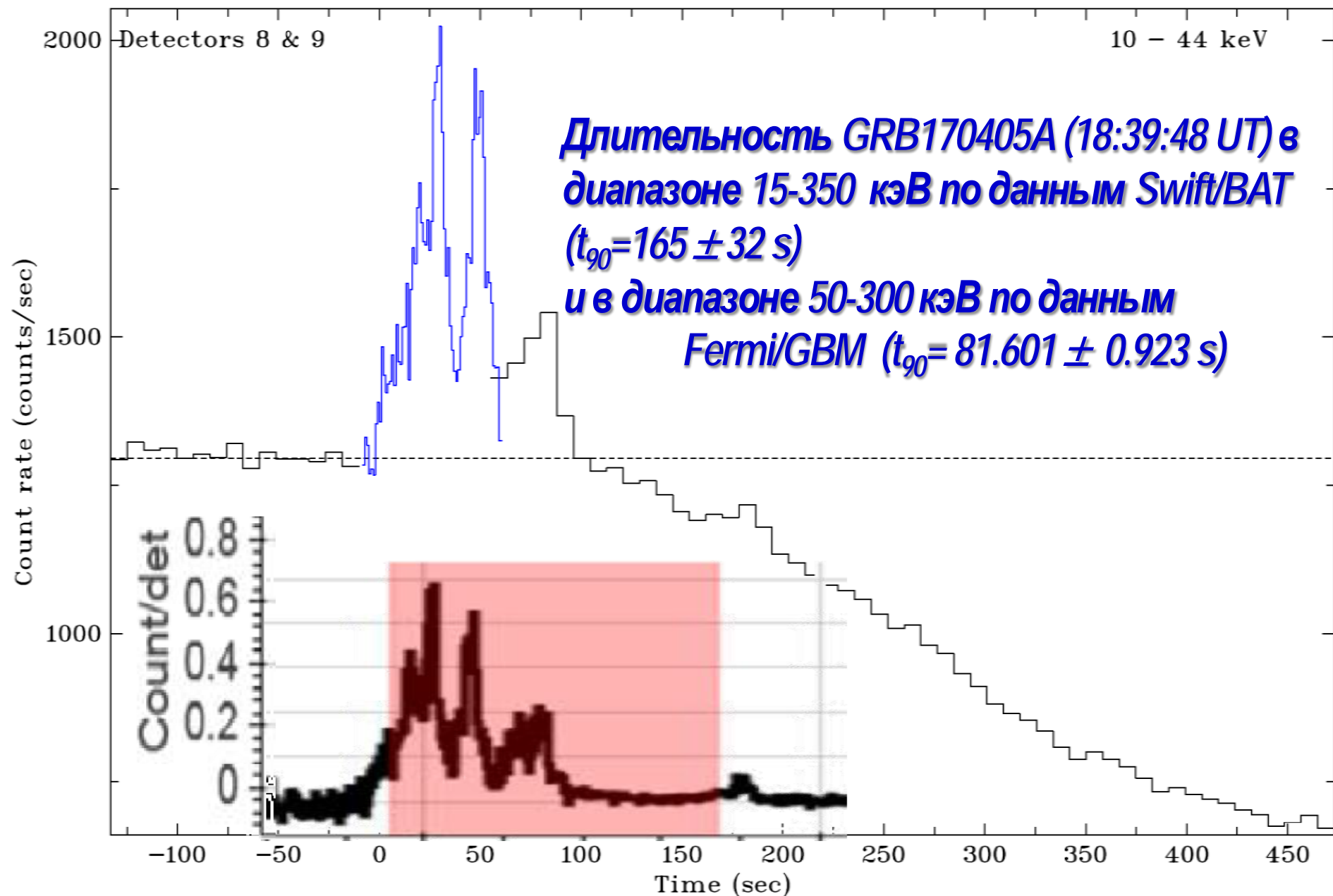
Принципиальная экспериментальная проблема при регистрации рентгеновского и γ -излучения приборами, установленными на космических аппаратах (КА), связана с высокой интенсивностью фона, генерируемого в приборе и вокруг него заряженными частицами. Эти частицы могут как давать вторичное рентгеновское и гамма-излучение сами при взаимодействии с веществом детекторов и КА, так и регистрироваться в антисовпадательной защите приборов, приводя к возрастанию мертвого времени системы в целом.

Большая часть космических аппаратов (КА) с научной нагрузкой, позволяющей изучать гамма-излучение, а также потоки электронов и позитронов, функционирует на низких почти круговых орбитах, например, FERMI, AMS-2, DAMPE и т.д.

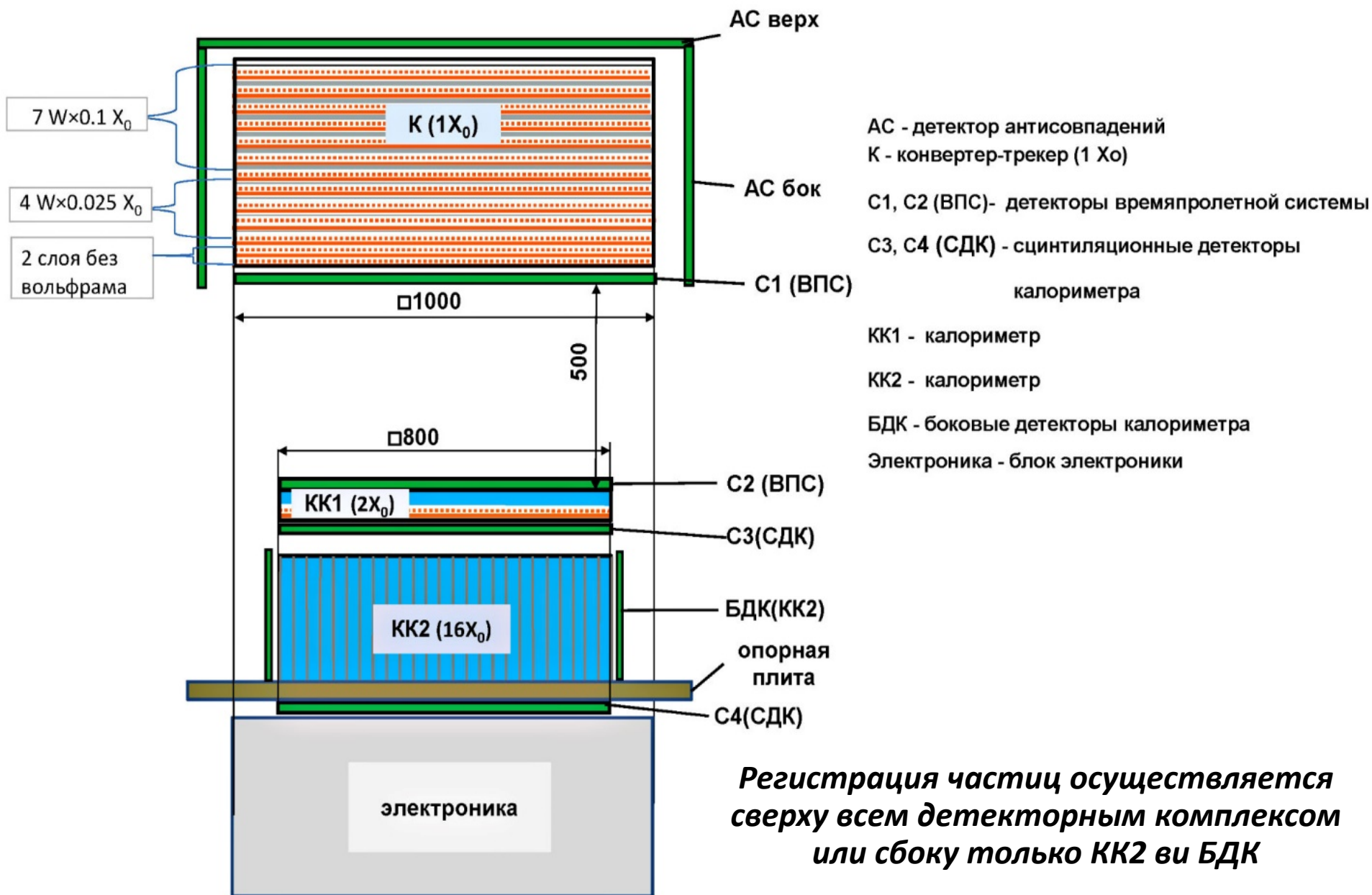
Период обращения на таких орбитах ~ 90 мин, что дает квазипериодическую компоненту фоновых потоков, которая влияет на определение длительности события.

Однако гамма-телескоп ГАММА-400 будет установлен на высокоапогейном КА с периодом обращения ~ 7 суток, что обеспечит более стабильные фоновые условия.

Влияние квазипериодической фоновой составляющей на определение длительности события



2. Краткое описание гамма-телескопа ГАММА-400



Физическая схема гамма-телескопа ГАММА-400

В состав гамма-телескопа ГАММА-400 входят следующие детекторы:

- **К** – координатно-чувствительный конвертер-трекер;
- Координатно-чувствительный калориметр **КК** на основе CsI(Tl), состоящий из двух спектрометрических блоков **КК1** и **КК2**
- **С3** – сцинтилляционный детектор прешауэра калориметра, который формируется из **КК1** и **С3**;
- **С4** – сцинтилляционный детектор утечки;
- **ВПС** – времяпролетная система, включающая в себя из 4 ориентированных перпендикулярно плоскости, объединенных попарно в детекторы **С1** и **С2**, расположенные на расстоянии 50 см друг от друга. Каждая из этих плоскостей состоит из 10 (**С1**) и 8 (**С2**) полос сцинтиллятора BC408 толщиной 10 мм, шириной 100 мм, длиной 1000 и 800 мм соответственно,;
- **АС_{верх}** – верхний антисовпадательный детектор, состоящий из 2х слоев полос сцинтиллятора BC408 размерами 1280 мм x 100 мм x 10 мм, причем верхний слой сдвинут относительно нижнего на ~10 мм;
- **АС_{бок}** – боковые антисовпадательные детекторы, сконструированные аналогично **АС_{верх}**, но с длиной полосы 500 мм;
- **БДК** – боковые антисовпадательные детекторы калориметра, сконструированные аналогично **АС_{бок}**

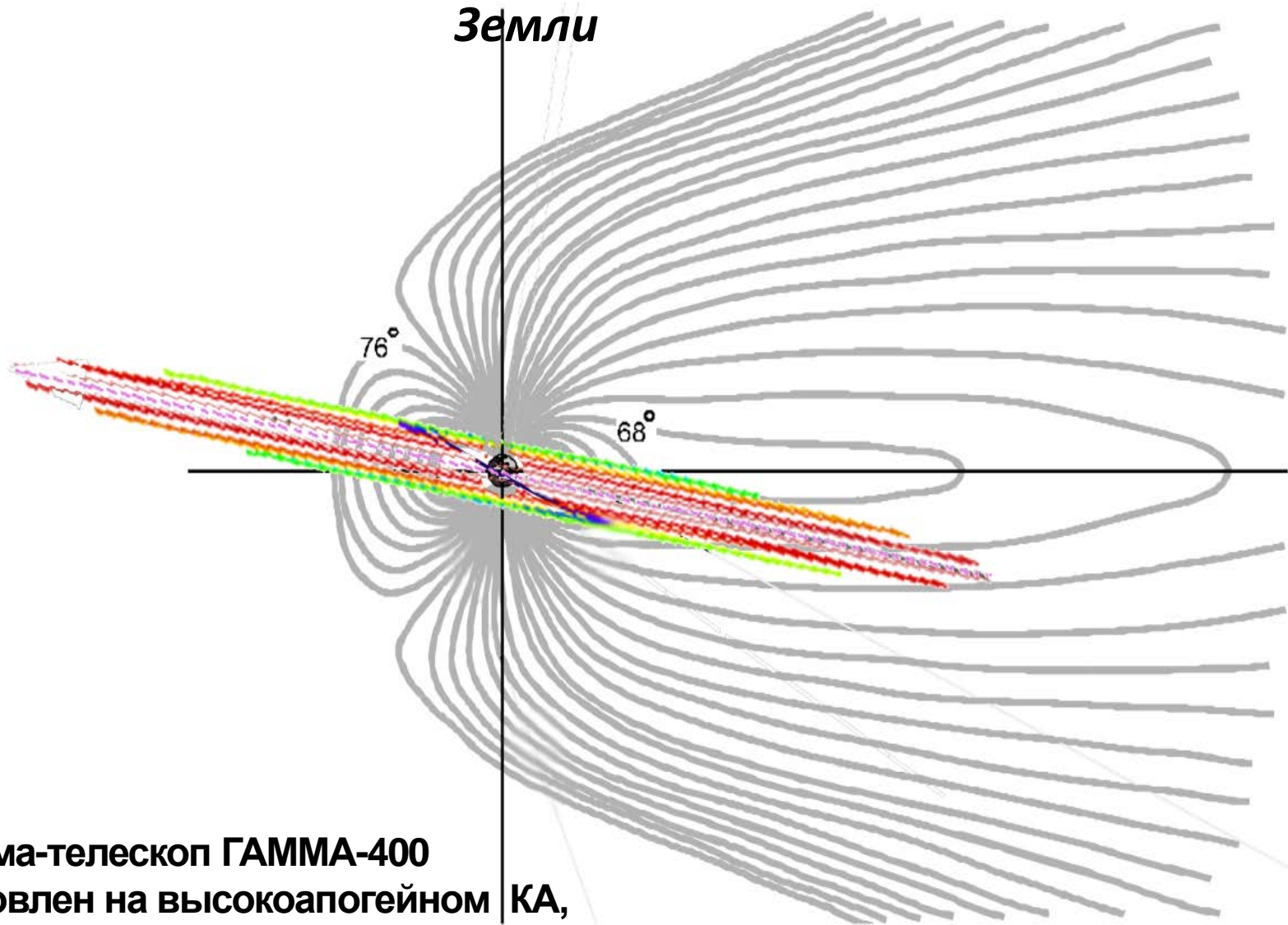
Детекторы **С3**, **С4**, **ВПС**, **АС** и **БДК** выполнены из конструктивно и схемотехнически унифицированных модулей и различаются размером и количеством сцинтилляционных полос, а также содержанием блоков фронтальной электроники. Светосбор во всех сцинтилляционных детекторах организован с отдельной регистрацией событий в каждой отдельной полосе посредством матриц кремниевых фотоумножителей (SiPM).

Гамма-телескоп ГАММА-400 включает в себя следующие служебные системы и модули:

- отсек блоков электроники;
- система формирования триггерных сигналов - отбора событий (**СТ**);
- система управления, сбора и хранения научной информации (**ССНИ**);
- система электропитания (**СЭП**).

Прототип АС_{верх} представляет собой сборку из двух сцинтилляционных полос из поливинилтолуола ВС-408 размером 1280 мм x 100 мм x 10 мм, помещенных в углепластиковые кожуха толщиной 0.6 мм. Одна из полос обернута отражателем TYVEC, а вторая отражателем MYLAR. В представленной работе используются данные со второй полосы.

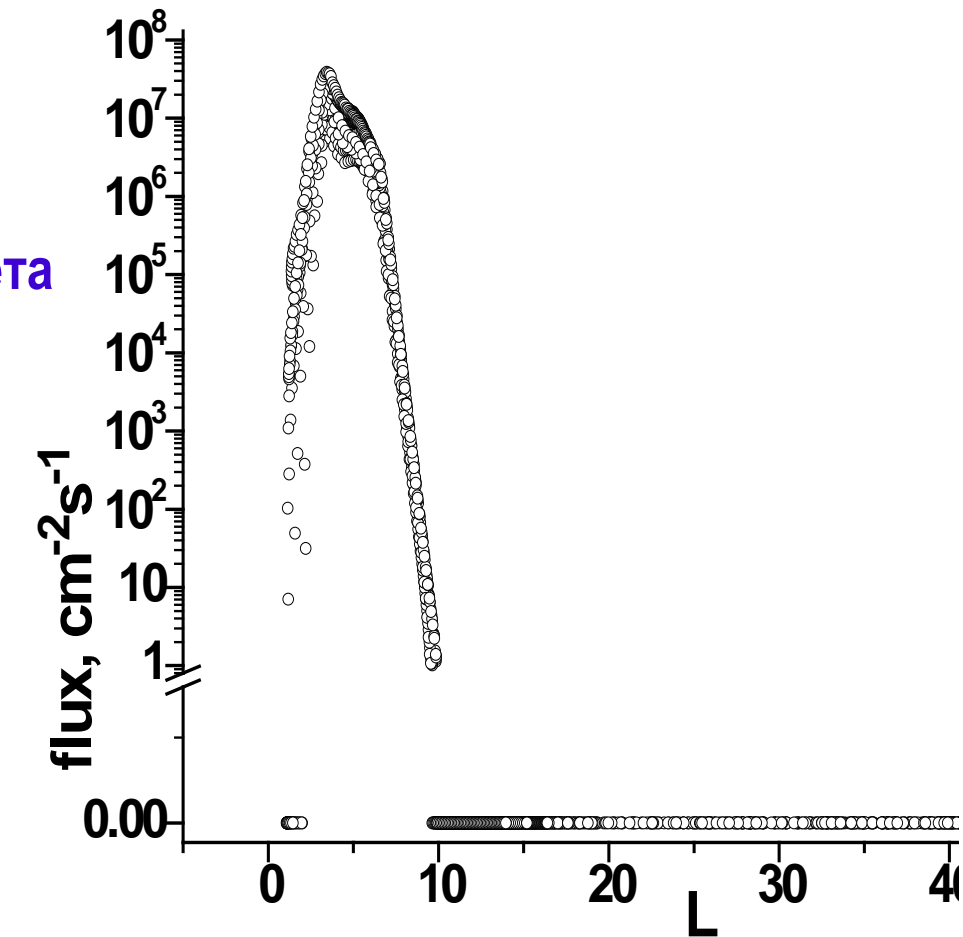
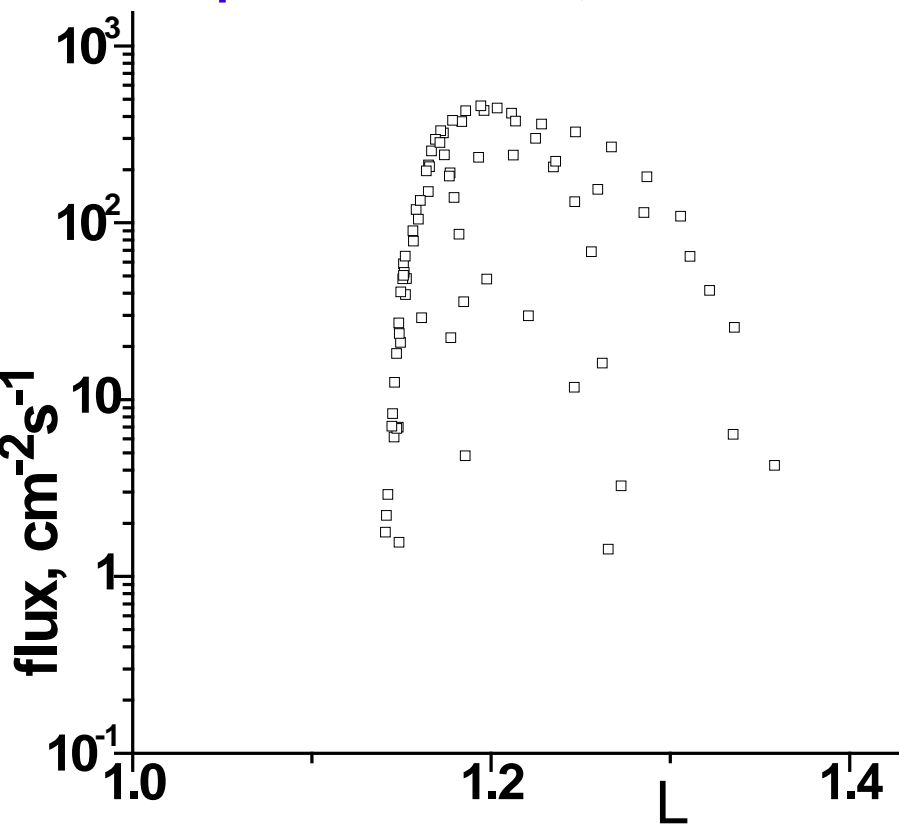
Схема орбиты гамма-телескопа ГАММА-400 в магнитосфере Земли



Однако гамма-телескоп ГАММА-400 будет установлен на высокоапогейном КА, начальные параметры орбиты следующие: $N_a \sim 300000$ км, $N_p \sim 300000$ км, $i \sim 52^\circ$, период обращения составит ~ 7 суток. Затем через несколько месяцев орбита становится почти круговой со средним расстоянием от Земли ~ 120000 км, обратная трансформация займет более 5 лет.

Результаты моделирования фоновых условий в калориметре КК2 γ -телескопа ГАММА-400 с учетом захваченных протонов с $E > 100$ кэВ

Моделировалась низкая орбита, аналогичная орбите Fermi:
 $H_p = 500$ км, $H_a = 500$ км,
 $i = 20^\circ$, период = 1.57 часа, 1 день полета



Моделировалась высокоапогейная орбита, которая и будет в реальном эксперименте: $H_a = 300000$ км, $H_p = 500$ км, $i = 51.8^\circ$, период = 171.35 часа, 30 дней полета

3. Изрезанность временных профилей событий: реальные эффекты и статистические флуктуации

Влияющие на погрешность измерений флуктуации скорости счета определяются:

- (а) распределениями величин 1)-6),**
- (б) типом мертвого времени детектора,**
- (в) статистическими свойствами алгоритма выделения событий,**
- (г) статистическими свойствами процессов в веществе детектора и электронике.**

Факторы (а) и (г) приводят к Гауссовому или Пуассоновскому их распределению, компонент (б) в лучшем случае переводит его в Эрлангово с определенным коэффициентом пересчета.

Значения флуктуаций скорости счета обязательно необходимо учитывать при анализе характеристик выделенного события. Например, любой зарегистрированный в детекторе временной профиль будет изрезанным за счет этого эффекта, даже если в источнике он сформировался гладким.

Для определения, связана ли изрезанность зарегистрированного временного профиля с реальными физическими процессами в источнике, или с флуктуациями скорости счета в детекторе, возможно применять фрактальный анализ полученных временных рядов.

Фрактальную размерность D_F часто называют хаусдорфовой по имени математика Хаусдорфа, определившего дробную размерность подмножеств. Общий вид фрактальной размерности произвольного ⁽⁴⁾ аттрактора в n -мерном фазовом пространстве по Колмогорову-Хаусдорфу

$$D_F = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} [\ln N(\varepsilon) / \ln(1 / \varepsilon)]$$

где $N(\varepsilon)$ - минимальное число n -мерных кубиков с ребром - ε , необходимых для покрытия анализируемой кривой (клеточная размерность).

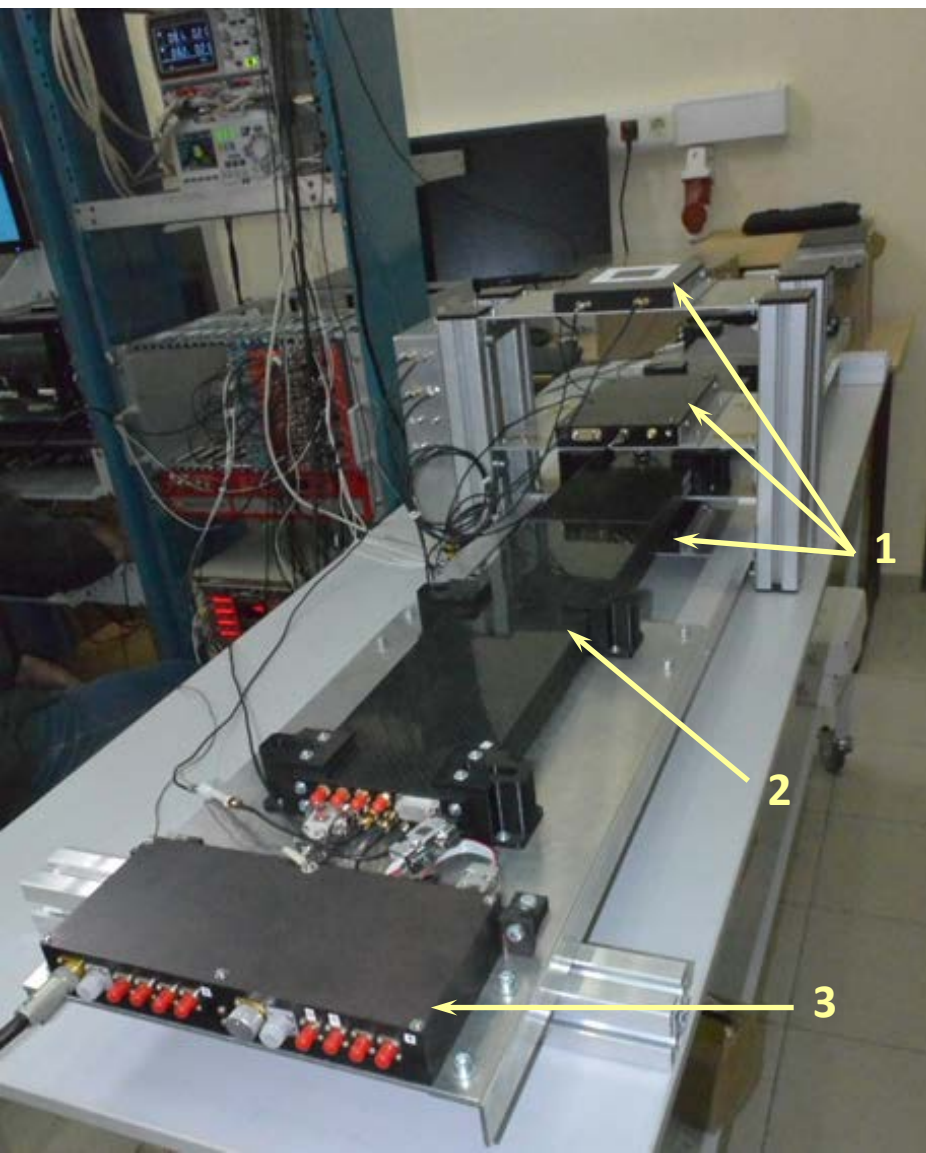
В случае отсутствия каких-либо регулярностей в процессе, соответствующему анализируемому временному ряду, его фрактальная размерность будет определяться только статистическими флуктуациями и будет равна 1.5.

Соответственно, если флуктуации фона в детекторе не имеют систематических ошибок, вызванных, например, проблемами в алгоритмах отбора событий или логики работы электроники, то размерность фонового временного профиля тоже будет 1.5.

В представленной работе изучалась фрактальная размерность фоновых временных профилей, зарегистрированных прототипом системы антисовпадательных счетчиков космического гамма-телескопа ГАММА-400, во время его калибровок на атмосферных мюонах и на e^+ калибровочного пучка вторичных позитронов синхротрона С-25Р "ПАХРА"

4. Характеристики фоновых временных профилей, зарегистрированных прототипом системы Асверх

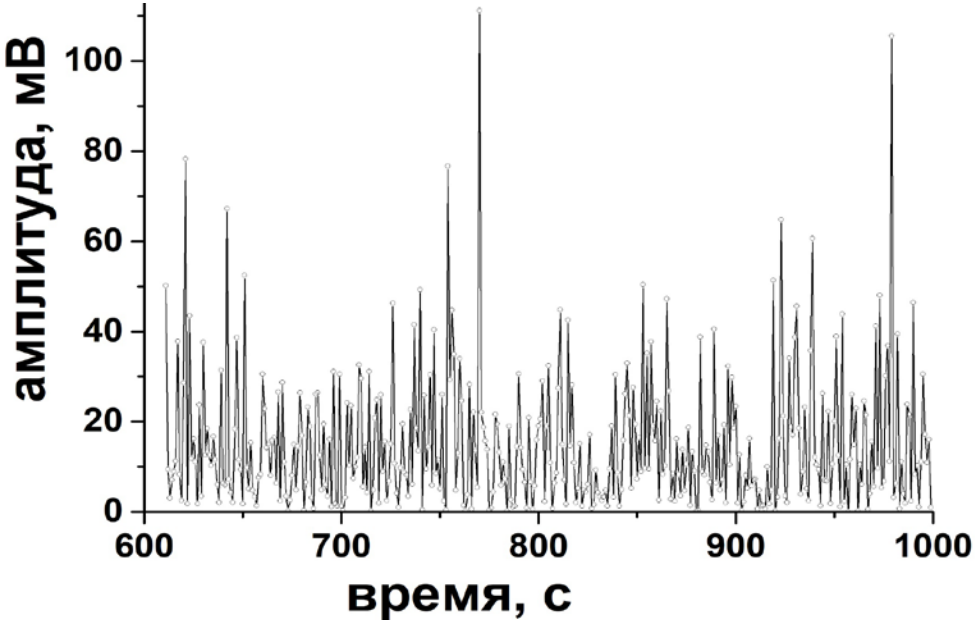
Измерение потока мюонов космических лучей



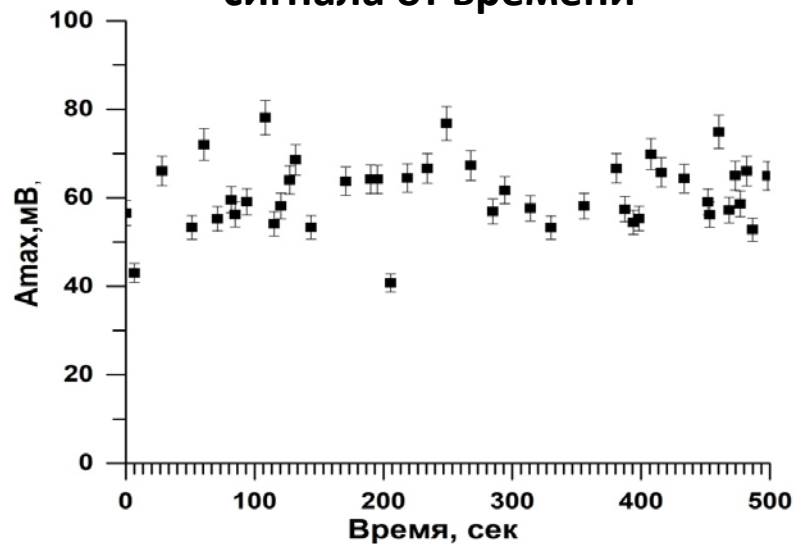
Измерения проводились в НИЯУ МИФИ, в лаборатории корпуса №24, длительность измерений 90459 сек, зарегистрировано 5982 мюона

Фотография стенда для измерения потока мюонов космических лучей прототипом системы антисовпадательных детекторов (АС) гамма-телескопа ГАММА-400:

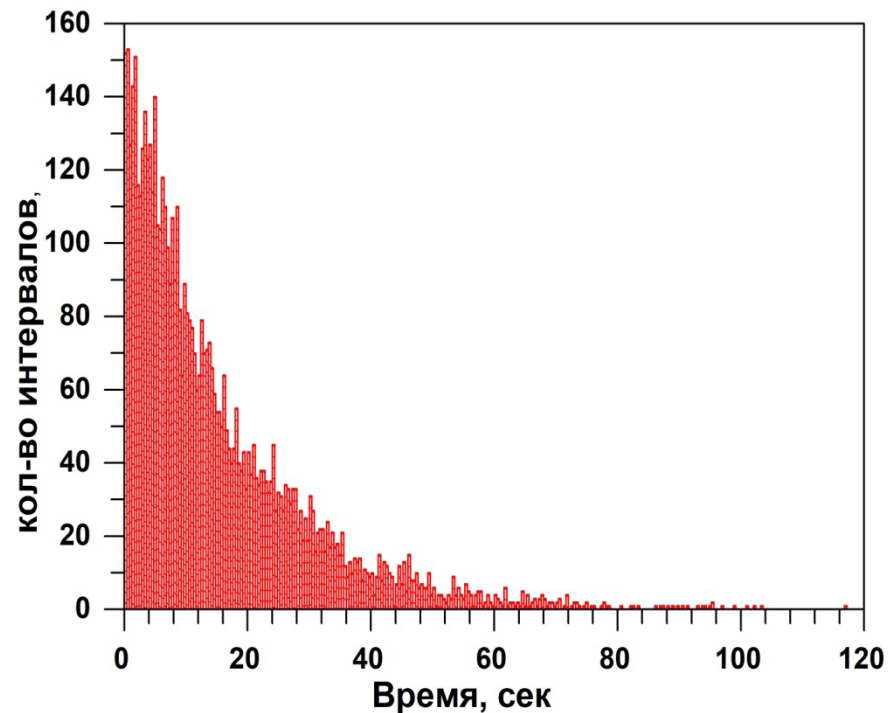
- 1 – телескоп счетчиков для выделения мюонной компоненты,
- 2 – прототип АС с SiPm на торцах кристаллов,
- 3 – фронтальная электроника для формирования импульса с детекторов



Зависимость амплитуды сигнала от времени



Временной ряд: максимальная амплитуда сигнала для каждой зарегистрированной частицы



Распределение интервалов времени между зарегистрированными частицами

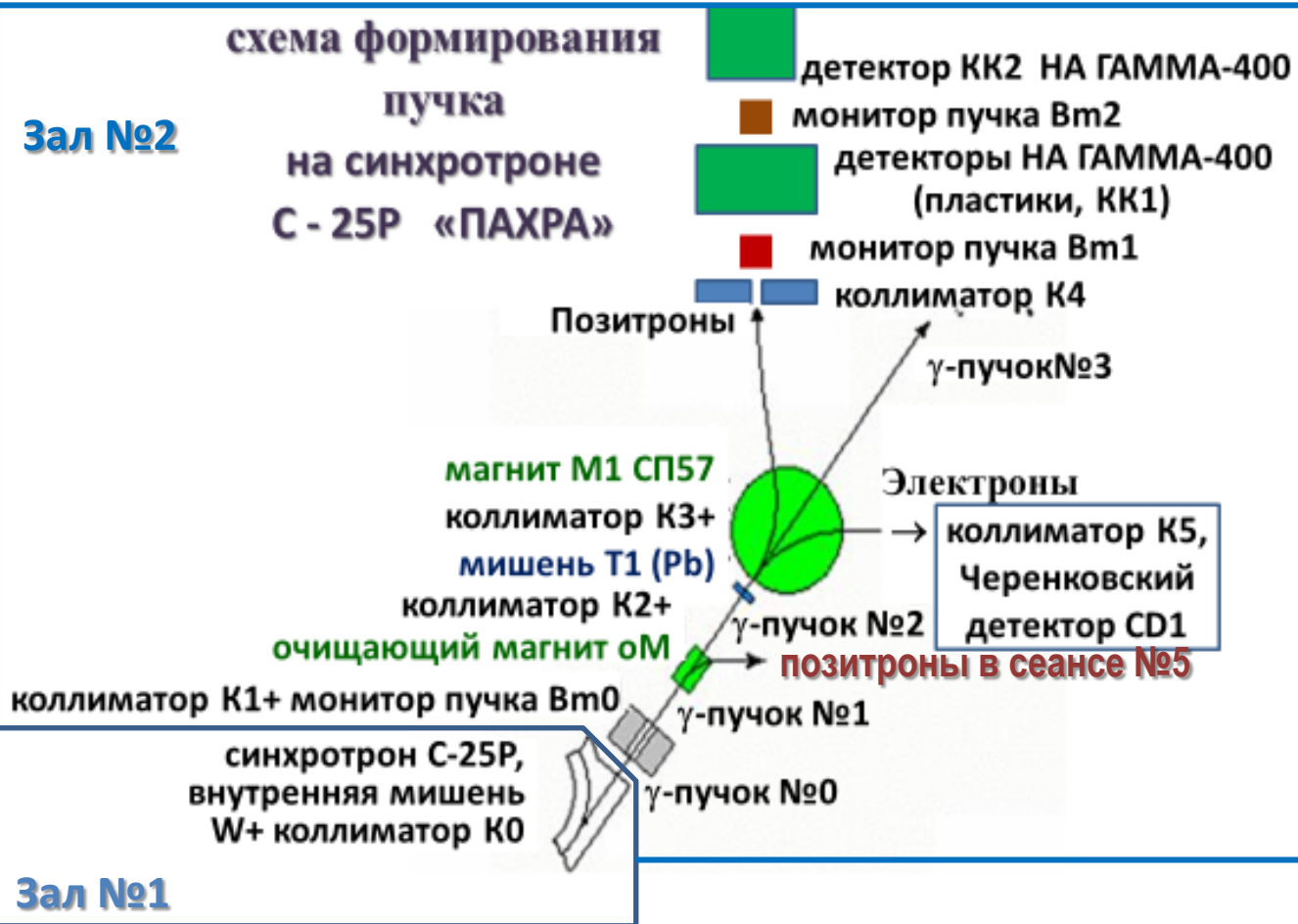
фрактальная размерность

$$k_{CR\mu} = 1.48 \pm 0.08$$

Измерение потока позитронов в калибровочном пучке вторичных позитронов синхротрона С-25Р «ПАХРА»

схема формирования пучка на синхротроне С-25Р «ПАХРА»

Зал №2



Зал №1

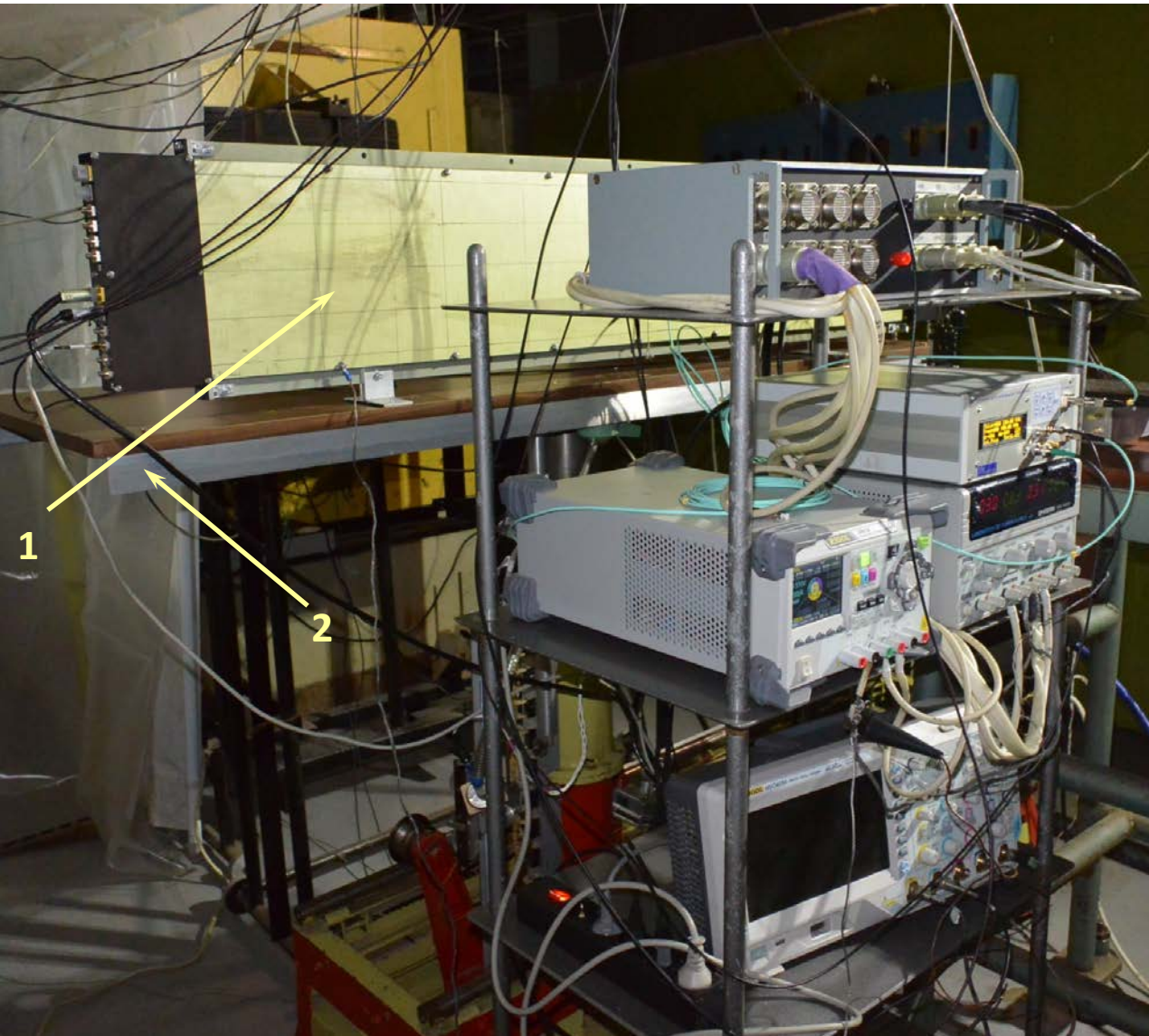
интенсивность I пучка e^+ составляла от $\sim 1 e^+/c$ до $\sim 10^2 e^+/c$, II пучок был сформирован на базе очищающего магнита oM, интенсивность II пучка e^+ составляет от $\sim 10 e^+/c$ до $\sim 10^3 e^+/c$.

Было проведено 5 сеансов калибровок макетов детекторов гамма-телескопа ГАММА-400:

- 1) 24.07.2017-07.08.2017,
- 2) 28.11.2017-11.12.2017,
- 3) 18.05.2018-28.05.2018
- 4) 26.11.2018-03.12.2018.
- 5) 20.06.2022-24.06.2022

В 1 сеансе использовался I вторичный пучок e^- , сформированный после гамма-пучка №2, в сеансах 2-4 – I вторичный пучок e^+ , сформированный после гамма-пучка №2, а в сеансе №5 – более интенсивный II вторичный пучок e^+ , сформированный после гамма-пучка №1

Измерение потока позитронов в I калибровочном пучке вторичных позитронов синхротрона С-25Р «ПАХРА»



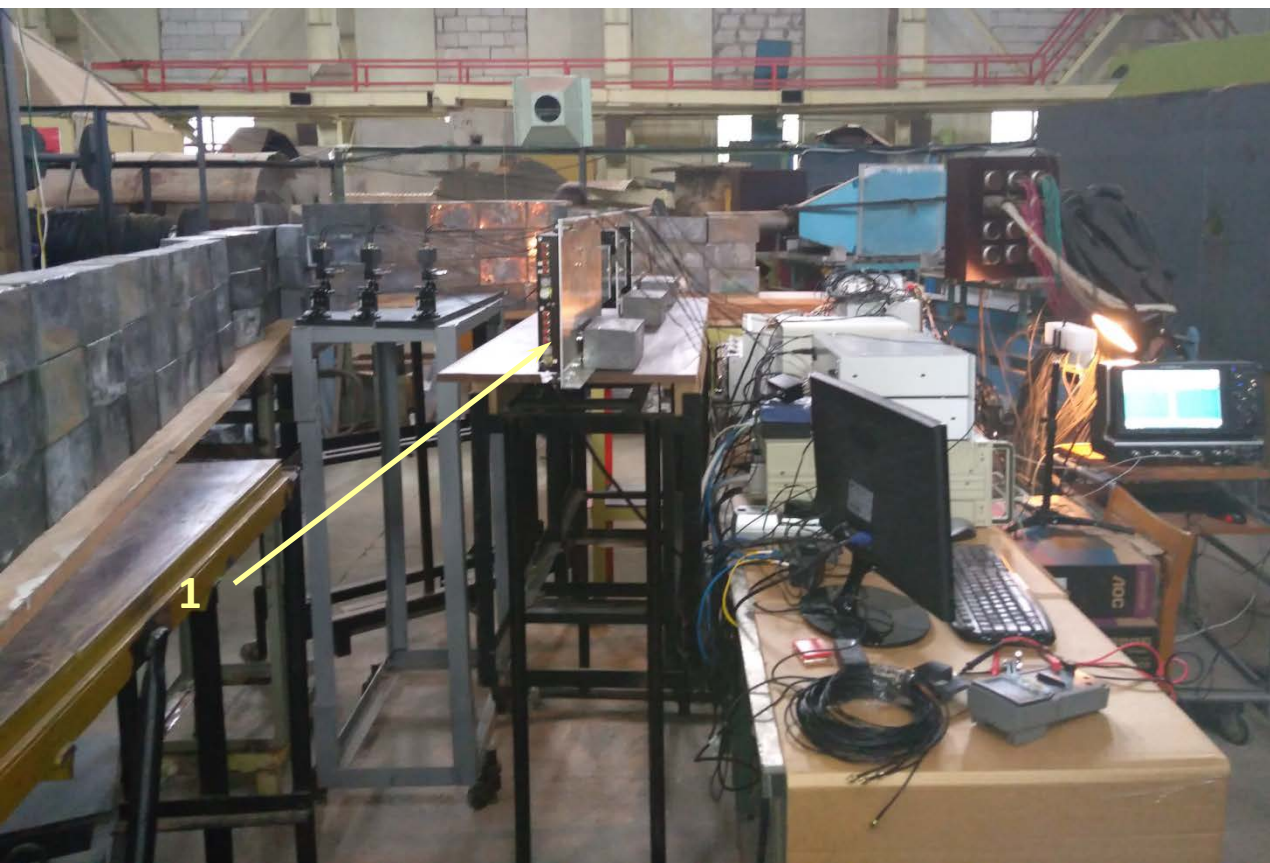
Первые измерения, сопровождавшиеся определением показателя фрактальности временного профиля детекторов макета АС_{верх} проводились в декабре 2018 г. на I пучке вторичных позитронов синхротрона «ПАХРА» с энергией 300 МэВ., длительность измерений 1039 сек, зарегистрировано 948 позитронов, полученная фрактальная размерность $k_{CR300} = 1.46 \pm 0.09$

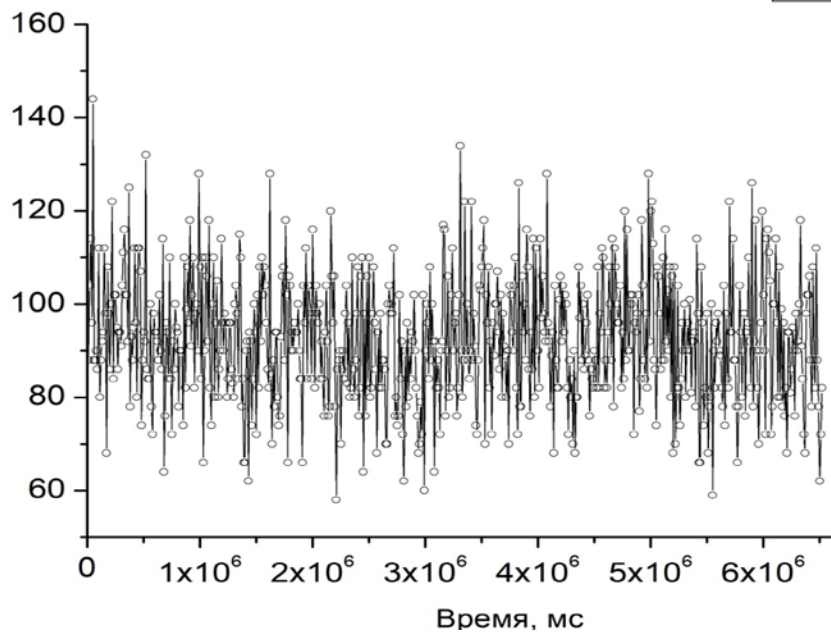
Фотография прототипа детектора АС_{верх} (1) на подвижной платформе (2) в зале №2 на четвертом этаже

Измерение потока позитронов во II калибровочном пучке вторичных позитронов синхротрона С-25Р «ПАХРА»

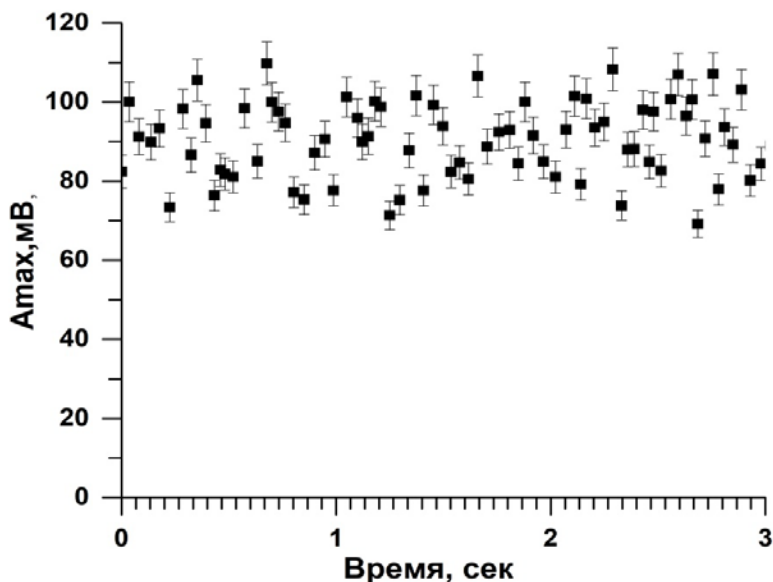
Дальнейшие измерения, сопровождавшиеся определением показателя фрактальности временного профиля детекторов макета АС_{верх} проводились в июле 2022 г. на II пучке вторичных позитронов синхротрона «ПАХРА» с энергией 225 МэВ., длительность измерений 6519 сек, зарегистрировано 65314 позитронов

Фотография прототипа детектора АС_{верх} (1) в зале №2 на пятом этапе

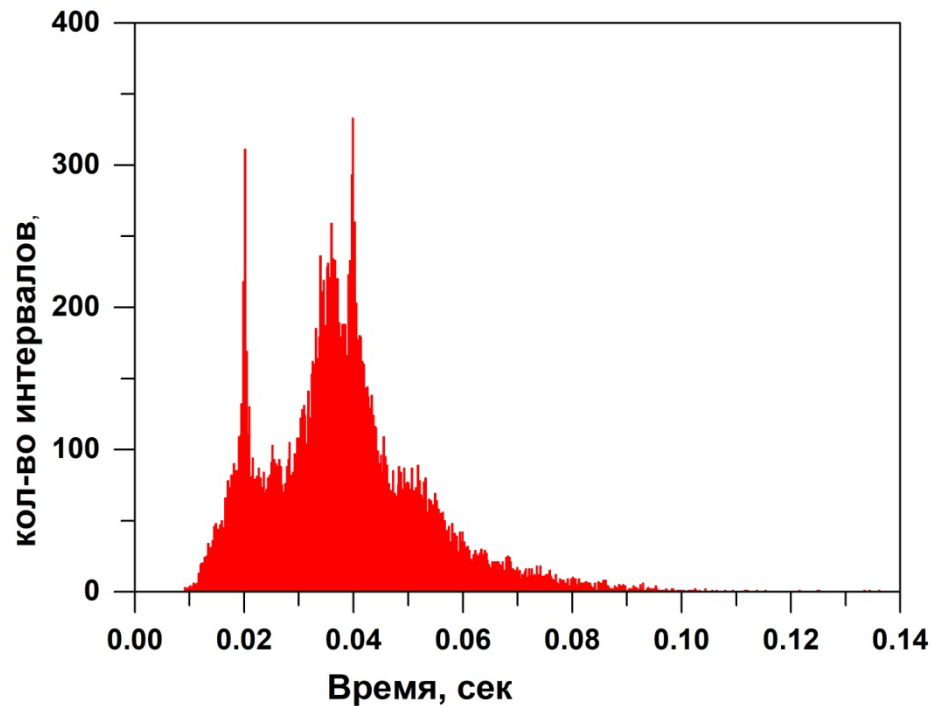




Зависимость амплитуды сигнала от времени



Временной ряд: максимальная амплитуда сигнала для каждой зарегистрированной частицы



Распределение интервалов времени между зарегистрированными частицами

фрактальная размерность

$$k_{CR225} = 1.50 \pm 0.04$$

Заключение

В работе рассматриваются возможные флуктуации фона в антисовпадательных счетчиках макета системы антисовпадательных детекторов (АС) γ -телескопа ГАММА-400, предназначенного для регистрации космического γ -излучения в диапазоне энергий от десятков МэВ до сотен ГэВ с высоким угловым и энергетическим разрешением. Изучались флуктуации фоновых временных профилей.

Приводятся показатели фрактальности временных профилей k_{CR} , зарегистрированных счетчиком на основе ВС-408 размером $1280 \times 10 \times 100$ мм³, во время измерений на калибровочном пучке вторичных позитронов синхротрона С-25Р “ПАХРА” с $E = 300$ МэВ (длительность измерений 1039 сек, зарегистрировано 948 позитронов) и $E = 225$ МэВ (длительность измерений 6519 сек, зарегистрировано 65314 позитронов), а так же мюонов КЛ (длительность измерений 90459 сек, зарегистрировано 5982 мюона). Предварительно получено $k_{CR\mu} = 1.48 \pm 0.08$, $k_{CR300} = 1.46 \pm 0.09$ и $k_{CR225} = 1.50 \pm 0.04$.

Соответственно, распределение флуктуаций скорости счета в этом детекторе Пуассоново (или Гауссово в зависимости от среднего значения скорости счета) или Эрлангово с коэффициентом пересчета не более 10, т.е. отсутствуют систематические ошибки, вызванные, например, проблемами в алгоритмах отбора событий или логики работы электроники.