

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 524.1

**ПОЛЕТНАЯ КАЛИБРОВКА ФОТОПРИЕМНИКА
ДЕТЕКТОРА ТУС**

© 2021 г. П. А. Климов^{а,*}, К. Ф. Сигаева^а, С. А. Шаракин^а

^а Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова
Россия, 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2

*e-mail: pavel.klimov@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2020 г.

После доработки 12.11.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Предложена методика полетной калибровки ф.э.у. фотоприемника орбитального детектора космических лучей предельно высоких энергий ТУС в условиях отсутствия калибровочного сигнала. Методика заключается в вычислении двух статистических характеристик оцифрованных сигналов зарегистрированных событий – их среднего A и дисперсии σ_A^2 – с последующим построением линейной аппроксимации $\sigma_A^2(A)$ для сигналов со стационарным уровнем. Проведена апробация методики в лабораторном эксперименте с модулем фотоприемника, идентичным установленным в детекторе. В результате были получены новые оценки коэффициентов усиления большинства каналов фотоприемника детектора ТУС и проанализированы произошедшие изменения (включая “эффект старения”).

DOI: 10.31857/S0032816221030204

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп ТУС (трековая установка) является орбитальным детектором космических лучей предельно высоких энергий с энергиями порядка 10^{20} эВ. Регистрация частиц происходит посредством измерения флуоресцентного трека широкого атмосферного ливня (ш.а.л.) в диапазоне длин волн 300–400 нм и позволяет достичь большой, по сравнению с наземными флуоресцентными детекторами, экспозиции и равномерного обзора всего неба [1]. Эта методика была предложена еще в 1980 году Дж. Линсли [2] и впервые реализована в проекте ТУС [3–5].

Детектор представляет собой телескоп-рефлектор с большой апертурой (см. рис. 1), в состав которого входят зеркало-концентратор френелевского типа общей площадью 2 м^2 и фотоприемник на 256 каналов регистрации (с идентификаторами от $id = 1$ до $id = 256$). В качестве светочувствительных сенсоров в каналах фотоприемника использованы фотоэлектронные умножители (ф.э.у.) Hamamatsu R1463 [6]. Каждый канал имеет бленду черного цвета, защищающую его от боковой засветки, а также фильтр УФС1 диаметром 13 и толщиной 2.5 мм. Благодаря фильтру верхняя граница длины волны измеряемого излучения составляет 400 нм. Нижняя граница (порядка 240 нм)

определяется квантовой эффективностью фотокатода ф.э.у. В составе фотоприемника 256 каналов сгруппированы в 16 одинаковых модулей (см. рис. 2), имеющих общую систему высоковольтного питания, систему сбора и первичной обработки данных, реализованную на программируемой логической интегральной схеме фирмы XILINX.

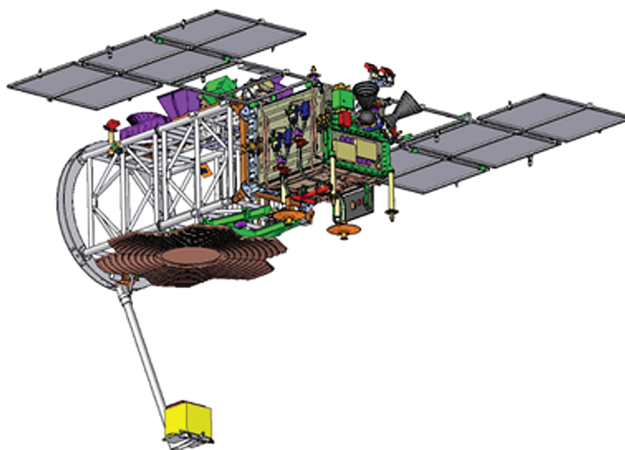


Рис. 1. Детектор ТУС в составе научной аппаратуры спутника “Ломоносов”.

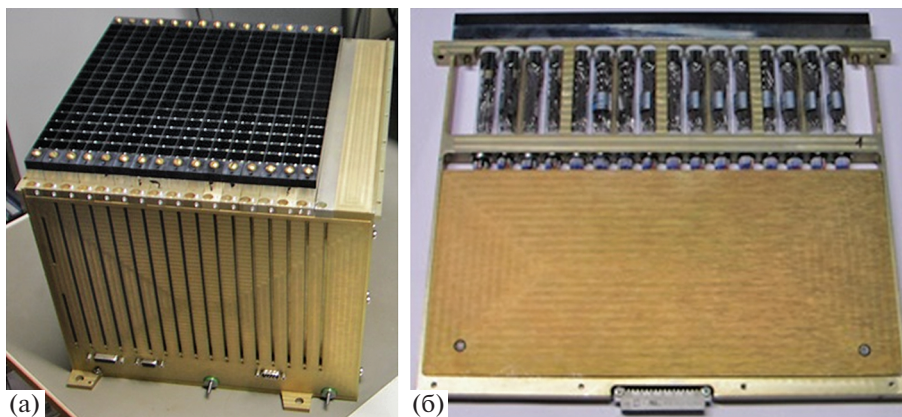


Рис. 2. 256-канальный фотоприемник детектора ТУС (а) и отдельный его модуль (б).

Основной режим работы электроники детектора предназначен для регистрации ш.а.л. и имеет временное разрешение 0.8 мкс, которое определяется частотой опроса аналого-цифрового преобразователя (а.ц.п.). Дополнительно к этому существуют еще три режима с более низким временным разрешением (25.6 мкс, 0.4 мс и 6.6 мс), предназначенные для регистрации различных транзитных атмосферных событий.

Важной особенностью электроники ТУС является наличие системы автоматической регулировки усиления (а.р.у.). В процессе работы детектора происходит постоянная (с частотой 20 Гц) подстройка усиления ф.э.у. за счет регулировки высокого напряжения таким образом, чтобы средний ток в анодной цепи оставался постоянным (~3 мкА). В условиях минимальной интенсивности свечения напряжение на ф.э.у. максимально (1100 В). При увеличении интенсивности фоновой засветки напряжение понижается, чувствительность ф.э.у. падает, и возможно измерение более мощного сигнала. Это позволяет функционировать детектору в условиях сильно переменного излучения атмосферы на ночной стороне орбиты. На дневной стороне напряжение не снимается полностью, а понижается до значений порядка 200 В.

Более детально с конструкцией прибора можно ознакомиться в работе [7], а первые результаты измерений приведены в [8–10].

28 апреля 2016 года детектор ТУС в составе научной аппаратуры спутника “Ломоносов” был запущен на солнечно-синхронную орбиту с наклоном 97.3° и периодом обращения 94 мин на высоте около 500 км. Срок активного существования аппарата на орбите составил около полутора лет.

Во время первых включений прибора на орбите произошел сбой в работе системы а.р.у., связанный с тем, что алгоритм понижения напряже-

ния не срабатывал при частичной мощной засветке модуля фотоприемника. В этом случае в нескольких ф.э.у. протекает большой ток, шунтируя делитель высокого напряжения и, тем самым, понижая сигнал во всех остальных каналах. Таким образом, до исправления алгоритма работы а.р.у. прибор провел некоторое время на дневной стороне орбиты с максимальным усилением. В результате этого часть ф.э.у. вышла из строя, оказались полностью нерабочими два модуля и несколько каналов в других модулях, а все остальные каналы изменили свою чувствительность.

Как следствие, использование калибровок, проведенных до полета космического аппарата, оказалось невозможным, и возникла необходимость в разработке и проверке методики полетной калибровки детектора, т.е. определения коэффициентов усиления ф.э.у. и чувствительности каналов регистрации на основе данных самого прибора.

В данной статье описана методика определения коэффициентов усиления ф.э.у. фотоприемника на основе статистических флуктуаций сигнала, а также ее проверка в лабораторном эксперименте на макете детектора. В результате проверки был определен поправочный коэффициент, что позволило применить методику для вычисления чувствительности каналов фотоприемника детектора ТУС.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАНАЛОВ

В данной работе под калибровкой ф.э.у. понимается определение коэффициента усиления ф.э.у. для каждого канала фотоприемника, позволяющего ставить в соответствие записанный в кодах а.ц.п. сигнал и количество фотонов, попавших на фотокатод ф.э.у. (квантовая эффективность фотокатода мало меняется от одного ф.э.у. к другому и считается известной).

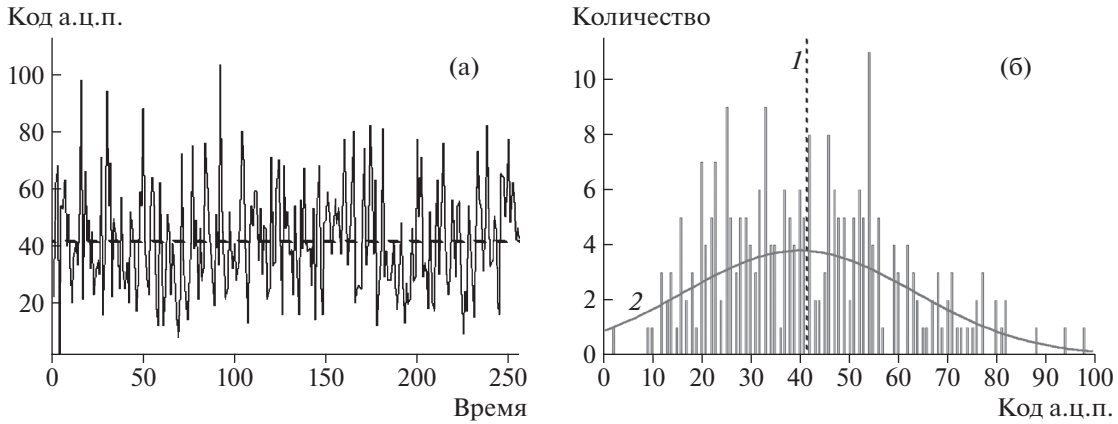


Рис. 3. а – временная форма стационарного цифрового сигнала (в кодах а.ц.п.), полученного при постоянном освещении фотокатода ф.э.у. (время выражено в тактах электроники длительностью 800 нс); б – гистограмма распределения кодов а.ц.п. и ее гауссова аппроксимация (кривая). Штриховой линией на обоих рисунках обозначено среднее значение.

Каждое событие, зарегистрированное детектором ТУС, представляет собой набор из 256 цифровых сигналов – кодов 10-битного а.ц.п. Стационарный поток фотонов на входе фотоприемника преобразуется в канале в цифровой сигнал, флуктуирующий вокруг определенного среднего значения – базового уровня кода а.ц.п. (рис. 3). Базовый уровень определяется интенсивностью входного потока, а размер флуктуаций, в основном, – случайным процессом образования фотоэлектронов на фотокатоде ф.э.у.

Традиционным способом калибровки ф.э.у. в режиме постоянного тока является расчет коэффициента усиления G по базовому уровню A стационарного потока света:

$$G = \frac{A}{\alpha q_e R \eta I}, \quad (1)$$

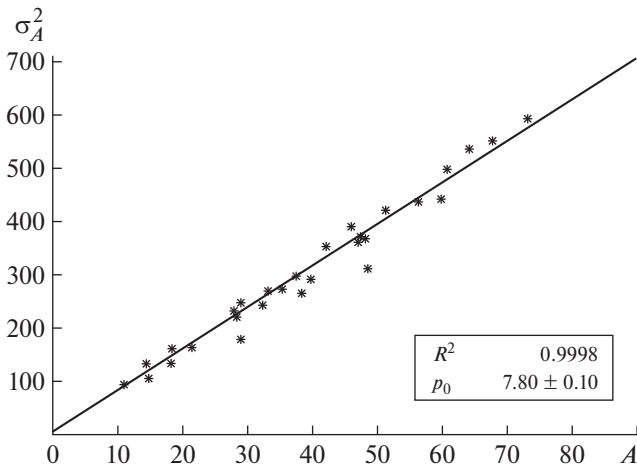


Рис. 4. Прямая пропорциональность зависимости дисперсии стационарного сигнала в канале id = 211 от его базового уровня.

где I – интенсивность потока фотонов на фотокатоде ф.э.у. (количество фотонов в единицу времени), η – квантовая эффективность, α – коэффициент трансформации аналогового сигнала в цифровой, R – сопротивление анодной цепи, $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – фундаментальный заряд.

Существенным для реализации данного метода является наличие калибровочного сигнала с известной интенсивностью.

Если же такого калибровочного сигнала нет, то можно воспользоваться тем, что для стационарного светового потока при интегрировании анодного тока на сопротивлении и емкости C анодной нагрузки на выходе ф.э.у. в идеальном случае (при отсутствии шума усилителя) дисперсия кода а.ц.п.

σ_A^2 будет прямо пропорциональна величине A :

$$\sigma_A^2 = \frac{\eta I}{2RC} (\alpha q_e R G)^2. \quad (2)$$

Таким образом, коэффициент пропорциональности p_0 позволяет однозначно определить усиление¹ ф.э.у.:

$$G_f = p_0 \frac{2C}{\alpha q_e}. \quad (3)$$

Для такой калибровки может быть использован любой стационарный (или квазистационарный) световой поток, причем, в данном случае знание его интенсивности не требуется.

Пример зависимости $\sigma_A^2(A)$ для одного из каналов детектора приведен на рис. 4.

Для проверки методики был проведен лабораторный эксперимент на макете фотоприемника, представляющего собой один модуль и материн-

¹ Чтобы отличить полученный таким образом коэффициент усиления от прямой калибровки (1), будем использовать индекс f (от англ. fluctuation).

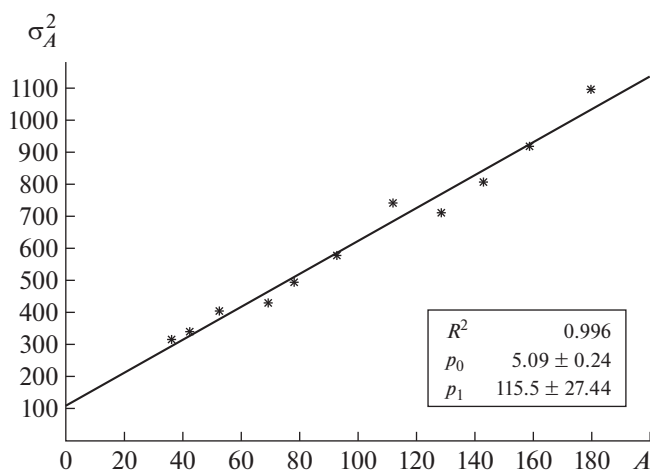


Рис. 5. Зависимость дисперсии от базового уровня для ф.э.у. VE0689 (по результатам лабораторных измерений при 11 уровнях освещенности фотокатода).

скую плату обработки сигнала. Вся электроника: ф.э.у., цифровая часть обработки сигнала и формат выходного файла данных идентичны используемым в детекторе ТУС непосредственно на борту космического аппарата.

В ходе лабораторного эксперимента макет располагался в черном непроницаемом для света боксе и освещался квазимонохроматическим источником света (у.ф.-светодиод NSHU550A, $\lambda = 375$ нм). Через коллиматор $\varnothing 1$ мм излучение подавалось непосредственно на фотокатод ф.э.у. Контроль постоянства мощности излучения осуществлялся с помощью калиброванного измерителя мощности LaserStar и фотодиодов Ophir (PD300-UV-193).

В измерениях при фиксированной мощности определялись базовый уровень и дисперсия сигнала. Варьируя интенсивность излучения источника, получали набор точек на плоскости $\sigma_A^2 - A$, позволяющий оценить коэффициент p_0 и коэффициент усиления G_f в соответствии с формулой (3). Пример применения данной процедуры для одного из ф.э.у. макета приведен на рис. 5.

Основным отличием от теоретической модели является замена прямой пропорциональности линейной зависимостью, $\sigma_A^2(A) = p_0 A + p_1$. Присутствие отличного от нуля свободного члена p_1 объясняется наличием в канале дополнительного аддитивного шума (например, шума а.ц.п.).

Одновременно с этим проводились измерения интенсивности излучения непосредственно на входе ф.э.у. Это позволяло провести прямое измерение коэффициента усиления (1) с $I = W_{in} \lambda / hc$, где W_{in} — мощность входного потока, λ — длина волны те-

стового излучения, h — постоянная Планка, c — скорость света.

Таким образом, в рамках лабораторного эксперимента для каждого из 25 каналов макета были получены две оценки коэффициента усиления (при заданном напряжении) G_f — по статистическим флуктуациям и по калибровочному источнику G . Оказалось, что оценка усиления по флуктуациям кода а.ц.п. почти в 3 раза превышает значение, полученное в ходе прямого измерения. Из распределения поправочных коэффициентов $K = G_f / G$ для ф.э.у., протестированных на стенде, было получено среднее значение:

$$K = 2.7 \pm 0.9. \quad (4)$$

Отличие K от единицы вызвано наличием дополнительных шумов в электронике, которые существенно увеличивают флуктуации сигнала, не изменяя его среднего значения. В частности, дополнительный шум вносит импульсный источник высокого напряжения, что подтверждается уменьшением значения σ_A^2 при добавлении дополнительных емкостей на выходе источника.

Большой разброс значений K связан с тем, что коэффициент усиления зависит как от самого ф.э.у., так и от его положения в модуле (т.е. от распределения напряжения питания по диодной системе). Для контроля повторяемости и исследования зависимости от положения в модуле для нескольких ф.э.у. измерения проводились несколько раз, оценка (4) получена по 46 измерениям 25 ф.э.у.

Таким образом, полетную калибровку можно проводить по флуктуациям стационарного сигнала как $G = G_f / K$ с поправочным коэффициентом (4). Величина стандартного отклонения K говорит о том, что данная методика обладает достаточно большой погрешностью, более 30%.

КАЛИБРОВКА ФОТОПРИЕМНИКА ДЕТЕКТОРА ТУС

Для осуществления калибровки фотоприемника детектора ТУС предварительно из базы данных, зарегистрированных в режиме ш.а.л., были отобраны события, соответствующие (в пределах времени записи) стационарному световому потоку. При этом использовались только те события, код высокого напряжения которых равнялся 255, что соответствовало максимально возможной чувствительности фотоприемника.

Стационарность уровня (см. рис. 3б) для таких событий проверялась по критерию Фишера при разбиении всего временного интервала длительностью 256 тактов на $n = 8$ равных подинтервалов. В качестве дополнительного критерия отбора требовалось, чтобы базовый уровень превышал значение 10 — в этом случае можно пренебречь

ошибкой, связанной с дискретностью оцифровки слабых сигналов.

Из 256 каналов фотоприемника ТУС 51 вышел из строя, еще 9 имели настолько низкую чувствительность, что стационарные сигналы, удовлетворяющие перечисленным выше требованиям и которые могли бы быть использованы для калибровки, либо не были обнаружены, либо их количество не позволяло надежно провести калибровку. Для оставшихся 196 каналов всего было отобрано 50343 стационарных сигнала, причем количество таких сигналов от канала к каналу сильно варьируется (максимальное – 1534, минимальное – 11).

Для каждого канала по стационарному сигналу определялись значения базового уровня A и дисперсии σ_A^2 , точка с этими координатами наносилась на соответствующую двумерную диаграмму для последующей линейной аппроксимации. Оценка коэффициента p_0 и расчет по (3) G_f и $G = G_f/2.7$ завершали процедуру калибровки.

Медианное значение 196 коэффициентов усиления G , полученных в результате полетной калибровки, составило $0.51 \cdot 10^6$.

С целью анализа изменения чувствительности ф.э.у. после воздействия прямого солнечного излучения было проведено сравнение полученного распределения коэффициентов усиления с измеренным в рамках предполетной калибровки прибора (рис. 6). Распределение стало заметно шире: стандартное отклонение G увеличилось от $0.21 \cdot 10^6$ до $0.38 \cdot 10^6$. При этом у нескольких ф.э.у. чувствительность понизилась до $G < 10^5$, а для некоторых – наоборот, увеличилась (скорее всего, это следствие большой ошибки метода).

Кроме упомянутой выше невозможности откалибровать слабочувствительные каналы, в ряде случаев возникали проблемы другого характера. На рис. 7а изображена диаграмма “Базовый уровень – Дисперсия” для “сильношумящего” канала id = 125, для которого значительный разброс дисперсий при фиксированном значении базового уровня не позволяет надежно установить линейную функцию $\sigma_A^2(A)$. По всей видимости, это связано с тем, что данный ф.э.у. был сильно поврежден во время освещения солнечным светом на дневной стороне, что и привело к появлению дополнительных шумов самого ф.э.у., не связанных с сигналом. (Отметим также, что данный ф.э.у. расположен в модуле с максимальным числом неработающих каналов.)

На диаграмме канала id = 241 (рис. 7б) в области $A \sim 50$ наблюдается излом, свидетельствующий об изменении чувствительности данного канала уже в процессе работы прибора. В январе 2017 года детектор сначала был на месяц переведен в режим регистрации медленных событий, за-

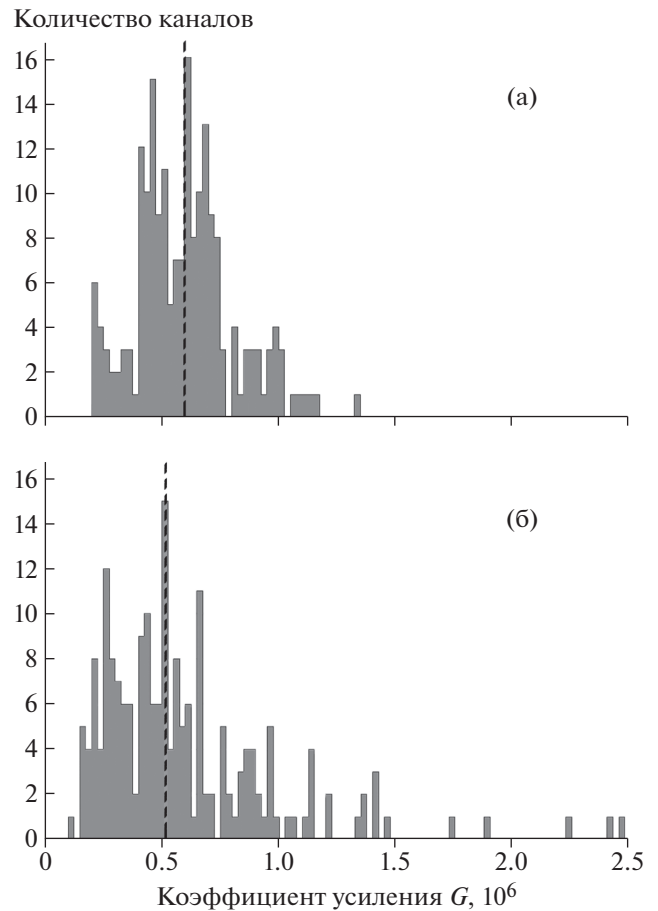


Рис. 6. Распределения коэффициентов усиления G детектора фотоприемника ТУС: а – предполетная калибровка; б – полетная калибровка. Вертикальной штриховой линией отмечено медианное значение.

тем выключен, и включен в режиме ш.а.л. только с апреля 2017 г. На рисунке показаны линейные аппроксимации, построенные по стационарным сигналам отдельно для 2016 и 2017 гг. Они соответствуют изменению G от $1.2 \cdot 10^5$ до $0.9 \cdot 10^5$, т.е. примерно на 30%.

Кроме резкого изменения может наблюдаться постепенное уменьшение чувствительности канала, вызванное, в частности, действием мощного излучения на солнечной стороне орбиты. Для анализа такого “эффекта старения” для ряда каналов с большой статистикой стационарных сигналов было проведено отдельное исследование зависимости G от времени функционирования на орбите. В качестве примера на рис. 8 изображены вариации чувствительности канала id = 241 (выраженные в единицах G_f), построенные по ежемесячным данным в течение года. Видно, что в 2016 году происходило постепенное снижение чувствительности канала, а в 2017 году – ее стабилизация.

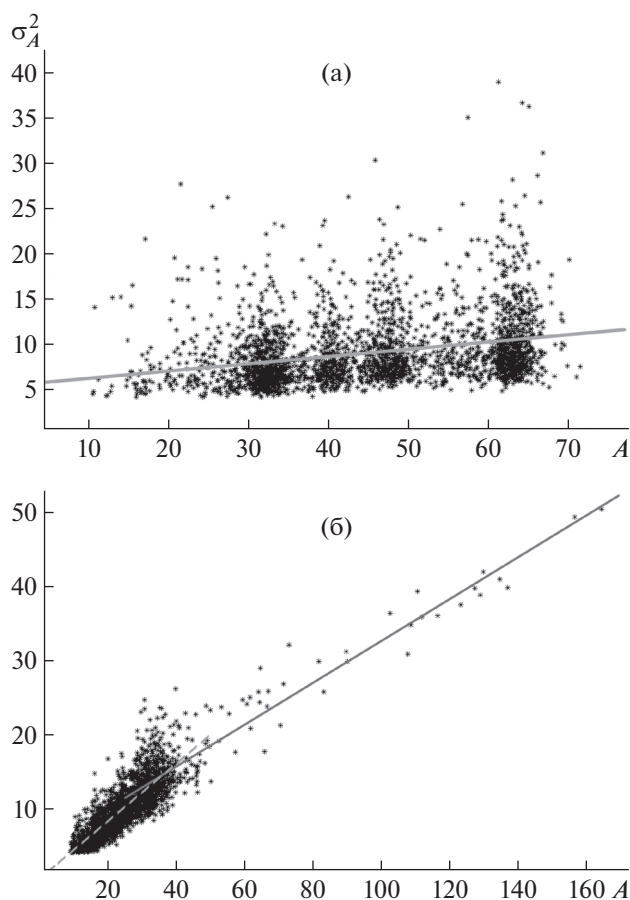


Рис. 7. Диаграмма “Базовый уровень – Дисперсия” для каналов с нелинейной зависимостью: **а** – “нешумящий” канал id = 125, **б** – канал id = 241 с резким изменением чувствительности. Линейная аппроксимация отдельно для 2016 и 2017 гг. проведена штриховой и сплошной линиями соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2016–2017 годах на околоземной орбите регистрировал у.ф.-свечение в атмосфере детектор космических лучей предельно высоких энергий ТУС. В первые дни работы в результате сбоя в системе автоматической регулировки усиления ф.э.у. изменилась чувствительность каналов фотоприемника. Так как калибровочных источников излучения в аппаратуре ТУС предусмотрено не было, то возникла необходимость разработки методики полетной калибровки детектора, использующей в качестве входных данных непосредственно измерения прибора.

Предлагаемая в данной работе полетная калибровка основана на линейной зависимости дисперсии стационарного сигнала от его базового уровня (среднего значения): угловой коэффициент данной зависимости пропорционален коэффициенту усиления ф.э.у. Для проверки методики и оценки коэффициента пропорциональности

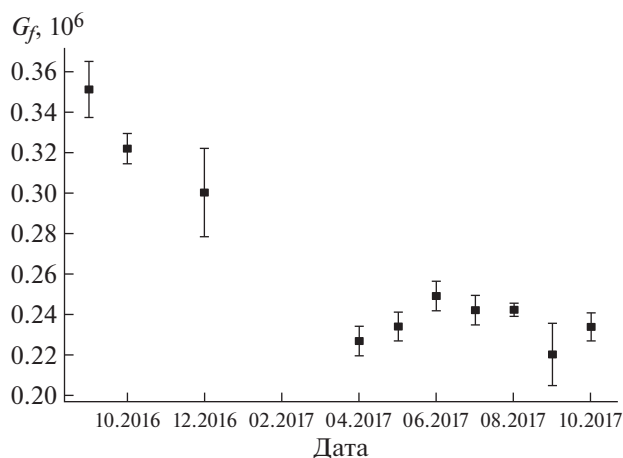


Рис. 8. Вариации оценки коэффициента усиления G_f канала id = 241 с сентября 2016 по октябрь 2017 года.

был проведен лабораторный эксперимент с макетом фотоприемника ТУС. Значение коэффициента пропорциональности варьируется от ф.э.у. к ф.э.у. и зависит от положения канала в модуле, поэтому точность метода невысока (погрешность не менее 30%).

На основании этого была осуществлена полетная калибровка фотоприемника ТУС, для чего из базы данных, зарегистрированных детектором на орбите, были отобраны стационарные сигналы. Оценка коэффициентов усиления для 196 из 256 каналов фотоприемника (51 канал вышел из строя, чувствительность 9 каналов оказалась слишком низкой) позволила проанализировать произошедшие в результате сбоя изменения, а также выявить временные вариации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Роскосмос и Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета “Фундаментальные и прикладные исследования космоса”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adams J.H. Jr., Ahmad S., Albert J.-N., Allard D., Ambrosio M., Anchordoqui L., Anzalone A., Arai Y., Aramo C., Asano K., Ave M., Barrillon P., Batsch T., Bayer J., Belenguer T. et al. // *Astroparticle Physics*. 2013. V. 44. P. 76. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2013.01.008>
2. Benson R., Linsley J. // *International Cosmic Ray Conference*. 1981. V. 8. P. 145.
3. Khrenov B.A., Panasyuk M.I., Alexandrov V.V. // *American Institute of Physics Conference Series*. 2001. V. 566. P. 57.

4. *Khrenov B.A.* // Nucl. Phys. B Proc. Suppl. 2002. V. 113. P. 115.
[https://doi.org/10.1016/S0920-5632\(02\)01830-3](https://doi.org/10.1016/S0920-5632(02)01830-3)
5. *Abrashkin V., Alexandrov V., Arakcheev Y., Bitkin E., Cordero A., Eremin S., Finger M., Garipov G., Grebenyuk V., Kalmykov N., Khrenov B., Koval V., Martinez O., Matyushkin A., Moreno E. et al.* // Advances in Space Research. 2006. V. 37. P. 1876.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.095>
6. Hamamatsu R1463 photomultiplier tube datasheet.
https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1463_TPMH1349E.pdf
7. *Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A., Garipov G.K., Kalmykov N.N., Petrov V.L., Sharakin S.A., Shirokov A.V., Yashin I.V., Zotov M.Y., Biktemerova S.V., Grinyuk A.A., Grebenyuk V.M., Lavrova M.V., Tkachev L.G. et al.* // Space Sci. Rev. 2017. V. 8. P. 1.
<https://doi.org/10.1007/s11214-017-0403-3>
8. *Khrenov B.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I., Sharakin S.A., Tkachev L.G., Zotov M.Yu., Biktemerova S.V., Botvinko A.A., Chirskaya N.P., Ereemeev V.E., Garipov G.K., Grebenyuk V.M., Grinyuk A.A., Jeong S., Kalmykov N.N. et al.* // J. Cosmology and Astroparticle Physics. 2017. V. 2017. P. 006.
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/09/006>
9. *Klimov P., Khrenov B., Kaznacheeva M., Garipov G., Panasyuk M., Petrov V., Sharakin S., Shirokov A., Yashin I., Zotov M., Grebenyuk V., Grinyuk A., Lavrova M., Tkachenko A., Tkachev L. et al.* // Remote Sensing. 2019. V. 11.
<https://doi.org/10.3390/rs11202449>
10. *Khrenov B.A., Garipov G.K., Kaznacheeva M.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I., Petrov V.L., Sharakin S.A., Shirokov A.V., Yashin I.V., Zotov M.Yu., Grinyuk A.A., Grebenyuk V.M., Lavrova M.V., Tkachev L.G., Tkachenko A.V. et al.* // J. Cosmology and Astroparticle Physics. 2020. 033–033.
<https://doi.org/10.1088/1475-7516/2020/03/033>