

УДК 537.591.15

## АЛГОРИТМ РЕКОНСТРУКЦИИ СОБЫТИЙ ТИПА ШАЛ ОРБИТАЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА “ТУС”

© 2019 г. С. А. Шаракин\*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

\*E-mail: sharakin@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 20.02.2019 г.

Принята к публикации 26.04.2019 г.

28 апреля 2016 г. на околоземную орбиту в составе научной аппаратуры спутника “Ломоносов” выведен детектор космических лучей предельно высоких энергий (КЛ ПВЭ) “ТУС”. Детектор проводит измерения флуоресцентного излучения широкого атмосферного ливня (ШАЛ), возникающего в атмосфере при попадании в нее космических лучей с энергией 100 ЭэВ и больше. В работе представлен алгоритм реконструкции направлений прихода частицы КЛ ПВЭ, в основе которого лежит аппроксимация трека (изображения ШАЛ) на матрице фотоприемника в виде равномерного прямолинейного движения точки (центроида изображения). Проверка метода и оценка его точности в случае гауссовой функции рассеяния точки (ФРТ) проведена на модельных примерах. Данный метод может быть использован как при реконструкции событий “ТУС”, так и будущих аналогичных миссий, например K-EUSO.

DOI: 10.1134/S0367676519080350

### Введение

За время своей работы на околоземной орбите “ТУС” (с мая 2016 г.) зарегистрировал ряд событий с характерными для ШАЛ пространственно-временными характеристиками. Детектор состоит из многоканального фотоприемника, расположенного в фокусе зеркала-концентратора площадью примерно 2 м<sup>2</sup> и фокусным расстоянием  $f = 1500$  мм. Отдельные каналы фотоприемника сгруппированы в модули (16 каналов в одном, всего 16 модулей). Входное окно каждого канала представляет собой квадрат (“пиксель”) со стороной  $a = 15$  мм, т.е. характерное угловое разрешение прибора составляет  $\gamma_{pix} = 10$  мрад. Задачей детектора является сбор флуоресцентного излучения ШАЛ и формирование изображения в виде трека на матрице каналов. Событие “ТУС” представляет собой запись цифрового сигнала (кода АЦП) фиксированной длительности (256 отчетов) по всем каналам фотоприемника. Конечные размеры пикселя, а также существенные абберации оптической системы и флуктуации фона делают нетривиальной задачу оценки параметров трека и последующую реконструкцию параметров исходной частицы КЛ ПВЭ. Детальное описание детектора и первые результаты анализа данных приведены в работах [1, 2].

### ТРЕК ШАЛ И ЕГО ПАРАМЕТРЫ

Перемещение точечного источника излучения в поле зрения орбитального детектора можно разложить на движение в плоскости, перпендикулярной лучу зрения (картинная плоскость), и движение вдоль луча зрения. Скорость  $v$  и направление движения источника связаны с угловой скоростью перемещения объекта в поле зрения:

$$\omega R = v \sin \beta / (1 + v/c \cos \beta), \quad (1)$$

где  $\beta$  — угол между направлением движения частицы и лучом зрения (при наблюдении в надир он совпадает с зенитным углом),  $R$  — расстояние от детектора до точки излучения, а  $c$  — скорость света. (Появление справа в (1) отличного от единицы знаменателя связано с эффектом запаздывания.) Для релятивистской частицы  $v \approx c$  и выражение (1) упрощается до  $\omega R = \text{ctg}(\beta/2)$ .

В модели “плоской” атмосферы (пренебрегая кривизной земной поверхности на масштабах характерной длины свечения) несложно показать, что  $\beta$  выражается через зенитный  $\Theta$  и азимутальный  $\Phi$  углы направления прихода частицы следующим образом:

$$\cos \beta = \cos \gamma \cos \Theta - \cos(\Phi - \Psi) \sin \gamma \sin \Theta, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — угол между лучом зрения и направлением в надир (полевой угол), а  $\Psi$  — азимутальный угол

луча зрения (т.е.  $(\Phi - \Psi)$  представляет собой угол между проекциями на земную поверхность траектории частицы и луча зрения). Для малых полевых углов  $\gamma \ll \Theta$  (узкопольный детектор или наблюдение вблизи центра поля зрения) получаем  $\beta \approx \Theta$ . В простейшем случае, когда плоскость “Детектор-Траектория источника” перпендикулярна поверхности земли,  $(\Phi - \Psi) = 0^\circ$  или  $180^\circ$  в зависимости от того к центру поля зрения движется источник или от него. Это соответствует предельным вариантам  $\beta = \Theta + \gamma$  и  $\beta = \Theta - \gamma$ . В более общем случае целесообразно провести разложение по  $\gamma$  как малому параметру ( $\gamma < \gamma_{max} = 4.5^\circ = 0.079$  рад), при этом  $\beta \approx \Theta + \gamma \cos(\Phi - \Psi)$ .

Таким образом, при фиксированных  $v$ ,  $\Theta$  и  $\Phi$  в первом приближении можно считать, что угловая скорость  $\omega$  в (1) со временем не меняется.

Движение в картинной плоскости проецируется оптикой детектора в виде динамически меняющегося изображения на фокальной поверхности (ФП). Характер изменений изображения определяется, в том числе, и направлением прихода релятивистской частицы. В частности, угловую скорость перемещения источника излучения можно связать с линейной скоростью перемещения изображения по ФП. Точнее, в каждом мгновенном изображении необходимо выделить его центроид, тогда последовательные положения данной движущейся по ФП “точки” будут располагаться вдоль прямолинейной траектории — *трека* точки. Скорость перемещения точки по треку связана с угловой скоростью и фокусным расстоянием оптической системы детектора:  $U = \omega f$ .

Выберем локальную систему координат, связав ее с симметрией “квадратного” фотоприемника: начало координат поместим в центре ФП, а оси  $X$  и  $Y$  ориентируем параллельно и перпендикулярно расположению модулей. В этом случае азимутальный угол  $\Phi$  совпадет с азимутальным углом трека, т.е.  $\text{tg}\Phi = U_x/U_y$ . При определении зенитного угла учтем поправку к  $\beta$  для момента времени, соответствующего максимуму кривой свечения (“точка максимума”):

$$\Theta \approx \beta - \gamma_m \cos(\Phi - \Psi_m). \quad (3)$$

### РЕКОНСТРУКЦИЯ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА

Таким образом, реконструкция направления прихода релятивистской частицы может быть определена как оценка параметров трека:

$$\begin{aligned} X(t) &= X_0(t) + U_x(t - t_0), \\ Y(t) &= Y_0(t) + U_y(t - t_0), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $X(t)$ ,  $Y(t)$  — декартовы координаты центроида изображения (“точки”) в момент времени  $t$ ,  $(X_0, Y_0)$  — точка трека, соответствующая некото-

рому моменту времени  $t_0$ . При этом проекции  $U_x$ ,  $U_y$  скорости точки в локальной системе координат считаются не меняющимися во времени (равномерное движение).

Для оценки поправки (3) выделим на треке точку максимума и вычислим ее координаты  $X_m$  и  $Y_m$ . В этом случае  $\gamma_m = \gamma_{pix} (X_m^2 + Y_m^2)^{1/2}/a$ , а  $\text{tg}\Psi_m = Y_m/X_m$ . Тогда значения  $U_x$ ,  $U_y$  однозначным образом связаны с интересующим нас направлением прихода, азимутальным и зенитным углами:

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{arctg}(U_y/U_x), \\ \Theta &= 2\text{arctg}(\omega R/c) - \gamma_m \cos(\Phi - \Psi_m), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\omega = (U_x^2 + U_y^2)^{1/2}/f$ , а расстояние  $R$  от детектора до источника излучения с достаточной точностью можно считать постоянным.

При использовании параметризации (4) важно помнить, что конечные размеры входных отверстий каналов (пикселей) приводят к огрублению информации с пространственным разрешением  $a = 15$  мм, а конечное время накопления и считывания сигнала осуществляет дискретизацию по времени с интервалом  $\tau = 800$  нс. Кроме того, ввиду оптических aberrаций реальное мгновенное изображение свечения ШАЛ не занимает один-единственный пиксель, а распределяется сразу по нескольким соседним.

В соответствие с этим в работе [3] был предложен простой эвристический метод, позволяющий оценивать параметры трека по его пикселизованным данным. Метод предполагает, что на предварительном этапе произведен отбор так называемых *сработавших* каналов, т.е. тех каналов фотоприемника, в которых присутствует сигнал от ШАЛ. Фактически в алгоритме осуществляется минимизация суммы квадратов отклонений координат сработавших пикселей от теоретической линейной интерполяции (4), отдельно по каждой из дискретной по времени зависимостей  $X(t_k)$  и  $Y(t_k)$ , где  $t_k = k\tau$ ,  $k = 1, \dots, 256$ .

Однако последующий анализ данной эвристики на модельных примерах выявил его существенный недостаток: результаты минимизации сильно зависят от набора сработавших пикселей, особенно при наличии в них слабых сигналов (либо на концах кривой свечения, либо из-за размывания сигнала за счет ФРТ). В настоящей работе метод был модифицирован с тем, чтобы частично уменьшить этот нежелательный эффект. В предлагаемом алгоритме, получившем название ЛТА (от англ. Linear Track Algorithm), минимизируется двойная сумма

$$\sum_i \sum_k W_i(t_k) (X_0 + t_k U_x - X_i)^2 \quad (6)$$

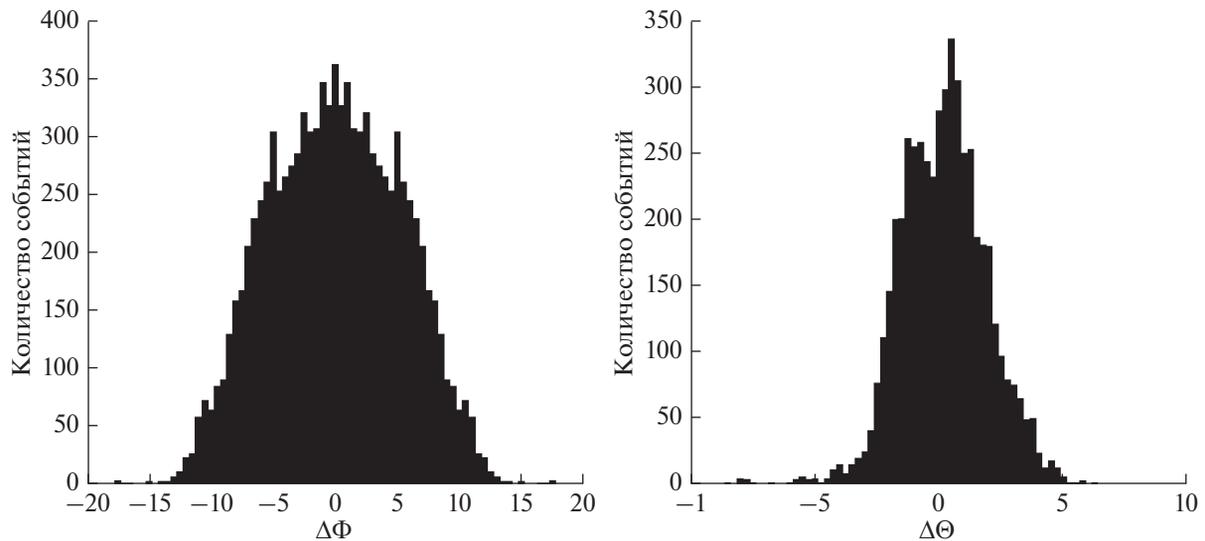


Рис. 1. Гистограммы ошибок реконструкции по методу ЛТА для модельных событий ( $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Phi$  равномерно распределено), слева – для азимутального угла, справа – зенитного.

по параметрам  $X_0$  и  $U_x$  (и аналогично по  $Y_0$  и  $U_y$  с коэффициентами  $Y_i$ ). Здесь  $X_i$ ,  $Y_i$  – координаты центра  $i$ -го сработавшего пикселя, а  $W_i(t_k)$  – соответствующий вес, пропорциональный величине сигнала в данном пикселе в момент времени  $t_k$  (см. далее).

Первая сумма в (6) пробегает по всем сработавшим каналам, а вторая – по так называемому временному “окну активности”,  $k \in [k_1(i), k_2(i)]$ . Введением такого временного окна удается уменьшить влияние на реконструкцию статистических флуктуаций в коде АЦП. Для этого сигнал каждого сработавшего канала (за вычетом базового уровня) предварительно аппроксимируется гауссовым и определяются моменты  $k_1$  и  $k_2$ , в которые этот аппроксимирующий сигнал первый и последний раз достигает определенного значения. Подбор оптимального значения этого порогового параметра (выраженного в долях от значения в максимуме), приводящего к наиболее устойчивым вариантам реконструкции, был произведен на модельных примерах. По той же причине веса  $W_i(t_k)$  связывались не с исходным, флуктуирующим сигналом (как в оригинальной методике [3]), а с его гауссовой аппроксимацией.

Как уже было отмечено, по своей сути предлагаемый метод реконструкции является эвристическим. Для успешного его применения в ходе восстановления параметров реальных событий детектора “ТУС” (примеры таких событий-кандидатов приведены в [4], а реконструкция методом ЛТА одного из них – в готовящейся к публикации работе) необходимо провести анализ его точности на модельных примерах.

### 3. ПРОВЕРКА МЕТОДА

Для проверки метода ЛТА был написан пакет программ в среде MATLAB, позволяющий создавать так называемое “гауссово событие” (с интенсивностью свечения, меняющейся во времени по гауссовому закону, с распределением энергии по отдельным каналам в соответствии с гауссовой функцией рассеяния точки и добавлением гауссового шума), формировать список сработавших каналов (отбирая каналы, сглаженный сигнал которых превосходит пороговое значение) и определять их окна активности (аппроксимируя флуктуирующий сигнал гауссовой функцией). В результате была поставлена задача подбора оптимальных значений управляющих методом параметров (порог отбора каналов и порог активности) и оценка точности реконструкции при этих значениях. Эта задача исследовалась для центра фотоприемника, когда различие углов  $\Theta$  и  $\beta$  можно пренебречь, расстояние  $R$  считалось известным и равным 500 км.

Распределение ошибок (разницы между реконструируемыми значениями параметров  $\Phi$  и  $\Theta$  и их значениями, соответствующим исходным  $U_x$  и  $U_y$ ) для направлений  $\Theta = 30^\circ$  приведено на рис. 1 для основной части поля зрения и низкого значения уровня шума. В качестве меры неточности метода удобно выбрать стандартные отклонения этих распределений:  $\sigma_\Phi = 5.3^\circ$ ,  $\sigma_\Theta = 1.7^\circ$ . Результаты для более сложных сценариев, на краю поля зрения и/или с увеличенным в 2 раза уровнем шума, представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Точность реконструкции направления прихода для двух вариантов ФРТ (соответствующих центру и периферии поля зрения) и двух уровней гауссового шума. Приведены стандартные отклонения для азимутального и зенитного углов, а также характерная величина угла  $\Delta\alpha$  между реконструируемым направлением прихода и исходным

Уровень шума	Центр поля зрения		Край поля зрения	
	низкий	высокий	низкий	высокий
$\sigma_\phi, ^\circ$	4.7	5.2	4.2	9.4
$\sigma_\theta, ^\circ$	2.4	2.6	2.6	3.6
$\Delta\alpha, ^\circ$	$3.0 \pm 1.5$	$3.4 \pm 2.0$	$3.1 \pm 1.4$	$5.3 \pm 2.5$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день в базе данных событий, зарегистрированных детектором “ТУС”, идентифицировано несколько событий с характерной для ШАЛ пространственно-временной структурой развития свечения. Определение направления прихода таких событий представляет собой важную часть задачи реконструкции. В данной работе был предложен один из способов определения направления прихода и показана его состоятельность на простейших модельных примерах. Следует отметить, что полученные ошибки метода являются нижними оценками, не учитывающими ряда дополнительных неопределенностей (форма ФРТ, распределение чувствительности каналов и проч.). Более полный анализ данного метода, его применение к отобраным событиям “ТУС”, а также сравнение с байесовскими подходами [5] будут приведены в другой работе.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ 16-29-13065-офи-м, финансировании Госкорпорации по космической деятельности РОСКОСМОС и поддержке Программой развития МГУ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov P.A., Panasyuk M.I., Khrenov B.A. et al. // Space Sci. Rev. 2017. V. 8. P. 1.
2. Khrenov B.A., Klimov P.A., Panasyuk M.I. et al. // J. Cosmol. Astropart. Phys. 2017. V. 2017. № 9. P. 006.
3. Tkachev L., Lomonosov—UHECR/TLE Collaboration // Proc. 35th ICRC. (Busan, 2017). P. 527.
4. Biktemerova S.V., Botvinko A.A., Chirskaya N.P. et al. // arXiv: 1706.05369. 2017.
5. Sivia D., Skilling J. Data Analysis: A Bayesian Tutorial. Oxford: OUP Oxford, 2006.