

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

УДК 53.07

**КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ ТЕЛЕСКОП ДЛЯ МОНИТОРИНГА
ПОТОКОВ ВТОРИЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ**

© 2020 г. Ю. В. Балабин^а, Б. Б. Гвоздевский^а, А. В. Германенко^а,
Е. А. Михалко^а, Е. А. Маурчев^{а,*}, Л. И. Щур^а

^а Полярный геофизический институт
Россия, 184209, Апатиты, Академгородок, 26а
*e-mail: maurchev1987@gmail.com

Поступила в редакцию 25.03.2020 г.

После доработки 19.05.2020 г.

Принята к публикации 06.06.2020 г.

В лаборатории космических лучей Полярного геофизического института создан простой и компактный благодаря модульной конструкции телескоп, предназначенный для регистрации ионизирующих частиц в диапазоне энергий от 1 МэВ до 100 ГэВ. Телескоп состоит из двух пластин сцинтилляторов, разделенных слоем свинца и расположенных друг над другом. Электронная схема создает канал счета верхнего детектора и канал совпадений с нижним. Площадь каждого детектора – 0.25 м², средний темп счета верхнего детектора – 3000 импульсов/мин.

DOI: 10.31857/S0032816220060038

ВВЕДЕНИЕ

Стандартный мюонный телескоп (м.т.) является массивным и дорогостоящим устройством. Площадь его детекторов превышает несколько квадратных метров. Например, стандартный кубический телескоп имеет площадь 4 м² [1]. Его назначение – одновременное измерение потоков мюонов, достигающих поверхности земли, в различных направлениях (измерения ведутся по нескольким зенитным и азимутальным углам), определение анизотропии космических лучей. Есть и более сложные приборы, например, в Якутске несколько мюонных телескопов расположено под землей на разной глубине. Они проводят мониторинг космических лучей в заданных энергетических диапазонах.

Назначение разработанного телескопа – измерение потоков энергичных частиц (прежде всего мюонов, но также электронов, позитронов и γ -квантов), возникающих в атмосфере от космических лучей.

В приборе применен детектор мюонов в телескопической конфигурации на основе сцинтилляторов. Простота конструкции прибора обусловлена как использованием готовых модулей, так и не слишком большой эффективной площадью детекторов. Однако выбранный размер детекторов достаточен, чтобы обеспечить хорошую точность измерений при 5-минутном усреднении.

КОНСТРУКЦИЯ

Созданный м.т. состоит из двух пластиковых сцинтилляторов, разделенных слоем свинца. Используются готовые сцинтилляционные модули, изготовленные в Институте физики высоких энергий (г. Протвино), содержащие пластиковый сцинтиллятор, полупроводниковый фотоприемник SiPM и предварительный усилитель. Размер одного сцинтиллятора 500 × 500 × 50 мм (площадь 0.25 м²). Они установлены один над другим на расстоянии 50 см. Между ними посередине размещен слой свинца толщиной 10 см, составленный из стандартных свинцовых кирпичей (200 × 100 × 50 мм). Размер свинцового слоя 750 × 750 мм.

М.т. закреплен на поворотной платформе, имеющей три оси вращения. С помощью этой платформы можно сориентировать ось телескопа в любом направлении в пределах верхней полусферы.

Телескопическое размещение детекторов позволяет сузить телесный угол приема до 45°. Выходными сигналами являются выход верхнего сцинтиллятора и выход схемы совпадений верхнего и нижнего. Верхний сцинтиллятор детектирует все приходящие с верхней полусферы заряженные частицы, в том числе легкие (электроны и позитроны), а также γ -кванты. Нижний энергетический порог определен исходя из расчета количества вещества, находящегося непосредственно над детектором (корпус, крепление) и составляет 2–3 МэВ. Схема совпадений ограничивает

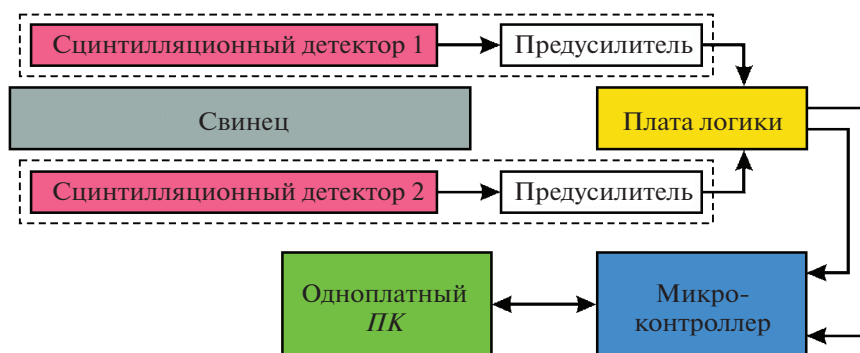
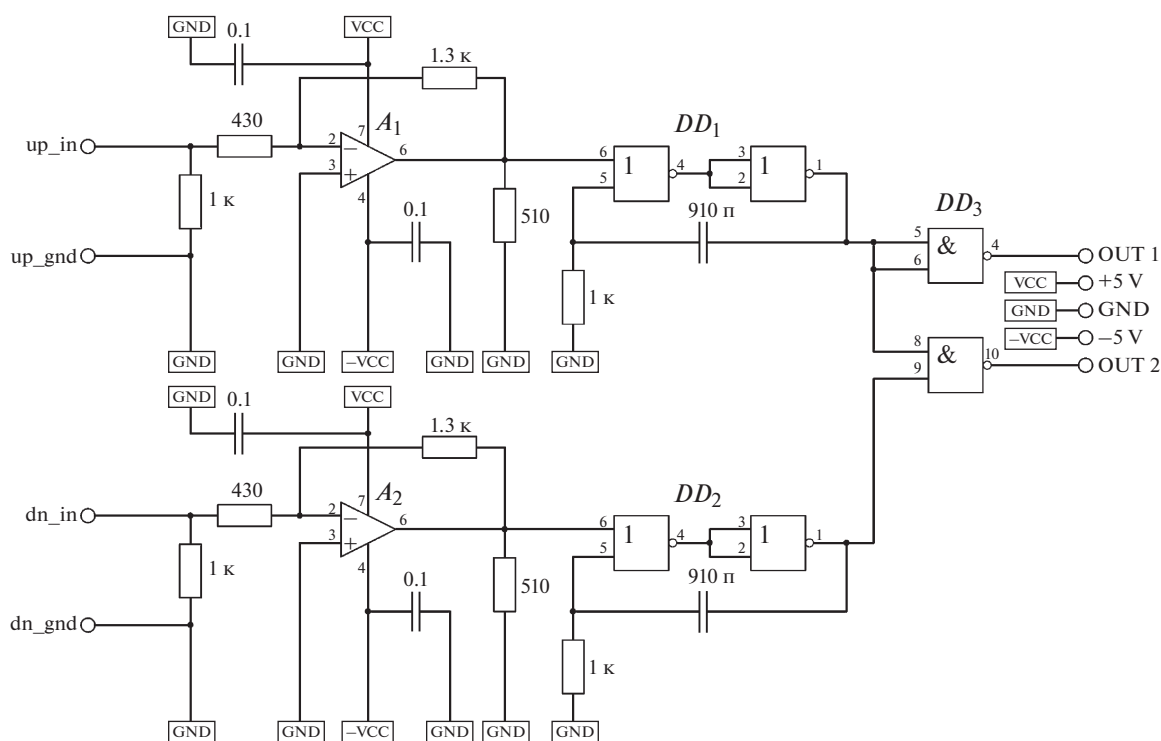


Рис. 1. Блок-схема мюонного телескопа.

Рис. 2. Принципиальная схема платы логики. A_1, A_2 – AD825; DD_1, DD_2 – 74ALS28, DD_3 – SN74LS37.

поле зрения телескопа и выделяет только мюоны с энергиями >250 МэВ.

Таким образом, данная конструкция детектора заряженных частиц совмещает всенаправленный детектор мягких заряженных частиц и γ -квантов и простой мюонный телескоп.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Блок-схема мюонного телескопа представлена на рис. 1.

Встроенный в модуль сцинтилятора предварительный усилитель обеспечивает выходной сигнал на уровне единиц милливольт (стандарт NIM).

Длительность импульса около 100 нс, фронты имеют длительность единицы наносекунд. Выход предварительного усилителя рассчитан на нагрузку до 50 Ом, хотя оптимальной оказалась нагрузка 400 Ом. Предусилитель калибруется производителем для каждой пластины детектора отдельно для обеспечения однородности счета.

Плата логики служит для первичной обработки сигналов от детекторов, и ее схема приведена на рис. 2.

Операционные усилители A_1 и A_2 преобразуют сигналы из стандарта NIM до уровня, обеспечивающего работу TTL-логики. На микросхемах DD_1 и DD_2 собраны два формирователя импуль-

сов, которые служат для увеличения длительности импульсов от сцинтилляционных детекторов до ~ 1 мкс, что обеспечивает стабильность работы последующей системы регистрации. Поскольку предполагается использовать м.т. для мониторинга потоков космических лучей, где средний счет детектора составляет 3000 импульсов/мин, то такое уширение рабочих импульсов несущественно [2]. Вероятность появления второго импульса в течение $t = 1$ мкс после первого составит всего $1/20000$. Такой долей пропущенных импульсов можно пренебречь, следовательно, применение формирователя импульсов допустимо.

Микросхема DD_3 выполняет функцию схемы совпадений импульсов от верхнего и нижнего детекторов. Созданы два выходных канала (TTL-уровни): импульсы от верхней пластины (Выход 1) и совпадения импульсов от двух пластин (Выход 2). Используются быстродействующие операционные усилители, включенные по типовой схеме [3, 4].

Плата микроконтроллера служит основой системы регистрации. Она построена на микроконтроллере ATmega 2560, который обеспечивает непосредственно счет импульсов по двум каналам, а также работу цифрового датчика давления и температуры Bosch BMP280, подключенного по шине I²C. Микроконтроллер может обеспечивать прямую запись данных на флэш-накопитель (SD-карту по шине SPI), однако в текущей стационарной конфигурации эта возможность не используется, поскольку имеется возможность подключить м.т. в локальную сеть. Вместо этого микроконтроллер по запросу от персонального компьютера ПК формирует пакет данных, содержащий текущий счет детекторов, атмосферное давление и температуру, и отправляет его в ПК. Прошивка микроконтроллера написана на языке Си с использованием ряда стандартных библиотек [5], часть из которых была модифицирована для получения необходимой функциональности.

Одноплатный ПК служит для первичной обработки и хранения данных системы регистрации. В данной конфигурации используется микрокомпьютер Orange Pi PC PLUS с операционной системой Armbian Ubuntu Bionic. На ПК запущена служба, ежеминутно опрашивающая микроконтроллер и сохраняющая приходящие от него данные в базу данных. Периодичность опроса и, соответственно, получения данных от системы сбора определяется ПК и может быть легко изменена.

Точность периодов зависит от точности хода часов ПК. Поскольку одноплатные микрокомпьютеры не имеют встроенных часов реального времени (RTC), к данному ПК был дополнительно подключен внешний модуль RTC на базе микросхемы DS3231, обеспечивающий высокую точ-

ность хода часов, а также настроены службы периодической синхронизации часов через интернет (NTP).

На ПК запущены службы, обеспечивающие построение предварительных графиков на основе данных детекторов, для быстрого анализа работы системы и просмотра данных на локальном сайте. Сохраненная база данных счета детекторов регулярно отправляется (синхронизируется) на общий сервер данных лаборатории.

Для питания м.т. использован блок питания MEAN WELL RQ-50B на четыре выхода, выдающий напряжения ± 5 и ± 12 В. Выходы ± 5 В используются для непосредственного питания системы. Выход $+12$ В был использован для создания напряжения $+30$ В при помощи DC-DC-модуля на микросхеме XL6009. Последний оставшийся выход -12 В использован для питания системы охлаждения. Для повышения качества питающих напряжений на всех выходах были установлены дополнительные фильтры питания. Полная потребляемая мощность м.т. составляет <20 Вт.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПРИБОРА

С целью проведения исследований мюонов вторичных космических лучей в области высоких широт, определения их потока и угловых характеристик, м.т. был установлен в Апатитах (координаты 33.4° в.д. и 67.6° с.ш., жесткость геомагнитного обрезания ~ 0.6 ГВ) и запущен в режиме непрерывной регистрации данных. На рис. 3 представлены типичные результаты записи вариаций скорости счета, а также профиль атмосферного давления.

Поток мюонов, достигающий поверхности земли, также зависит от состояния атмосферы [1]. Это означает, что часть наблюдаемых на детекторе вариаций не имеет отношения к изменению потока космических лучей, а обусловлена атмосферными эффектами. Наиболее значимыми из них являются барометрический и температурный эффекты. При повышении атмосферного давления количество вещества (масса столба воздуха) возрастает, а поток мюонов при этом падает. Связь между потоком мюонов и давлением экспоненциальная.

Для устранения вариаций, связанных с давлением, используется методика, описанная в [1]. Для нее требуется знать барометрический коэффициент (б.к.). Несмотря на не слишком большую базу данных (около трех месяцев), б.к. был определен и составил -0.00174 мб⁻¹. Для мюонов принято значение б.к. $-0.0016\dots-0.0018$ мб⁻¹ [1]. Для других частиц он имеет иные значения. Таким образом, можно достоверно говорить о том, что м.т. регистрирует нужную компоненту (мюонную). В дальнейшем, по мере накопления данных, б.к. будет уточнен.

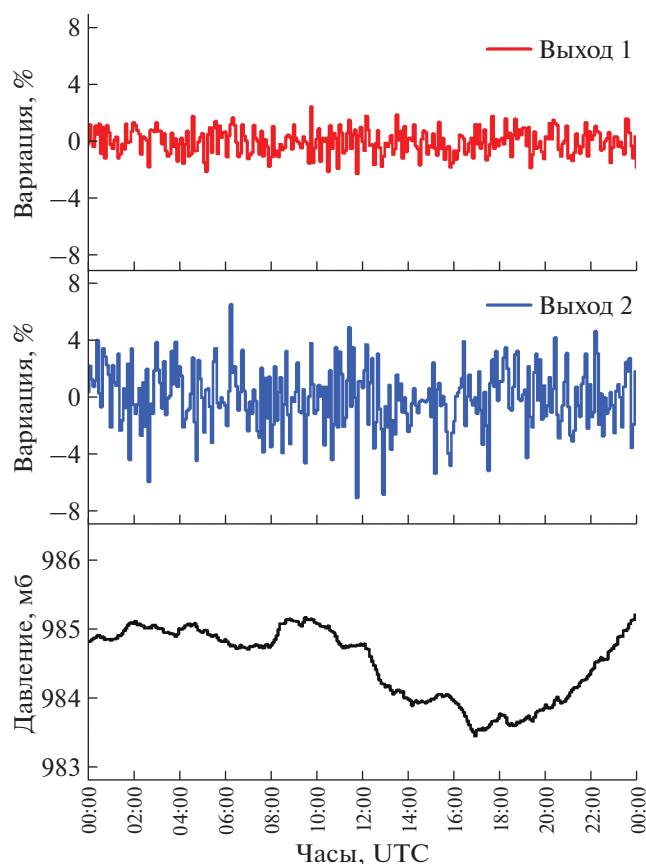


Рис. 3. Запись вариаций скорости счета м.т. и изменений атмосферного давления 09.05.2020. Используются исходные 5-минутные данные. Поток мюонов зависит от атмосферного давления; для устранения вариаций, связанных с давлением, используется специальная методика, описанная в [1].

На рис. 4 представлены вариации потока мюонов и других заряженных частиц на протяжении нескольких дней. Временное разрешение составляет 1 ч (часовое усреднение исходных 5-минутных данных). Данные исправлены: вариации, связанные с изменениями атмосферного давления, устранены. Оставшиеся вариации связаны с температурными эффектами в атмосфере [1]. Возможно также, что некоторые вариации связаны и с метеоусловиями [6], наблюдавшимися в этот период. Для отслеживания скорости изменения тренда по ординате указана не абсолютная величина, а процентное соотношение относительно базового уровня, в качестве которого выступает арифметическое среднее, вычисленное за указанный промежуток времени. Интересно отметить, что значительная вариация наблюдается в данных, поступающих от верхней пластины (Выход 1). Верхний сцинтиллятор, не имеющий свинцовой защиты, регистрирует все заряженные частицы, в том числе электроны и позитроны с энергиями от 2–3 МэВ. С Выхода 2 поступают

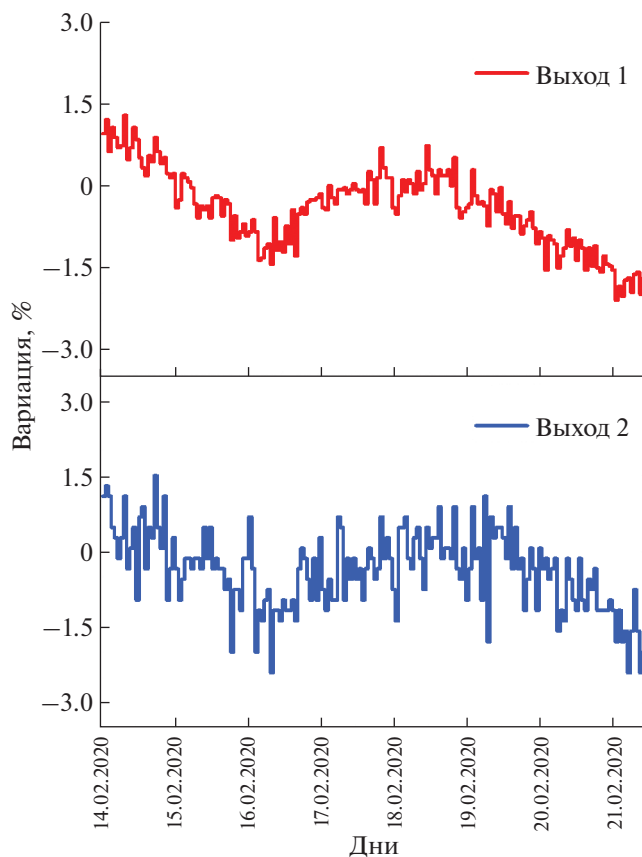


Рис. 4. Обнаруженная вариация потока мюонов. Использовано часовое усреднение, поправка на вариации давления сделана. Предположительно, наблюдаемая вариация связана с метеоусловиями [6].

данные о потоке мюонов, он остается примерно постоянным на протяжении всего периода наблюдений. Подобный эффект (влияние метеоусловий в нижней атмосфере на поток низкоэнергичных γ -квантов) описан в [6]. Таким образом, м.т. позволил выделить из общего изменения потока вторичных космических лучей вариации, происходящие только в их мягкой компоненте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан простой мюонный телескоп для мониторинга потоков заряженных частиц – вторичных космических лучей. Наличие двух слоев детектора, разделенных слоем поглотителя, позволяет измерять как мягкую компоненту вторичных космических лучей (электроны, позитроны), так и жесткую – мюоны. Телескоп включен в систему мониторинга космических лучей. Анализ полученных данных показал, что мюонный телескоп регистрирует поток мюонов, отмечены вариации

потока мюонов, связанные с процессами в атмосфере.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 18-77-10018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорман Л.И.* Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. М.: Наука, 1975.
2. *Гольданский В.И., Куценко А.В., Подгорецкий М.И.* Статистика отсчетов при регистрации ядерных частиц. М.: Физматлит, 1959.
3. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. М.: Мир, 2003.
4. *Шило В.Л.* Популярные цифровые микросхемы. М.: Радио и связь, 1989.
5. Arduino Libraries. <https://github.com/arduino-libraries>
6. *Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б., Вашенюк Э.В.* // Изв. РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 5. С. 639.