

чивать плотность пара, не уменьшая инверсии населенностей. Кроме того, это дает дополнительную возможность увеличения прикладываемого между проволокой и сеткой напряжения, что приводит к существенному росту эффективности селекции.

Заключение

Предложен метод получения инверсии населенностей на ядерном переходе Ge^{73} между первым возбужденным и основным состояниями. Ядра Ge^{73} в первом возбужденном состоянии образуются в результате электронной конверсии со второго возбужденного состояния. Второе возбужденное состояние ядер Ge^{73} образуется при электронном захвате в нестабильных ядрах As^{73} . Моделирование процесса достижения инверсии позволяет сделать следующие выводы.

При рассмотренных входных параметрах достигается значение инверсии около 1500–2000 ядер при продолжительности сохранения инверсии населенностей несколько микросекунд.

Плотность паров, из которых селективируются ионы германия с ядром в первом возбужденном состоянии, не оказывает влияния на селективность возбужде-

ния при неизменном общем количестве пара. Следовательно, увеличение общего количества испаренных атомов по сравнению с теми значениями, которые использовались в численных экспериментах, приведет к значительному возрастанию инверсии населенностей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке МНТЦ (грант № 2651) и РФФИ (грант № 02-02-17138).

Литература

1. Летохов В.С. Лазерное селективное детектирование различных атомов // Применение лазеров в спектроскопии и фотохимии / Под ред. К. Брэдли Мур. М., 1983. С. 9–44.
2. Амбарцумян Р.В., Калинин В.П., Летохов В.С. // Письма в ЖЭТФ. 1971. **13**, № 6. С. 305.
3. Амбарцумян Р. В., Апатин В.М., Летохов В.С. и др. // ЖЭТФ. 1976. **70**, № 5. С. 1660.
4. Hurst G.S., Payne M.G., Nayfeh M.H. et al. // Phys. Rev. Lett. 1975. **35**, N 2. P. 82.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М., 1992.

Поступила в редакцию
07.07.03

УДК 537.591.15

НАУЧНО-УЧЕБНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

**О. В. Веденеев, Г. К. Гарипов, А. В. Игошин, Н. Н. Калмыков, Г. В. Куликов,
В. И. Назаров, М. И. Панасюк, А. А. Силаев, А. А. Силаев (мл.),
В. П. Сулаков, Ю. А. Фомин, Б. А. Хренов, А. В. Широков**

(НИИЯФ)

E-mail: sulakov@eas.sinp.msu.ru

Приводится краткое описание создающегося в НИИЯФ МГУ научно-учебного комплекса для исследования космических лучей сверхвысоких энергий методом регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ). Обсуждаются предполагаемые научные задачи, которые могут быть решены на базе создаваемого комплекса.

Введение

В НИИЯФ МГУ проводятся работы по созданию на базе действующей установки ШАЛ МГУ [1] научно-учебного комплекса, предназначенного для изучения космических лучей высоких и сверхвысоких энергий ($> 10^{14}$ эВ) путем регистрации широких атмосферных ливней, возникающих при прохождении атмосферы Земли частицами космических лучей [2, 3]. Комплекс включает в себя несколько частей, предназначенных для изучения космических лучей в разных энергетических диапазонах. Отличительная особенность комплекса состоит в том, что он позволяет изучать первичные космические лучи как в области умеренных энергий $\sim 10^{14}$ эВ, так и в области

ультравысоких энергий $\sim 10^{19}$ эВ. Для получения данных о космических лучах ультравысоких энергий ($10^{18} \div 10^{19}$ эВ) с целью увеличения эффективной площади установку предполагается дополнить несколькими группами детекторов — кластерами, расположенными на расстояниях $1 \div 2$ км от центральной установки. Каждый кластер будет состоять из 16 сцинтилляционных детекторных пунктов (ДП) площадью 1 м^2 каждый, расположенных в узлах ортогональной сетки с раздвижением 50–100 м и работающих с собственным триггером. Сбор информации со всех 16 ДП каждого кластера производится в промежуточный пункт, который имеет в своем составе персональный компьютер для контроля,

анализа экспериментальной информации и обмена данными с центральным компьютером, расположенным в центральном помещении установки ШАЛ МГУ. Синхронизация времени между кластерами производится с помощью GPS-приемников, которые расположены по одному в каждом кластере.

Примерная геометрия расположения кластеров приведена на рис. 1. Они могут быть размещены на территории установки ШАЛ МГУ (1), на территории Ботанического сада МГУ (2), на новой территории МГУ (3), а также на территориях ГЕОХИ им. В. И. Вернадского РАН (4), Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (5) и Института ядерных исследований РАН (6).

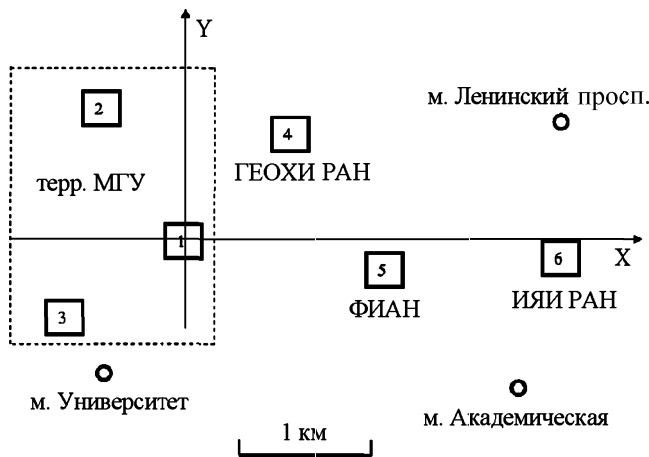


Рис. 1. Расположение кластеров научно-учебного комплекса для исследования космических лучей с энергией $10^{18} \div 10^{19}$ эВ

1. Состав центральной части установки

Первым этапом создания комплекса является модернизация установки ШАЛ МГУ для изучения космических лучей с энергиями $10^{14} \div 5 \cdot 10^{16}$ эВ. Установка представляет из себя систему сцинтилляционных детекторов, размещенных на площади примерно 12000 м^2 вблизи 20-го корпуса НИИЯФ МГУ (кластер № 1). Расположение сцинтилляционных детекторов установки приведено на рис. 2. Светлыми квадратами показаны уже существующие детекторы, темными — планируемые. Всего в состав установки входит 41 сцинтилляционный детектор площадью 1 м^2 каждый. Детекторы объединены в три группы: а) центральная часть установки ШАЛ МГУ состоит из 12 ДП с раздвижением $8 \div 10 \text{ м}$, размещенных внутри и на крыше 20-го корпуса; б) восемь ДП расположены вблизи 20-го корпуса с шагом около 20 м и в) двадцать один ДП на расстояниях до $100\text{--}120 \text{ м}$ от центра. Сплошными и пунктирными линиями показаны существующие и проектируемые линии связи между ДП и центральным пунктом установки.

Детекторные пункты установки, которые расположены на крыше и внутри 20-го корпуса (всего 12), созданы на базе детекторов, эксплуатиру-

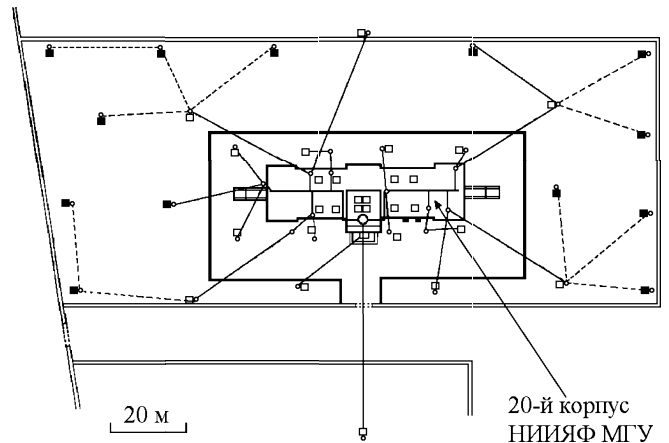


Рис. 2. Расположение детекторов кластера 1

вавшихся в процессе работы установки ШАЛ МГУ в 1984–1990 гг. Детекторы на крыше и внутри корпуса представляют из себя по 2 сцинтиллятора площадью 0.5 м^2 и толщиной 50 мм , каждый из которых просматривается двумя фотоумножителями ФЭУ-110. Сцинтилляторы и фотоумножители помещены в светонепроницаемые алюминиевые кожухи. Для защиты от внешних воздействий детекторы на крыше помещены в деревянные боксы.

Новые детекторы представляют собой железобетонные боксы размером $240 \times 220 \times 160 \text{ см}$ (рис. 3) с легкой крышей из оцинкованного железа толщиной 1 мм . Изнутри крыша бокса выложена пенопластовыми плитами толщиной 100 мм для теплоизоляции бокса. Внутри бокса размещен кожух из дюрала со сцинтилляционным счетчиком и фотоумножителем. Количество вещества над сцинтиллятором составляет менее 0.1 каскадной единицы. Кожух представляет собой четырехгранную усеченную пирамиду. Пластический сцинтиллятор помещается в широком основании пирамиды, окно в противоположной грани предназначено для фотоумножителя ФЭУ-173, размещаемого в узком основании пирамиды. Сцинтиллятор собран из 4 пластин размером $500 \times 500 \times 50 \text{ мм}$ каждая, изготовленных на основе полистирола с добавками 2% пара-терфенила и 0.02% РОРОР. Для улучшения светосбора кожух покрыт внутри двумя слоями белой эмали типа АС-599. Коэффициент отражения эмали $K = 0.95$ на длине волны $\lambda = 4200 \text{ \AA}$. Высота пирамиды 800 мм , размер основания пирамиды $1200 \times 1200 \text{ мм}$. Выбранная геометрия детектора позволила достичь высокой однородности как по амплитуде сигнала, так и по времени появления сигнала на выходе ФЭУ по отношению ко времени прохождения частицы через сцинтиллятор. Однородность счетчика по амплитуде сигнала была проверена в опыте с малым по площади вторым счетчиком, включенным на совпадение с основным. Результаты измерения неоднородности светосбора показали, что отношение величины сигнала от частицы, проходящей через центр основного счетчика, к величине сигнала от частицы, проходящей через угол квадрата площадью 1 м^2 ,

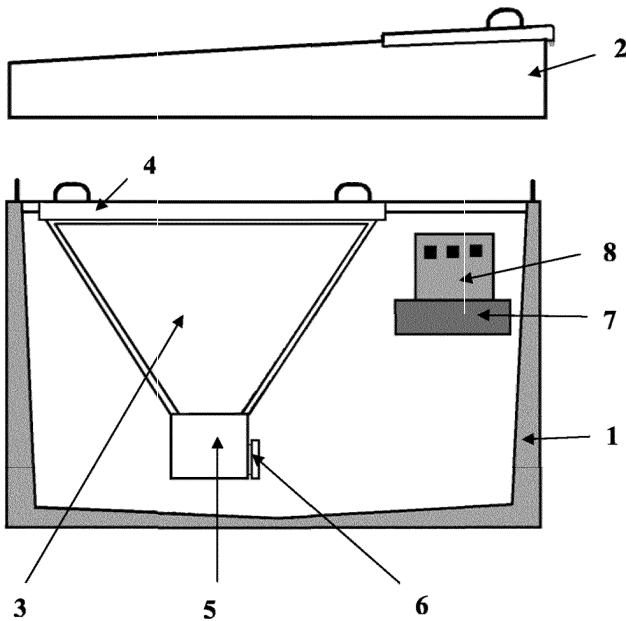


Рис. 3. Схема сцинтилляционного детектора: 1 — бетонный бокс, 2 — крышка бокса, 3 — кожух сцинтиллятора, 4 — сцинтиллятор, 5 — корпус фотоумножителя, 6 — блок электроники, 7 — стыковочная коробка для оптического кабеля, 8 — силовой щит

оказывается в среднем равным 1.33. Найденный с помощью регистрации одиночных мюонов коэффициент неоднородности светосбора меньше 20%.

2. Система контроля и сбора информации

Структурная схема сбора информации с модернизированной установки ШАЛ МГУ приведена на рис. 4. Все ДП установки соединены с центральным пунктом с помощью волоконно-оптического кабеля. По этому кабелю производится передача амплитудной и временной информации о каждом событии во всех ДП в центральный пункт, откуда через специально разработанный адаптер передается в центральный компьютер. Кроме того из центрального компьютера в ДП по необходимости посылаются ряд команд для управления режимом работы детекторного пункта. В частности, команда установки высокого

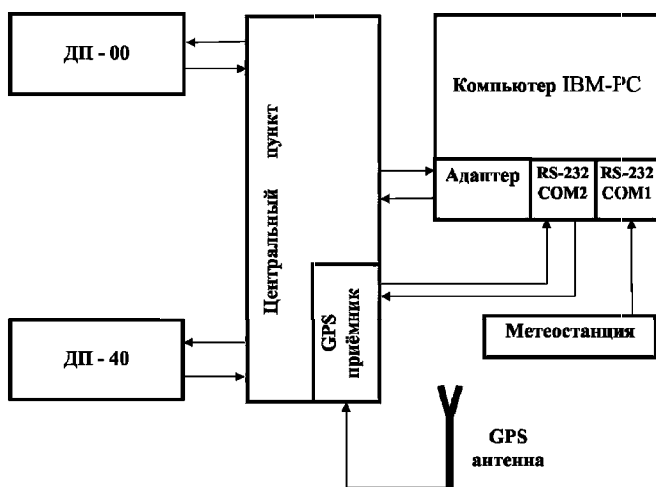


Рис. 4. Структурная схема сбора информации с модернизированной установки ШАЛ МГУ

напряжения на ФЭУ, команда случайного запуска для определения пьедесталов двух АЦП, команда на запуск светодиода для калибровки двух амплитудных каналов. Анализ контрольной информации производится в центральном компьютере.

Отбор событий ШАЛ также происходит в центральном компьютере. Благодаря тому, что в центральный компьютер поступает информация со всех ДП, возможно реализовать достаточно гибкую систему отбора ШАЛ. Для регистрации ШАЛ, образованных первичными частицами с энергией $10^{14} - 3 \times 10^{15}$ эВ, используются центральные детекторы с раздвижением 8–10 м, для энергий $5 \times 10^{14} - 10^{16}$ эВ используются центральные детекторы с раздвижением 20 м и для энергий $5 \times 10^{15} - 5 \times 10^{16}$ эВ используются детекторы, расположенные по всей площади установки с раздвижением 30–50 м. В результате установка позволит с хорошей статистикой изучать энергетический спектр первичных космических лучей в широком диапазоне, включающем область излома первичного спектра при энергии $\sim 3 \times 10^{15}$ эВ.

Вся информация о зарегистрированных событиях ШАЛ записывается на жесткий диск. Абсолютная привязка по времени каждого события производится с помощью GPS приемника с точностью 1 мкс. Измерение давления, температуры и влажности производится с помощью компактной метеостанции. Вся контрольная информация, включая метеорологические данные, также записывается на жесткий диск. Программное обеспечение позволяет в реальном времени проводить анализ работы каждого детектора установки, а также системы сбора информации.

3. Расчет темпа счета событий и точности определения характеристик ШАЛ

Расчет проводился методом Монте-Карло с учетом геометрии установки. Интегральный спектр по числу частиц в ШАЛ принимался в виде:

$$I(> N_e) \sim N_e^{1.5}, \quad \lg N_e < 5.5,$$

$$I(> N_e) \sim N_e^2, \quad \lg N_e > 5.5.$$

В качестве функции пространственного распределения заряженных частиц было взято широко используемое семейство функций Нишимуры–Каматы–Грейзена, характеризующееся параметром возраста s . В расчете предполагался отбор событий с использованием трех триггеров.

Отбор ШАЛ осуществлялся при выполнении следующих условий.

1. Срабатывание всех детекторов, входящих хотя бы в один квадрат из трех, с раздвижением 8 м, расположенных на крыше 20-го корпуса (триггер 1). Порог регистрации 10^{14} эВ.

2. Срабатывание всех детекторов, входящих хотя бы в один квадрат из трех, с раздвижением 20 м,

расположенных в бетонных боксах вокруг 20-го корпуса (триггер 2). Порог регистрации $5 \cdot 10^{14}$ эВ.

3. Срабатывание хотя бы одного из четырех детекторов площадью 1 м^2 , расположенных в центральном помещении 20-го корпуса и хотя бы двух, из шести, расположенных по окружности с радиусом 60 м вокруг центрального (триггер 3). Порог регистрации 10^{15} эВ.

Расчет эффективных площадей ($W > 90\%$) проводился методом Монте-Карло для всех приведенных выше триггеров. Для каждого порога по полному числу частиц вычислялась площадь установки с эффективностью регистрации $> 90\%$. Темп счета оценивался с использованием экспериментального интегрального спектра ШАЛ по числу частиц. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Темп счета ливней, регистрируемых с вероятностью $> 90\%$

№	N_e	\bar{E}_0 , эВ	S_{eff} , м^2	Темп счета, час^{-1}
1	$10^4 \div 10^5$	$2 \cdot 10^{14}$	500	50
2	$5 \times 10^4 \div 5 \times 10^5$	$2 \cdot 10^{15}$	2000	40
3	$5 \times 10^5 \div 5 \times 10^6$	$2 \cdot 10^{16}$	8000	10

Для данной геометрии методом Монте-Карло проводился расчет точности определения основных характеристик ШАЛ для разных порогов по полному числу частиц. Расчет проводился в тех же предположениях о функции пространственного распределения и спектре по числу частиц, что и при вычислении темпа счета ШАЛ, дополнительно учитывалось угловое распределение ШАЛ в виде $f(\theta) \sim \cos^8 \theta$, где θ — зенитный угол прихода оси ШАЛ. Необходимо отметить, что выбранная геометрия установки является достаточно удобной, поскольку, во-первых, она обеспечивает достаточно быстрый набор статистики благодаря использованию трех мастерных систем с разными порогами и, во-вторых, обеспечивает срабатывание достаточно большого числа детекторов для регистрируемых ливней, что улучшает точности вычисления параметров ШАЛ в индивидуальных

Таблица 2

Ошибки в определении основных параметров ШАЛ, попавших в соответствующую эффективную площадь

№	N_e	$\Delta(X, Y)$, м	$\Delta(\psi)^*$, град	ΔN_e , %	Δs
1	$10^4 \div 10^5$	< 3	< 5	25%	0.15
2	$5 \times 10^4 \div 5 \times 10^5$	< 4	< 4	20%	0.1
3	$5 \times 10^5 \div 5 \times 10^6$	< 5	< 3	15%	0.08

* ψ — угол между реальным и восстановленным направлениями прихода.

ливнях. В расчет были заложены следующие параметры электроники: длительность фронта импульса с анода фотоумножителя для 1-й частицы — 12 нс, для десяти частиц 5 нс. Ступенька измерения относительного времени срабатывания детектора 5 нс. Экспериментальное распределение амплитуд от одиночных мюонов. Результаты расчета приведены в табл. 2.

4. Основные задачи

С помощью модернизированной установки ШАЛ МГУ предполагается решать ряд научных задач. Весьма актуальным является изучение особенностей энергетического спектра первичных космических лучей в диапазоне от 10^{14} до 5×10^{16} эВ в районе излома спектра. Большой интерес представляет исследование анизотропии космических лучей, поиск хаотических явлений в структуре временных распределений ШАЛ, связанных с происхождением и механизмом распространения космических лучей.

Непрерывная долговременная эксплуатация установки позволит исследовать корреляцию интенсивности регистрации событий ШАЛ с такими астрофизическими явлениями, как вспышки сверхновых и гамма-всплески, а также с событиями гравитационной природы, наблюдаемыми с помощью гравитационной антенны, расположенной на территории ГАИШ.

Учебные задачи сводятся к обучению студентов и аспирантов современным методам исследования космических лучей сверхвысоких энергий и подготовке научных кадров для работы в области физики высоких энергий и астрофизики.

В процессе эксплуатации установки будут разработаны методы передачи, обработки и анализа больших информационных потоков, характерных для современных крупных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой научно-технической программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники» на 2002–2006 гг., контракт № 40.014.1.1.1110, а также гранта РФФИ № 02-02-16081.

Литература

1. Fomin Yu.A., Igoshin A.V., Kalmykov N.N. et al. // Proc. 16th Cosmic Ray Symp. Alcalá de Henares, Spain, July 20–24, 1998. P. 94.
2. Веденев О.В., Игошин А.В., Калмыков Н.Н. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 1999. **63**, № 3. С. 546.
3. Fomin Yu.A., Garipov G.K., Kalmykov N.N. et al. // Proc. 28th ICRC. Tsukuba, Japan, July 31–August 07, 2003. **2**. P. 973.

Поступила в редакцию
05.11.03