

# 36

ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ

## Метод полетной калибровки орбитального телескопа космических лучей «ТУС»

---

КЛИМОВ ПАВЕЛ (НИИЯФ МГУ), ШАРАКИН СЕРГЕЙ (НИИЯФ МГУ),  
СИГАЕВА КСЕНИЯ (НИИЯФ МГУ)

Контактная информация:

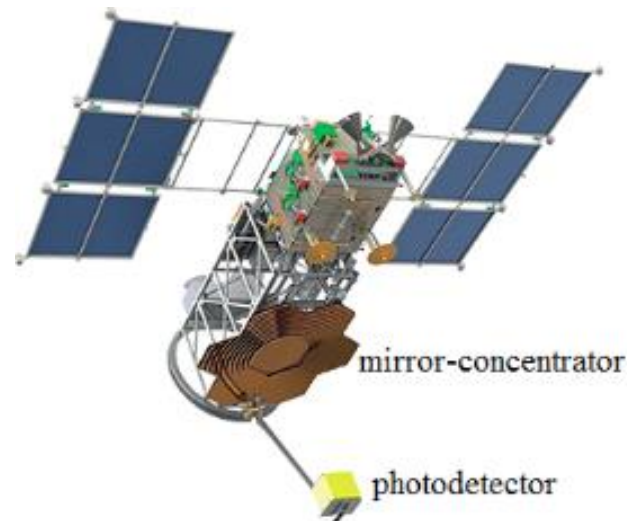
e-mail: [pavel.Klimov@gmail.com](mailto:pavel.Klimov@gmail.com)

Skype: pavel.klimov\_2

# Детектор «ТУС»

Детектор «ТУС» – первый орбитальный детектор космических лучей предельно высоких энергий запущен 28.04.2016 на борту спутника «Ломоносов».

Поле зрения	±4,5 град
Число каналов	16 модулей по 16 ФЭУ
Размер пикселя	10 мрад (5×5 км)
Площадь зеркала	~2 м <sup>2</sup>
Время экспозиции	30 %



Из-за сбоя системы управления высоковольтным питанием ФЭУ на первых витках работы прибор некоторое время проработал на дневной стороне, из-за чего чувствительность ФЭУ в матрице детектора изменилась и использование предполетной калибровки стало невозможным.

# Методика оценки чувствительности каналов фотоприемника детектора ТУС

В данной работе под калибровкой ФЭУ понимается определение коэффициента усиления ФЭУ для каждого канала фотоприемника, которое позволяет поставить в соответствие записанный в кодах АЦП сигнал и количество фотонов, попавших на катод ФЭУ.

Идея определения коэффициента усиления по характеристикам измеряемого сигнала основана на том, что при подаче стационарного сигнала на фотокатод ФЭУ дисперсия цифрового сигнала является линейной функцией его базового уровня (среднего значения кода АЦП).

В простейшем случае «нешумящего» линейного усиления:

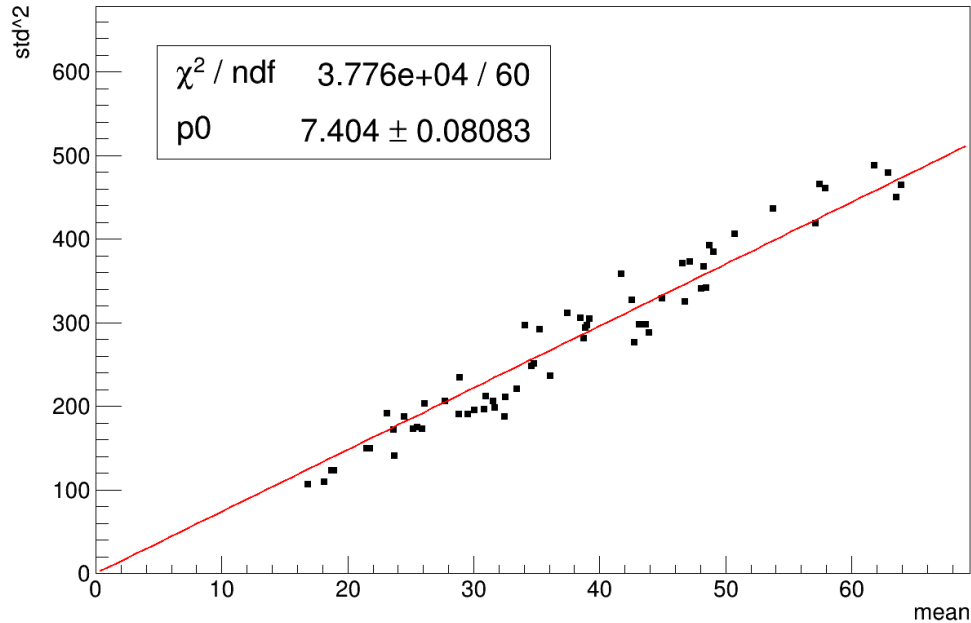
$$A = \frac{pIG_f q_e R}{\alpha}; \quad \sigma_A = \sqrt{\frac{pI}{2RC} \frac{G_f q_e R}{\alpha}}; \quad \frac{\sigma_A^2}{A} = \frac{G_f q_e}{2\alpha C}$$

$$\sigma_A^2 = p_0 * A + p_1 \Rightarrow p_0 = \frac{G_f q_e}{2\alpha C} \Rightarrow G_f = \frac{2\alpha C}{q_e} p_0$$

$A$  – среднее значение кода АЦП,  $p$  – квантовая эффективность фотокатода,  $G_f$  – коэффициент усиления ФЭУ,  $R$ ,  $C$  – сопротивление и емкость анодной цепи,  $q_e$  – элементарный заряд,  $\alpha$  – коэффициент перевода цифрового сигнала в напряжение на входе АЦП

# Пример линейной аппроксимации зависимости «Дисперсия—Среднее» для канала 211 фотоприемника детектора ТУС

211 ch stat



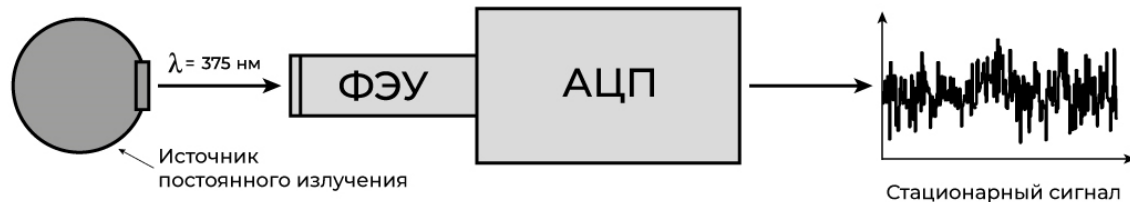
$$G_f = \frac{2\alpha C}{q_e} p_0 = \frac{2 \cdot 30 \text{ пФ}}{512 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}} 7.4 = 5.4 \cdot 10^6$$

# Лабораторная отработка методики. Поправочный коэффициент

$$G = \frac{\alpha Ahc}{p\omega\lambda q_e R}$$

$$\alpha = \frac{1}{512}; R = 2 * 10^4 \Omega; \lambda = 375 \text{ nm}; p = 0,2$$

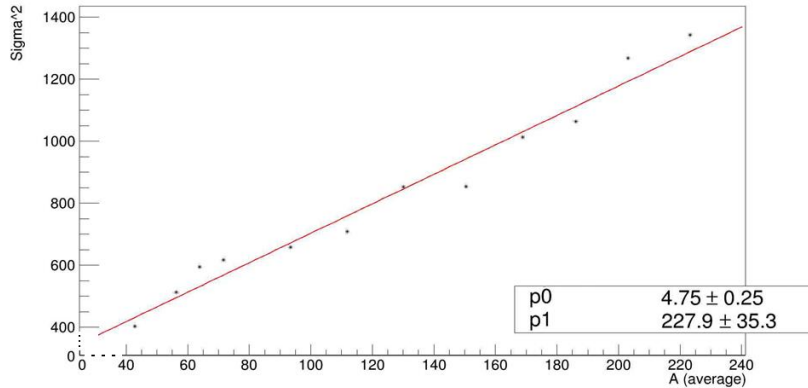
В ходе измерений проводилось определение коэффициенты усиления по известной мощности падающего излучения (см. формулу выше), так и по флуктуациям сигнала.



Для проверки методики была проведена отработка на лабораторном макете фотоприемника детектора ТУС, который представляет собой один модуль и материнскую плату обработки сигнала. Вся электроника, ФЭУ, цифровая часть обработки сигнала и формат выходного файла данных идентичны тем, что используются в детекторе ТУС непосредственно на борту космического аппарата.

*Принципиальная схема наземного макета  
Использовалась для калибровки макета  
и проверки методики полетной  
калибровки по флуктуациям сигнала*

# Лабораторная отработка методики. Поправочный коэффициент



Пример измерений на лабораторном макете: Зависимость сигма квадрат от среднего для ФЭУ VD8771

Оказалось, что оценка  $G_f$  по флуктуациям кода АЦП, почти в три раза превышает значение, полученное в ходе прямого измерения.

$$K = \frac{G_f}{G} \approx 2,7 \pm 0,9$$

Отличие  $K$  от единицы связано с наличием дополнительных шумов в электронике, которые существенно увеличивают флуктуации сигнала, не изменяя его среднего значения.

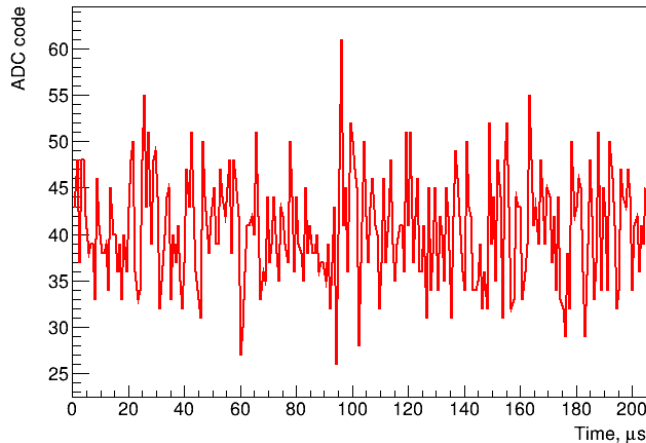
Большой разброс значений  $K$  определяется тем, что коэффициент усиления зависит как от самого ФЭУ, так и от его положения в модуле (т.е. от распределения напряжения питания по диодной системе).

# Калибровка фотоприемника «ТУС» в полете»

---

# Отбор калибровочных сигналов

Для калибровки прибора необходимо предварительно отобрать из базы данных события со стационарными сигналами



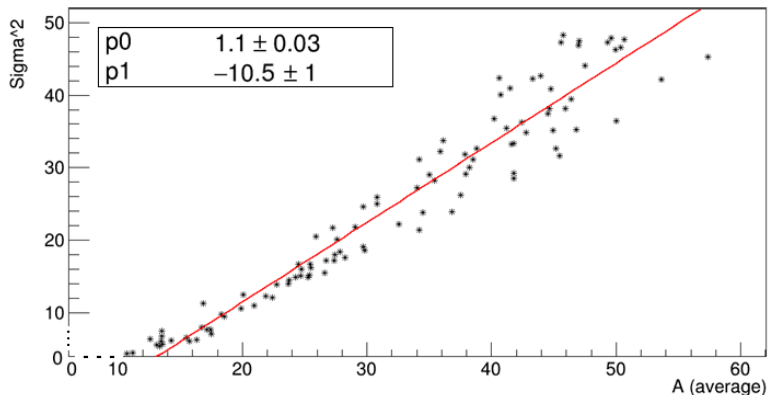
Критерии отбора калибровочных сигналов:

- Код высокого напряжения должен быть равен 255, чтобы обеспечить максимальную чувствительность ФЭУ. Коду 255 соответствует напряжение в диодной системе 1100 В;
- Стационарность сигнала: при делении сигнала на 8 частей среднее значение сигнала на каждом отрезке может меняться в пределах одного процента относительно среднего значения всего сигнала;
- Событие должно быть зарегистрировано в режиме с наилучшим возможным временным разрешением (режим «ШАЛ»).



# Калибровка детектора «ТУС»

Для отобранных событий, отвечающих критериям производится расчет среднего значения сигнала и его стандартного отклонения. Для каждого канала фотоприемника, строится аппроксимация Дисперсия - Среднее (пример для канала 126 фотоприемника детектора ТУС показан на рис.) и производится расчет коэффициента усиления  $G_f$ , делением которого на  $K$  получается искомая величина  $G$



Результат аппроксимации  $\sigma^2(A)$  для 126 пикселя.

$$G_f = \frac{2\alpha C}{q_e} p_0; \quad K = \frac{G_f}{G} \approx 2,7 \pm 0,9$$

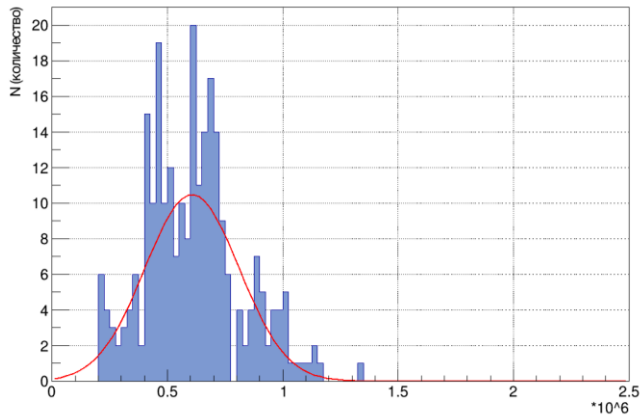
Значение коэффициента усиления ФЭУ для 126 пикселя

$$G \approx (0,29 \pm 0,10) * 10^6$$

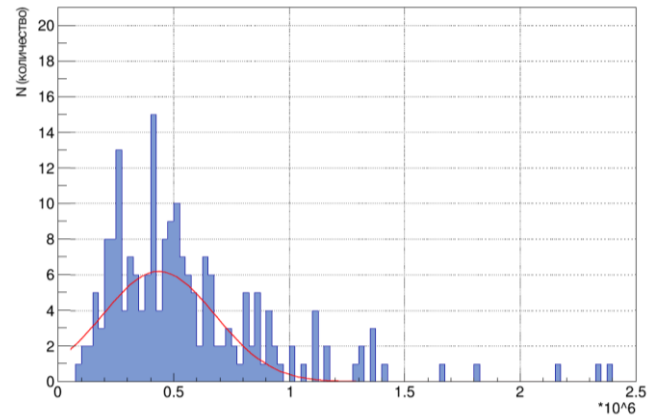
Аналогичные расчеты были проведены и для всех работающих каналов детектора.

# Сравнение с предполетной калибровкой

С целью анализа изменения характеристик ФЭУ после воздействия прямого солнечного излучения было проведено сравнение результатов проведенной калибровки с предполетной калибровкой прибора. Из сравнения видно, что максимум распределения сместился левее, то есть в целом, добавилась большая доля ФЭУ с низким коэффициентом усиления. Но для нескольких каналов наблюдается повышение коэффициента усиления ФЭУ, что, скорее всего, отражает большую ошибку метода калибровки. **Важно отметить, что ряд каналов фотоприемника не удалось откалибровать таким способом, в виду их очень слабой чувствительности.**



*Распределение коэффициентов усиления ФЭУ детектора фотоприемника «ТУС» для предполетной калибровки.*



*Распределение коэффициентов усиления ФЭУ детектора фотоприемника «ТУС», полученных в данной работе.*

# Заключение

---

- ✓ Полетная калибровка основана на анализе дисперсии и среднего значения стационарного сигнала и той особенности, что дисперсия кода АЦП является линейной функцией его среднего значения, что позволяет проводить калибровку в отсутствии эталонного источника света.
- ✓ Для проверки методики была проведена калибровка ФЭУ лабораторного макета фотоприемника детектора «ТУС» с помощью калиброванного источника излучения и сравнение получаемых коэффициентов усиления ( $G$ ) со значениями, рассчитываемыми по методу, основанному на анализе флуктуаций сигнала ( $G_f$ ). Показано, что коэффициенты усиления  $G$  и  $G_f$ , измеренные двумя способами, различаются, но пропорциональны друг другу. Среднее соотношение двух коэффициентов усиления составило 2,7, т.е. коэффициенты усиления, полученные по флуктуациям сигнала, в среднем завышены почти в 3 раза относительно коэффициентов усиления, полученных с помощью калибровочного сигнала.
- ✓ Проведена полетная калибровка фотоприемника детектора «ТУС» методом анализа флуктуаций сигнала с учетом полученного в лабораторном эксперименте поправочного коэффициента, которая будет в дальнейшем использоваться для анализа данных детектора.