

УДК 520.8

## Создание системы реального времени для проведения оперативного поиска и последующего изучения астрофизических объектов в оптическом и высокоэнергичном гамма-диапазонах

*И.М. Дзапарова<sup>1,2</sup>, Д.Д. Джаппуев<sup>1</sup>, А.Н. Куреня<sup>1</sup>, О.И. Михайлова<sup>1</sup>, М.А. Наливкин<sup>2</sup>, С.А. Нароенков<sup>2</sup>, В.Б. Петков<sup>1,2</sup>, В.Б. Пузин<sup>2</sup>, И.С. Саванов<sup>2</sup>, А.В. Сергеев<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт ядерных исследований РАН, Проспект 60-летия октября, 7а, Москва, 11732, Россия  
*dzaparova@yandex.ru*

<sup>2</sup> Институт астрономии РАН, ул. Пятницкая, 48, Москва, 119017, Россия  
*isavanov@inasan.ru*

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

**Аннотация.** Для проведения синхронных наблюдений астрофизических объектов методами классической астрономии, гамма-астрономии и физики космических лучей создана система сбора и анализа данных с установок Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН и комплекса астрономических телескопов на пике Терскол. Поиск всплесков интенсивности космических лучей и космического гамма-излучения проводится на комплексе установок БНО. Поиск и последующее изучение оптических вспышек, сопутствующих обнаруженным установками БНО событиям, проводятся на комплексе астрономических телескопов обсерватории на пике Терскол Института астрономии РАН по целеуказаниям от установок БНО. Для проведения поиска транзиентных явлений в оптическом диапазоне по внешним целеуказаниям (от установок БНО, сети GCN и т. д.) разработана и создана универсальная программа управления комплексом астрономических телескопов.

CONSTRUCTION OF A REAL-TIME SYSTEM FOR OPERATIONAL SEARCH AND FOLLOW-UP STUDY OF ASTROPHYSICAL OBJECTS IN THE OPTICAL AND HIGH-ENERGY GAMMA RANGES, *by I.M. Dzaparova et al.* To conduct synchronous observations of astrophysical objects using methods of classical astronomy, gamma astronomy and cosmic ray physics, there has been constructed a system for collecting and analyzing data from the facilities of the Baksan Neutrino Observatory (BNO) of INR RAS and a complex of astronomical telescopes at the Terskol Peak Observatory. The search for bursts of cosmic ray intensity and cosmic gamma radiation is carried out at a complex of BNO facilities. The search and follow-up study of optical flares accompanying the events, detected by BNO facilities, are carried out with the complex of astronomical telescopes at the Terskol peak of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. A universal program for operation of astronomical telescopes was developed and created. The program allows searching for transient phenomena in the optical range using external alerts (from BNO facilities, the GCN network, etc.).

**Ключевые слова:** космическое гамма-излучение, транзиенты, синхронные наблюдения

---

## 1 Введение

В последнее время для исследования астрофизических процессов, и особенно процессов с большим выделением энергии, все чаще применяется подход т. н. всеволновой астрономии (multi-messenger astronomy), когда совместно используются результаты наблюдений электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн (включая гамма-излучение высокой энергии), нейтрино, космических лучей и гравитационных волн. Анализ результатов таких наблюдений позволяет повысить информативность при изучении астрофизических процессов и чувствительность при поиске источников космического излучения. В настоящее время оперативный поиск астрофизических объектов, порождающих всплески космического излучения высокой и сверхвысокой энергии совместно с оптическими вспышками, проводится в режиме квазиреального времени с помощью системы сбора и анализа данных, объединяющей комплекс установок БНО ИЯИ РАН и оптические телескопы обсерватории на пике Терскол ИНАСАН. Уникальный комплекс установок БНО изначально предназначен для регистрации космических лучей и космического гамма-излучения в широком диапазоне энергий. Комплекс состоит из Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) (Алексеев и др., 1979; Алексеев и др., 1998), расположенной непосредственно над ним ливневой установки “Андырчи” (Петков и др., 2006) и ливневой установки “Ковер-2” (Джаппуев и др., 2007). Установки БНО работают в режиме непрерывного набора информации, регистрируют космические лучи из верхней полусферы (режим all sky all time) и позволяют проводить поиск всплесков космического гамма-излучения в широком диапазоне энергий первичных гамма-квантов: от 1 ТэВ (на БПСТ) до 80 ТэВ (на установках “Андырчи” и “Ковер-2”) (Смирнов и др., 2005; Смирнов и др., 2006). По данным с установок БПСТ и “Ковер-2” организован поиск всплесков космического излучения (кластеров ливней) в режиме квазиреального времени, координаты которых используются для последующего поиска оптических вспышек. Работа с данными проводится через единый сервер сбора данных (территориально расположенный в лабораторном корпусе БНО), доступ к которому осуществляется по двум каналам связи. Первый канал объединяет локальные сети БНО и обсерватории на пике Терскол посредством радиоканала на основе модулей Cisco Aironet 1410, а второй использует сеть Интернет. Для поиска транзитных явлений в оптическом диапазоне по целеуказаниям от установок БНО разработана и создана универсальная программа управления комплексом астрономических телескопов.

## 2 Поиск всплесков космического излучения

В настоящее время поиск всплесков космического излучения высокой и сверхвысокой энергии проводится на БПСТ и ливневой установке “Ковер-2” в режиме квазиреального времени. Первичные экспериментальные данные установок БНО накапливаются в оперативной памяти on-line компьютера системы регистрации каждой установки в течение фиксированного времени, которое равно 15 минутам для БПСТ и 20 минутам для установки “Ковер-2”, и затем записываются на жесткий диск файл-сервера. Обработка этих данных проводится на двух выделенных рабочих станциях после сохранения информации на файл-сервере. После появления на диске файлов с очередной порцией информации эти файлы считываются и обрабатываются программами восстановления направления прихода ливня. В результате обработки для каждого из ливней, зарегистрированных установками, имеются направление прихода (зенитный и азимутальный углы) и время регистрации события. Поиск всплесков фактически сводится к поиску пространственно-временных концентраций (кластеров) зарегистрированных данной установкой широких атмосферных ливней космических лучей. Так как временные интервалы берутся достаточно малыми, поиск пространственных концентраций ливней проводится в горизонтальной системе координат с последующим пересчетом координат кластера в экваториальную систему. Алгоритм поиска кластера следующий: для каждого события  $i$ , имеющего абсолютное время  $t_i$  и углы прихода  $(\theta, \phi)_i$ , находилась цепочка событий  $i, i + 1, i + 2, \dots, i + N - 1$  таких, чтобы направления прихода ливня отличались меньше, чем на некоторую величину  $\alpha_r$  от средневзвешенного направления. Максимальная разность времен в кластере не должна превышать 10 секунд. Таким образом, каждый кластер характеризуется кратностью  $N$ , длительностью  $\Delta t$ , абсолютным временем  $T$  и координатами в горизонтальной  $(\theta, \phi)$  и экваториальной  $(\alpha, \delta)$  системах координат. На данном

этапе работы размер ячейки поиска для каждой установки выбран так, чтобы в ней содержалось 96 % событий от точечного источника (в предположении распределения Рэлея), а именно,  $\alpha_r = 3.0^\circ$  для БПСТ и  $\alpha_r = 5.58^\circ$  для установки “Ковер-2”.

При описанных условиях отбора число кластеров с каждой из установок составляет несколько тысяч в сутки. Расчет фона случайных совпадений (т. е. частоты образования кластеров заданной кратности от флуктуаций фона космических лучей) был проведен для каждой из установок с помощью аналогичной обработки смоделированных событий. В пределах одного стандартного отклонения экспериментально измеренные частоты регистрации кластеров находятся в согласии с частотами, ожидаемыми от фона случайных совпадений. В экваториальных координатах распределение зарегистрированных кластеров является равномерным, как и следовало ожидать для событий, вызванных флуктуациями фона космических лучей.

Метод поиска кластеров ливней применялся ранее на установках БНО для поиска космических гамма-всплесков по небесной сфере. Поскольку измеренные частоты регистрации кластеров ливней с хорошей точностью согласуются с ожидаемым фоном случайных совпадений, из этих данных были получены ограничения на частоту гамма-всплесков в зависимости от потоков энергии, уносимых фотонами высоких и сверхвысоких энергий (Смирнов и др., 2005; Смирнов и др., 2006).

Так как частота зарегистрированных кластеров ливней слишком велика для использования их в качестве алертов при поиске транзиентных явлений в оптическом диапазоне, в настоящем эксперименте проводится дополнительный отбор кластеров по длительности (в зависимости от их кратности), и в результате на сервер сбора данных записывается примерно 0.15 % от исходного их количества. Такой отбор выделяет, в первую очередь, кластеры большой кратности (вероятность имитации которых фоном космических лучей достаточно мала), т. е. вспышки с большим потоком энергии, либо кластеры малой кратности, но очень малой длительности (например, для  $N = 2$  отбираются события с длительностью  $\Delta t \leq 4$  мс на БПСТ и  $\Delta t \leq 15$  мс на установке “Ковер-2”). Подобный отбор кластеров позволяет сохранить часть возможных событий при поиске всплесков гамма-излучения сверхвысокой энергии от таких гипотетических объектов, как испаряющиеся первичные черные дыры (Петков и др., 2008; Петков и др., 2010). В дальнейшем для выделения ливней, порожденных первичными гамма-квантами сверхвысокой энергии, от фона космических лучей на установке “Ковер-2” будет использоваться метод отбора ливней с малым содержанием мюонов (Джаппуев и др., 2017).

### 3 Управление комплексом астрономических телескопов

Работа с данными проводится через единый сервер сбора данных, который территориально расположен в лабораторном корпусе БНО. Доступ к данным с установок БНО осуществляется по двум каналам связи. Первый объединяет локальные сети БНО и обсерватории на пике Терскол посредством радиоканала на основе трех модулей Cisco Aironet 1410 (рис. 1) на расстоянии около 20 км. Один из модулей работает на пике Чегет в режиме точки доступа, а два других в режиме моста на пике Терскол и на установке “Андырчи” (на склоне горы Андырчи), откуда до лабораторного корпуса БНО проложена волоконно-оптическая линия связи. Второй канал – через сеть Интернет, с фиксированным IP-адресом. Оба канала позволяют связаться с сервером сбора данных по протоколам HTTP и FTP, а также по локальной сети по протоколу SMB. Каналы связи и единый сервер сбора данных защищены от постороннего доступа.

Программа управления комплексом астрономических телескопов предназначена для работы с астрономическими приборами (опорно-поворотным устройством, ПЗС-камерой, колесом светофильтров, куполом) в процессе сеанса наблюдений. Программа разработана с использованием стандарта ASCOM (Astronomy Common Object Model), что позволяет управлять любым устройством, поддерживающим этот стандарт обмена командами. Преимуществом ASCOM является то, что независимо от производителя оборудования используется единый набор команд, позволяющий обращаться к разным типам опорно-поворотных устройств, ПЗС-камерам или другому оборудованию.

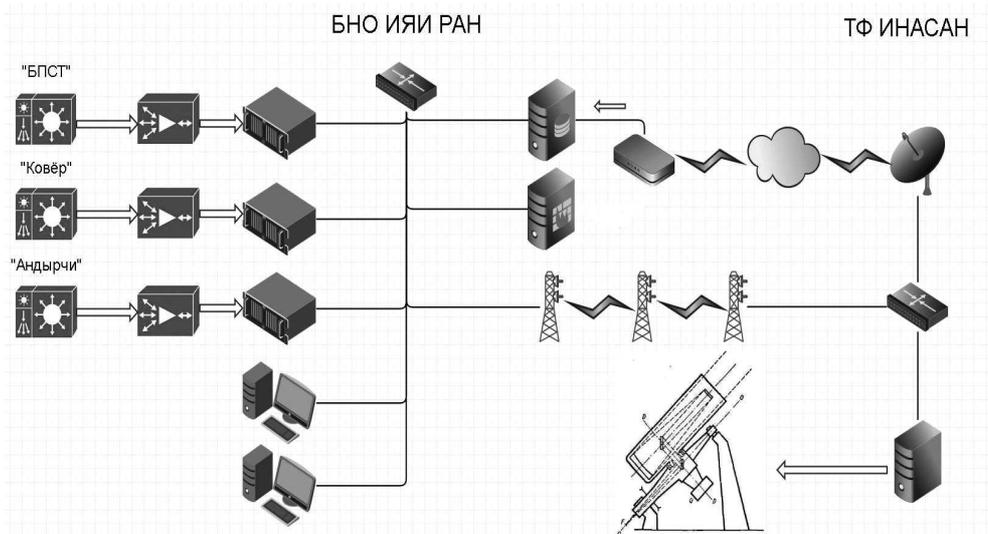


Рис. 1. Блок-схема системы сбора и передачи данных

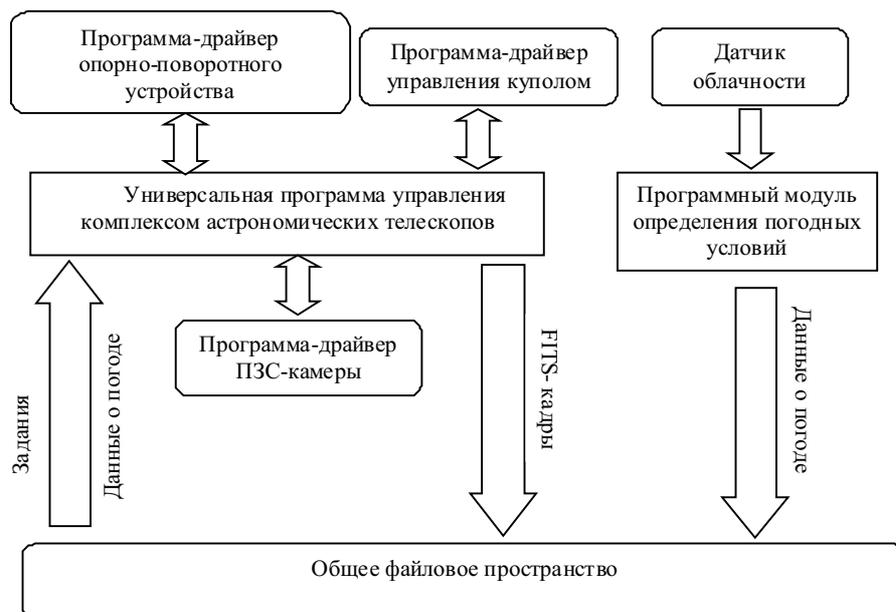


Рис. 2. Схема информационного взаимодействия между программами-драйверами оборудования и универсальной программой управления комплексом астрономических телескопов

Для каждого устройства производителем оборудования разрабатывается программа-драйвер, которая полностью скрывает от разработчика программы обращение к оборудованию на нижнем уровне, например, к двигателям и датчикам опорно-поворотного устройства, либо ПЗС-камере. Универсальная программа управления комплексом астрономических телескопов взаимодействует с программами-драйверами используемых устройств (рисунок 2).



**Рис. 3.** Пример полученного изображения на телескопе Officina Stelare RH-200

В режиме работы “Робот-телескоп” универсальная программа управления комплексом астрономических телескопов при наступлении навигационных сумерек и при благоприятной погоде подключит в автоматическом режиме программу-драйвер опорно-поворотного устройства, ПЗС-камеры и купола. Загрузка плана наблюдений на предстоящую ночь осуществляется с web-сервера в автоматическом режиме. Если при выполнении плана наблюдений появляются приоритетные задания от установок БНО (с единого сервера сбора данных) или GCN, то процесс проведения плана наблюдений прерывается, и наблюдения проводятся по целеуказанию алерта в соответствующем режиме.

Тестирование универсальной программы управления комплексом астрономических телескопов для поиска транзитных явлений в оптическом диапазоне по целеуказаниям от установок БНО было проведено в Звенигородской обсерватории ИНАСАН в апреле – мае 2017 года. Наблюдения были получены на широкоугольном телескопе Officina Stelare RH-200 с полем зрения 3.5 градуса. Поле зрения – квадрат со стороной 3.5 градуса. Пример полученного изображения представлен на рисунке 3. Поле зрения такого широкоугольного телескопа позволяет сразу осмотреть значительно больший участок неба, соответствующий угловому разрешению ливневых установок.

Проведение тестовых сеансов наблюдений показало, что сам процесс наблюдения проходит в автоматическом режиме без сбоев, но для проведения исследований необходимо использование широкоугольных телескопов. Использование узкопольных телескопов при поиске транзитных явлений по целеуказаниям от ливневых установок приводит, из-за необходимости осмотра большого участка неба, к большим затратам наблюдательного времени и малоэффективно.

## 4 Заключение

Оперативный поиск оптических партнеров высокоэнергетических событий, обнаруженных установками для регистрации космических лучей и нейтринными телескопами, очень важен для изучения космических транзитных явлений, к которым относятся спорадические вспышки излучения астро-

физических объектов различной природы. Кроме того, совместный поиск в различных энергетических диапазонах позволит увеличить чувствительность установок к таким событиям.

В настоящее время разрабатывается система реального времени, объединяющая комплекс установок БНО ИЯИ РАН и оптические телескопы обсерватории на пике Терскол ИНАСАН. Эта система нацелена на проведение оперативного поиска и последующего изучения астрофизических объектов, порождающих всплески космического излучения высокой и сверхвысокой энергии совместно с оптическими вспышками. Создаваемые системы сбора информации каждой из установок комплекса БНО позволят в режиме реального времени выделять и анализировать события, которые могут быть вызваны такими всплесками. Задержка триггера на каждой из установок БНО будет определяться только временными воротами, в течение которых ведется поиск кластера ливней. Для поиска транзиентных явлений в оптическом диапазоне разработана и создана универсальная программа управления комплексом астрономических телескопов, позволяющая по целеуказаниям от установок БНО проводить наблюдения в режиме работы “Робот-телескоп”.

Работа выполнена на УНУ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (ЦКП Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН) при поддержке РФФИ (грант 16-29-13034).

## Литература

- Алексеев и др. (Alekseyev E.N. et al.) // Proc. 16th ICRC. 1979. V. 10. P. 276.  
Алексеев и др. (Alekseyev E.N. et al.) // Phys. Part. Nuclei. 1998. V. 29. P. 254.  
Джаппуев Д.Д. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2007. Т. 71. № 4. С. 547.  
Джаппуев Д.Д. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2017. Т. 81. № 4. С. 461.  
Петков В.Б. и др. // Приборы и техника эксперимента. 2006. № 6. С. 50.  
Петков В.Б. и др. // Письма в Астрон. журн. 2008. Т. 34. № 8. С. 563.  
Петков В.Б. и др. // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. Вып. 3. С. 460.  
Смирнов Д.В. и др. // Известия РАН. Серия физическая. 2005. Т. 69. № 3. С. 413.  
Смирнов Д.В. и др. // Письма в Астрон. журн. 2006. Т. 32. № 1. С. 3.