

## ПРОЕКТ АТМОСФЕРНОГО ЧЕРЕНКОВСКОГО ТЕЛЕСКОПА ДЛЯ ГАММА-ОБСЕРВАТОРИИ TAIGA

**В.В. Ленюк**

## PROJECT OF IACT FOR THE TAIGA GAMMA-RAY OBSERVATORY

**V.V. Lenok**

Предложен комбинированный метод детектирования гамма-квантов высоких энергий с помощью атмосферных черенковских телескопов и детектора большой площади HiSCORE. Данный метод будет применяться для поиска источников космических лучей сверхвысоких энергий (ПэВатронов) гамма-обсерваторией TAIGA. В качестве первого этапа моделирования комбинированной установки создана математическая модель атмосферного черенковского телескопа, на основе которой проведено исследование характеристик телескопа, проектируемого для обсерватории. В работе представлены результаты численных расчётов оптических характеристик телескопа и его энергетического порога.

Combined method of detection of the high energy gamma-quanta with the Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes (IACT) and the large-area detector HiSCORE is proposed. The method will be used for searching for ultra-high-energy cosmic ray sources by the TAIGA gamma-ray observatory. Since the combined instrument is complex, a mathematical model of an IACT has been created as the first stage of full simulation. Performance of the IACT telescope, designing for the observatory, has been studied using the model. Results of the numerical calculations of the telescope optical characteristics and its energy threshold are presented.

### **Введение**

Наземная гамма-астрономия высоких энергий – сравнительно новое, быстро развивающееся направление фундаментальных исследований в экспериментальной астрофизике. Ее методы основаны на косвенном детектировании гамма-квантов путем измерения параметров потоков излучений и вторичных частиц, возникающих при взаимодействии гамма-квантов высокой энергии с атмосферой Земли, — широких атмосферных ливней. Свыше ста источников гамма-квантов высоких энергий открыто с помощью этих методов за последние годы.

В современной астрофизике проблема происхождения космических лучей сверхвысоких энергий является одной из наиболее важных и интересных. Вопрос о существовании локализованных в пространстве источников таких лучей до сих пор остается открытым.

Известно, что восстановить положение источника космических лучей, наблюдая только заряженные космические лучи, невозможно. Напротив, гамма-кванты, не изменяя направления распространения при воздействии электромагнитных полей в космическом пространстве, такую возможность обеспечивают. Так как, согласно современным представлениям, источники заряженных космических лучей сверхвысоких энергий также являются источниками гамма-квантов высокой энергии, то наблюдение последних может служить способом поиска источников.

Спектр таких гамма-квантов, по данным теоретических исследований, должен простираться до диапазона порядка сотен ПэВ, поэтому их источники принято называть ПэВатронами. Наиболее вероятными кандидатами на их роль являются молодые остатки сверхновых в Галактике, например Крабовидная туманность, сверхновая Тихо Браге, Кассиопея А и др.

Плотность потока космических лучей, и, в частности, гамма-квантов, значительно падает с ростом энергии. Как показывают расчеты, для эффективного детектирования частиц в ПэВ-диапазоне энергии

площадь, покрываемая установкой, должна составлять порядка  $1 \text{ км}^2$ . Это технически и экономически достаточно сложная задача. Однако, используя определённые свойства ливней и комбинируя преимущества различных методов детектирования частиц, можно создать экономичный по затратам и, в то же время, достаточно эффективный инструмент.

Ливень состоит из заряженных и нейтральных частиц, при распространении которых в атмосфере возникает черенковское, флуоресцентное и радиоизлучение. Измерение пространственного и временного распределения этих излучений позволяет определить параметры исходной частицы.

На сегодня отработаны и широко применяются два метода детектирования ливней: метод дискретизации фронта ливня и метод атмосферных черенковских изображений. Оба метода дают схожую точность определения направления прихода гамма-квантов, однако существенно различаются эффективностью подавления фоновых событий. Совместное использование обоих методов позволит реализовать преимущества каждого из них и повысить эффективность подавления адронного фона.

Кроме того, инструменты, строящие изображение ливня обходятся значительно дороже, чем инструменты, использующие метод дискретизации фронта ливня, так как содержат большое количество фотоэлектронных умножителей. Как правило, количество этих вакуумных приборов в камере одного телескопа сравнимо с их количеством во всем детекторе большой площади.

В гамма-обсерватории TAIGA предполагается использовать комбинированный метод детектирования гамма-квантов высоких энергий для поиска локализованных в пространстве источников космических лучей сверхвысоких энергий. Для этого будет организована совместная работа атмосферных черенковских телескопов и детектора большой площади HiSCORE. Это позволит значительно снизить стоимость комплекса аппаратуры, повысив, в то же время, его эффективность.

Перед анализом работы комплекса аппаратуры гамма-обсерватории TAIGA в целом, на первом этапе была построена математическая модель атмосферного черенковского телескопа, как наиболее сложного компонента комплекса, и проведено исследование его оптических характеристик и энергетического порога.

**Проект АЧТ гамма-обсерватории TAIGA**

Телескоп гамма-обсерватории TAIGA состоит из оптической системы и несущей конструкции. Оптическая система телескопа состоит из рефлектора, решетки светособирающих элементов и фотоэлектронных умножителей. Рефлектор выполнен по схеме Дэвиса-Коттона [Davies, 1957]. В фокальной плоскости рефлектора размещена гексагональная решетка светособирающих элементов. В качестве светособирающих элементов выбраны составные параболические концентраторы правильной шестиугольной формы. На выходных апертурах светособирающих элементов расположены входные апертуры фотоэлектронных умножителей. Геометрические параметры телескопа приведены в таблице.

Геометрические параметры проекта АЧТ для обсерватории TAIGA.

Площадь поверхности рефлектора	10 м <sup>2</sup>
Количество зеркал (сегментов)	36
Световой диаметр сегмента	600 мм
Фокусное расстояние	4750 мм
Относительное отверстие	1,13
Угол поля зрения	5°

Атмосферный черенковский телескоп – это оптический инструмент. Для исследования его характеристик как оптической системы был проведен расчет среднеквадратичного отклонения распределения излучения от среднего значения и радиус окружности, содержащей 80 % энергии излучения ( $D_{80}$ ), для изображения точечного источника расположенного на бесконечности на заданном угле поля. Моделирование прохождения света через оптическую систему проводилось методом точечных диаграмм широко описанным в литературе [Шрёдер, 2006; Herzberger, 1947]. Результаты расчетов представлены на рис. 1 и 2.

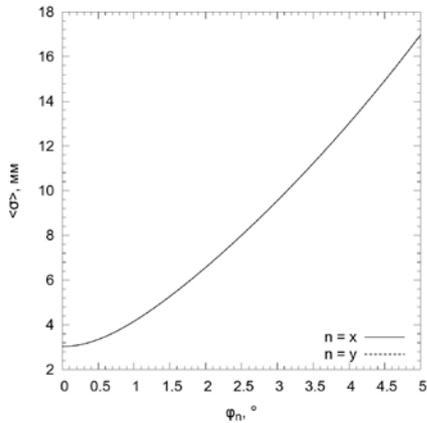


Рис. 1. График среднеквадратичного отклонения освещенности изображения точечного источника, расположенного на бесконечности, от среднего значения в зависимости от угла поля источника.

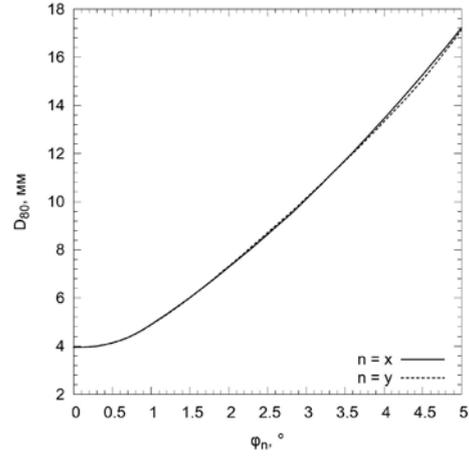


Рис. 2. График зависимости  $D_{80}$  изображения точечного источника, расположенного на бесконечности от угла поля источника.

Другим важным параметром телескопа является его энергетический порог. Энергетический порог телескопа – это пик в распределении по энергии первичных частиц дифференциальной скорости счета телескопа. Для ее расчета было проведено моделирование отклика телескопа на широкие атмосферные ливни.

Известно, что кроме света ливней на телескоп воздействует свет ночного неба, имеющий характер аддитивного шума, распределенного по закону Пуассона. Для подавления этого шума вводится двухступенчатая процедура фильтрации, реализованная по методу наращивания области [Horowitz, 1974; Прэтт, 1982]. Алгоритм ее работы следующий:

1. Выбирается элемент изображения с наибольшим числом зарегистрированных фотоэлектронов (начальная область), вокруг которого формируется выделенная область. Условие добавления элемента изображения в область является превышение числа зарегистрированных в нем фотоэлектронов над заданным порогом. Не вошедшие в область элементы не учитываются.

2. Число элементов изображения в выделенной области сравнивается с заданным пороговым значением. Ливень считается зарегистрированным, если это число превышает порог.

Исходными данными для расчета дифференциальной скорости счета являлись черенковские фотоны ливней с нулевым зенитным углом, полученные с помощью программы CORSICA [Heck, 1998]. Для расчета все события были разбиты на группы по расстоянию от оси ливня до телескопа с шагом 50 м. Результаты расчета представлены на рис. 3.

**Заключение**

Разработана математическая модель атмосферного черенковского телескопа для проведения численного моделирования процесса детектирования гамма-квантов высоких энергий и расчета его характеристик. Результаты расчетов оптических характеристик и энергетического порога проекта телескопа гамма-обсерватории TAIGA показывают, что он имеет достаточные характеристики для задачи поиска локализованных в пространстве источников космических лучей сверхвысоких энергий.

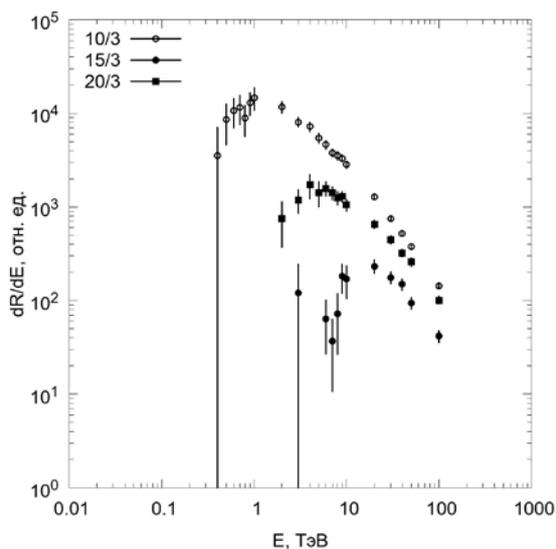


Рис. 3. Дифференциальная скорость счета ливней телескопом в зависимости от различных порогов фильтрации. В легенде первая цифра – порог при очистке изображения, вторая – порог числа элементов изображения в выделенной области.

Дальнейшими задачами работы являются исследование эффективности отбора гамма-событий одиноким телескопом и разработка методик для реализации комбинированной работы комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства Российской Федерации (договор 14.В25.31.0010), РФФИ (гранты 14-02-00372, 13-02-002141 и 15-02-10005).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Прэтт У. Цифровая обработка изображений, Пер. с англ. М.: Мир. 1982.

Шрёдер Г., Трайбер Х. Техническая оптика, Мотска: Техносфера. 2006.

Davies J.M., Cotton E.S. // J. Solar Energy Sci. and Eng. 1957. V. 1. P. 16.

Heck D., et al. Report FZKA 6019. Forschungszentrum Karlsruhe; 1998. [http://www-ik.fzk.de/corsika/physicsdescription/corsika\\_phys.html](http://www-ik.fzk.de/corsika/physicsdescription/corsika_phys.html).

Herzberger M. Light Distribution in the Optical Image // J. Opt. Soc. Am. 1947. V. 37. P. 485–489.

Horowitz S.L., Pavlidis T. Picture Segmentation by a directed split-and-merge procedure Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Joint Conference on Pattern Recognition, Copenhagen, Denmark. 1974. P. 424–433.

Иркутский государственный университет, Россия, Иркутск.