

УДК 550.378; 539.166

К.Ю. Гасникова^{1,2}

¹Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

²Московский Физико-Технический Институт, Москва, Россия

e-mail: ksugasnikova@jinr.ru

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ «РУСАЛКА»

В работе представлено описание распределённой установки для регистрации ШАЛ «Русалка», созданной на территории ОИЯИ (Дубна) в рамках научно-образовательного проекта "Ливни Знаний". Также представлены примеры научно-методических исследований, выполненных на установке.

Ключевые слова: космические лучи, широкие атмосферные ливни, научно-образовательный проект.

Введение

С момента открытия в 1912 году и до появления ускорителей космические лучи были основным инструментом физики высоких энергий. Однако и в настоящее время они не утратили свое значение, поскольку энергия частиц КЛ может на многие порядки превышать энергии, доступные в экспериментах на ускорителях. Серьёзное внимание изучению космических лучей уделяет и астрофизика, что связано с существованием таких нерешённых проблем, как происхождение, механизм ускорения, состав и форма спектра КЛ. Взаимодействуя с атмосферой Земли, космические лучи высоких энергий порождают каскады вторичных частиц, называемые широкими атмосферными ливнями (ШАЛ), поперечные размеры которых на уровне моря составляют сотни метров и больше. В настоящее время существует множество крупных экспериментов по изучению ШАЛ, таких, как AUGER, HiRes, Cascade-Grande и т. д., что связано с относительно простотой регистрации ливней.

С 2007 года в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) реализуется научно-образовательный проект «Ливни Знаний» на базе установки «Русалка». Проект ставит перед собой задачи не только чисто научного, но и образовательного плана. Одной из ключе-

вых проблем в образовании школьников и студентов является все возрастающий разрыв между исследованиями современной науки и содержанием школьных и ВУзовских курсов физики. Как следствие, уровень понимания и поддержки фундаментальных наук в обществе падает. Данный проект является попыткой внести вклад в решение этих проблем. Он дает каждому школьнику или студенту, имеющему доступ в интернет, возможность познакомиться с экспериментальными методами в физике частиц и попробовать себя в анализе данных, изучая свойства ШАЛ.

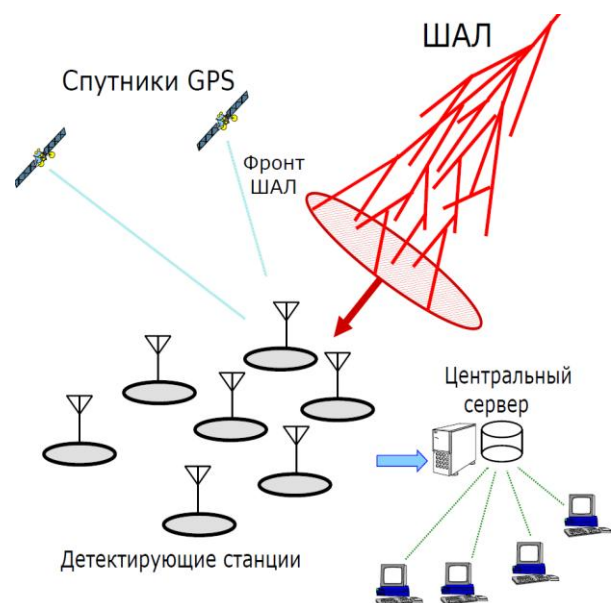


Рис. 1. Схема установки «Русалка».

Установка «Русалка»

Установка «Русалка», розположена на території Лабораторії Ядерних Проблем Інститута Ядерних Исследования, складається з 7 базових станцій (рис. 1 і рис. 2) [1]. Діаметр описаної навколо установки окружності складає 300 метрів. Кожна станція складається з 2 сцинтиляційних детекторів на основі ФЭУ, приймача GPS, блоку електроніки і джерелів живлення, який включає в себе блок QNet для обробки і оцифровки сигналів со сцинтиляційних детекторів і совмещения цієї інформації з даними от GPS приймача о времени события, высоковольтный источник питания фотоумножителя сцинтиляционных детекторов, источники низкого напряжения для питания схемы QNet и GPS приемника и одноплатный компьютер. Сцинтиляционный детектор состоит из двух светочувствительных поверхностей на основе полистирола размером $60 \times 80 \text{ см}^2$, сложенных торцами. Светосбор осуществляется с помощью спектросмещающих волокон-файберов, вклеенных в канавки профрезерованные на плоскости пластин сцинтиллятора. Световой сигнал с файберов регистрируется фотоумножителем ФЭУ-85. Для обеспечения более эффективного сбора света, торцы волокон на противоположной от фотоумножителя стороне были покрыты алюминиевой фольгой, а все грани пластин сцинтиллятора обернуты алюминизированной пленкой. Вся сборка находится в герметичном металлическом контейнере. Приемник GPS используется не для определения координат станции, которые известны точно из геодезических измерений, а для синхронизации внутренних часов с точностью порядка 20 нс со всемирным координированным временем UTC. Для обеспечения надежности получения GPS сигнала была выбрана антенна корабельного типа. Одноплатный компьютер используется для временного хранения и последующей передачи данных на центральный компьютер. Плата Qnet DAQ, одноплатный компьютер и все вспомогательные источники питания расположены в отдельном металлическом корпусе. Условием записи информации для последующей обработки является одновременное появление сигналов в обоих сцинтиляционных детекторах во временном интервале 1200 нс. Эту информацию, полученную в результате срабатывания одной станции, будем называть событием.

лем ФЭУ-85. Для обеспечения более эффективного сбора света, торцы волокон на противоположной от фотоумножителя стороне были покрыты алюминиевой фольгой, а все грани пластин сцинтиллятора обернуты алюминизированной пленкой. Вся сборка находится в герметичном металлическом контейнере. Приемник GPS используется не для определения координат станции, которые известны точно из геодезических измерений, а для синхронизации внутренних часов с точностью порядка 20 нс со всемирным координированным временем UTC. Для обеспечения надежности получения GPS сигнала была выбрана антенна корабельного типа. Одноплатный компьютер используется для временного хранения и последующей передачи данных на центральный компьютер. Плата Qnet DAQ, одноплатный компьютер и все вспомогательные источники питания расположены в отдельном металлическом корпусе. Условием записи информации для последующей обработки является одновременное появление сигналов в обоих сцинтиляционных детекторах во временном интервале 1200 нс. Эту информацию, полученную в результате срабатывания одной станции, будем называть событием.

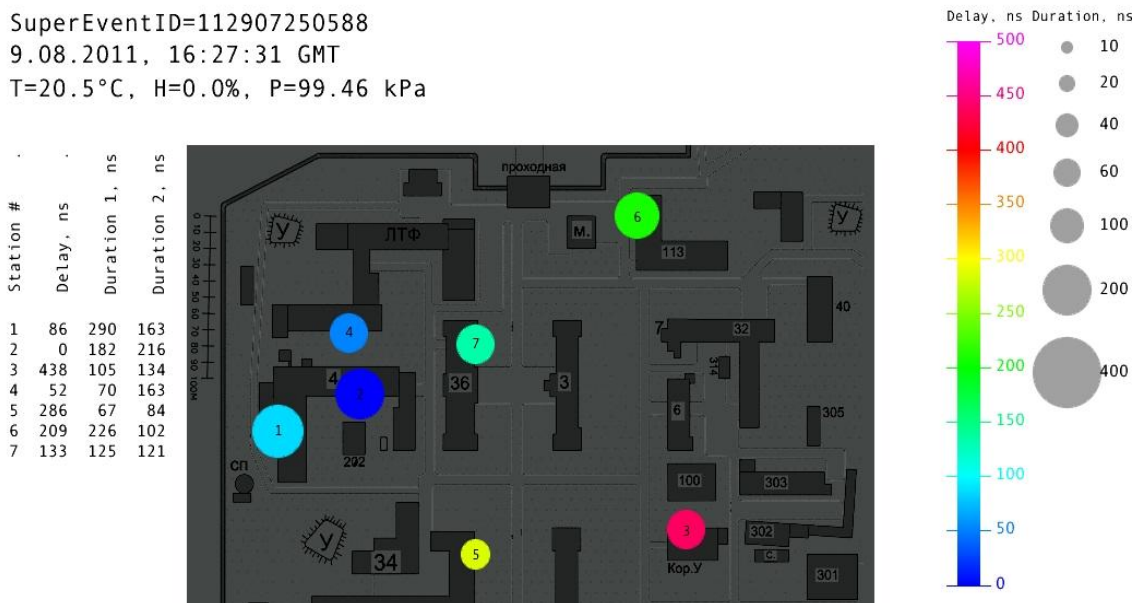


Рис. 2. Пример конфигурации суперсобытия.

События, зарегистрированные разными станциями в некотором временном

окне могут быть объединены в суперсобытие и разработаны совместно, как

порожденные одним ШАЛ. В состав установки также входит метеостанция, которая предоставляет информацию о влажности, температуре и давлении.

На основании проведенного Монте-Карло моделирования установки с использованием пакета AIRES [2] было установлено, что «Русалка» способна регистрировать суперсобытия, порожденные первичной частицей с энергией выше 10^{14} эВ, в то время, как отдельная станция может регистрировать частицы с энергией выше 10 ГэВ. Установка наиболее чувствительна к вертикальным ливням, а ее угловой аксептанс составляет $\Omega = 0.8$ стерадиан. Эффективная площадь установки сильно зависит от энергии первоначальной частицы и для энергии 10^{17} эВ составляет 0.1 км^2 .

Анализ данных

Данные с каждой станции раз в 6 часов передаются на центральный сервер, где после первичной обработки хранятся в виде деревьев рут (root Ttree) [3] в пригодном для физического анализа виде.

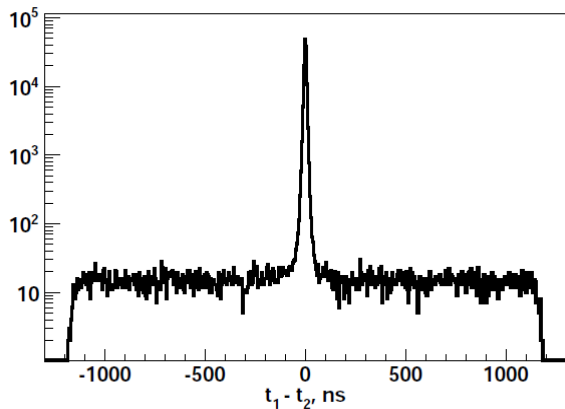


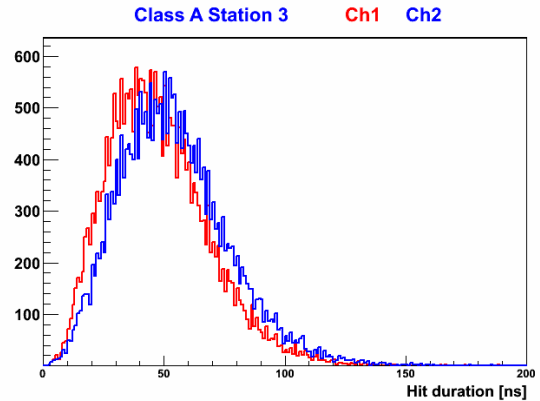
Рис. 3. Распределение для разницы времен прихода сигналов с двух детекторов одной станции.

В каждом событии измеряется время прихода сигнала в каждый из сцинтилляционных детекторов. Разность этих времен на примере одной станции представлена на рис. 3.

Пик в нуле обусловлен событиями, связанными с прохождением ШАЛ, в то время как равномерная подложка под пиком соответствует случайными совпадениями, связанными с шумами электроники и некоррелированными прохождениями вторичных частиц через детекторы. Ширина

пика в нуле для различных станций колеблется в промежутке 5-8 нс и обусловлена свойствами используемой электроники.

а)



б)

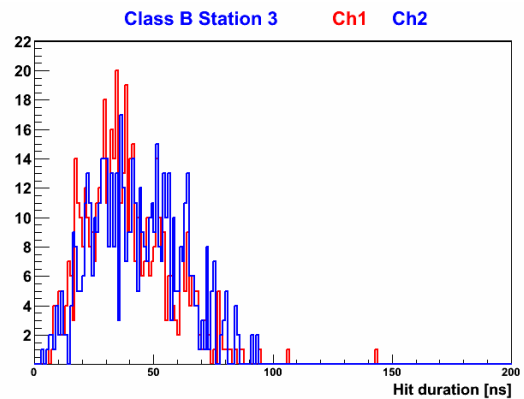


Рис. 4. Распределение длительностей сигналов для двух каналов одной станции для: а) событий, связанных с ШАЛ; б) для фоновых событий.

Также для каждого из двух каналов измеряется длительность сигнала. Длительность сигнала - это время, на протяжении которого сигнал ниже некоторого порога (сигнал отрицательный). Она различна для событий, связанных с ШАЛ и фоновых событий (рис. 4 а) и б)). Для фоновых событий средняя длительность сигнала порядка 20 нс, для связанных с ШАЛ порядка 50 нс. Длительность сигнала логарифмически зависит от потока частиц через сцинтиллятор, что может быть использовано для грубой оценки энергии первичной частицы.

В каждом событии также присутствует служебная информация, такая как

количество видимых спутников GPS, состояние станции, и т.д.

Метеоданные записываются раз в час в отдельную базу данных и могут быть использованы при обработке событий.

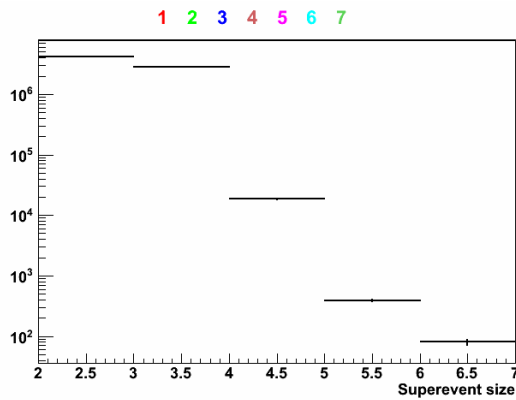


Рис. 5. Распределение числа суперсобытий в зависимости от их размера, зарегистрированных в течение года.

События, зарегистрированные разными станциями во временном интервале 1000 нс, объединяются в суперсобытие. Будем называть размером суперсобытия число сработавших станций в этом временном промежутке. На рис. 5 показано распределение числа суперсобытий в зависимости от их размера, зарегистрированных в течение года (с февраля 2012 по февраль 2013). На рис. 2 показана амплитудная и временная конфигурация одного из суперсобытий множественностью 7. Размер кружка соответствует суммарной длительности сигнала по двум каналам, а его цвет - времени прихода сигнала относительно первой сработавшей в суперсобытии станции. Это время зависит от относительного положения станции и угла прихода ливня. Из совокупности этих времен, считая фронт ливня плоским, можно восстановить направление прихода ШАЛ.

Помимо непосредственной обработки средствами ROOT, накопленные данные доступны для интерактивной обработки через веб-интерфейс каждому пользователю интернета, который зарегистрировался на сайте <http://livni.jinr.ru>. Для обработки используются порядка 20 заранее подготовленных алгоритмов, начальные параметры которых можно изменять

вручную. Через короткое время после запуска алгоритмов на экране появляется результат - многочисленные графики и гистограммы. На рис. 6 показан пример вызова алгоритма, который строит двумерное распределение длительностей сигналов в двух сцинтилляционных детекторах одной станции для событий, связанных с регистрацией ШАЛ (класс А) и фоновых (класса В). В качестве параметров задаются: желаемый временной интервал, номер станции, количество бинов в гистограмме, максимальная длительность сигнала для каждого из классов событий, использование логарифмической шкалы, размер суперсобытия и комментарии к программе. Результат работы алгоритма показан на рис. 4 а) и б).

Хотя проект "Ливни Знаний" и имеет аналоги в мире, такие как ALTA в Америке и EUROCOSMIC, EEE и CZELTA - в Европе, его особенностью являются отказ от размещения отдельных станций в учебных учреждениях и создание интерактивного доступа к данным.

Примеры проведенных на установке исследований

Исследование зависимости потока вторичных космических лучей от атмосферных условий. Ожидаемая зависимость потока вторичных космических лучей, регистрируемых установкой, от давления на поверхности земли обусловлена тем, что при изменении давления изменяется толщина слоя воздуха, который проходят частицы космических лучей. Однако, и при постоянном давлении можно ожидать зависимость потока от температуры атмосферы, поскольку меняется распределение плотности воздуха по высоте, что приводит к изменению изобарического уровня генерации мюонов.

$$T_{eff} = \frac{\sum_i e^{-Mg \frac{\Delta h_i}{kT_i}} \Delta h_i T_i}{\sum_i e^{-Mg \frac{\Delta h_i}{kT_i}} \Delta h_i}, \quad (1)$$

где M - молярная масса воздуха, Δh_i - толщина слоя воздуха, T_i - температура в этом слое.

Наиболее оптимальным способом учесть изменение плотности атмосферы по высоте является введение эффективной среднemasсовой температуры по формуле (1), взятой из работы [4].

По шаблону (Signal duration AB)

Формат ввода даты: ГГГГ-ММ-ДД ЧЧ:ММ (минимальная: 2009-05-07)
Максимальное число разбиений гистограммы: 10000

Название параметра	Ваше значение
Select data from	2012-05-01 08:00
Select data until	2012-05-01 18:00
Selected station number	3
Number of histogram bins	200
Maximum signal duration (ns)	200
Logarithmic scale	0
Class A upper limit (ns)	30
Class B lower limit (ns)	150
Coincidence rank	0
Comments	№7 SD

Передумал Сохранить

Рис. 6. Пример вызова программы через веб-интерфейс, результат работы показан на рис. 4.

Для исследования использовались данные, полученные с февраля по май 2012 года станцией номер 6. Зависимость температуры от высоты бралась из данных Долгопрудненской метеостанции [5], расположенной в 100 км от установки, где 1-2 раза в день запускаются метеозонды на высоту больше 20 км. На основании этих данных строилась двумерная зависимость счёта от давления и эффективной температуры (рис. 7). Полученная зависимость аппроксимировалась функцией вида:

$$R=R_0(1+a(P-100\text{кПа})+b(T-T_0))$$

где T - эффективная температура атмосферы, R - счёт ШАЛ. Для коэффициентов были получены следующие значения:

$$a=(-0.33\pm 0.01)\%/кПа;$$

$$b=(-0.01\pm 0.02)\%/^{\circ}\text{C}.$$

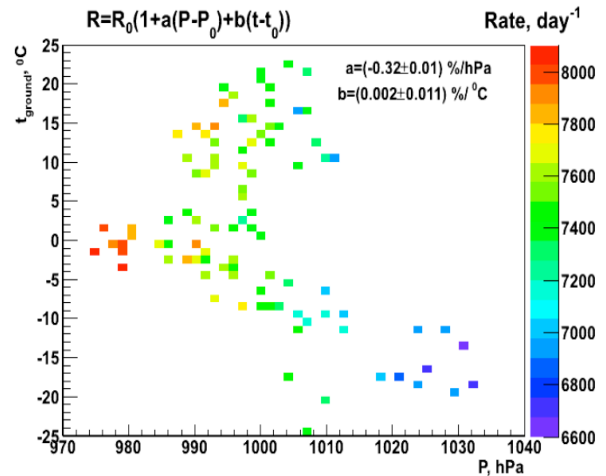


Рис. 7. Зависимость величины счёта станции от давления на поверхности земли и среднemasсовой температуры атмосферы.

Зависимость от давления соответствует ожидаемой и хорошо согласуется результатами предыдущих измерений [6]. При этом зависимость от температуры не была обнаружена, таким образом с 95% вероятностью, если существует температурная зависимость, то она не превышает $0.5\% ^{\circ}\text{C}$. Зависимость счёта от температуры воздуха у поверхности Земли так же не была обнаружена [7].

Поиск зависимости потока космических лучей от солнечной активности. О связи солнечной активности с вариациями потока космических лучей, регистрируемых у поверхности Земли, известно давно. Механизмы, обеспечивающие эту связь различны: изменение потока солнечных космических лучей, непосредственно связанное с процессами, происходящими в атмосфере Солнца; изменение потока галактических космических лучей, связанное с возмущениями межпланетного магнитного поля (Форбуш-эффект); изменение состояния атмосферы Земли, приводящее к изменению условий генерации вторичных космических лучей и т. д.

Поиск корреляций между вариациями регистрируемого потока вторичных космических лучей с энергией выше 10 ГэВ и солнечной активностью производился в предположении, что флуктуации счёта станций наряду с компонентой, определяемой статистическими эффектами, содержат компоненту, зависящую от возмущения магнитосферы Земли.

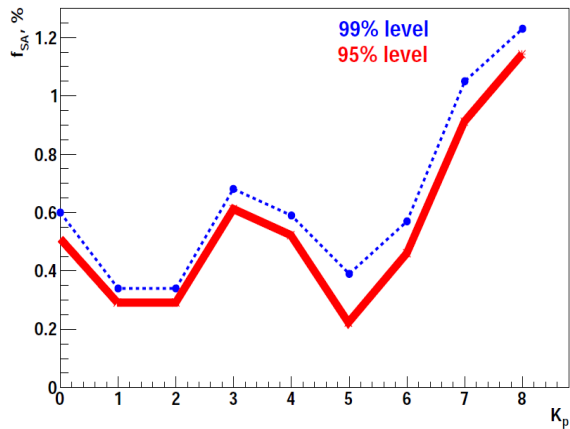


Рис. 8. Зависимость оценки максимально возможного уровня вариаций, вызванных солнечной активностью, от индекса геомагнитной активности K_p .

В качестве характеристики возмущенности магнитосферы использовался

Стаття надійшла до редакції 30.04.2013

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веб-сайт проекта «Ливни Знаний»: <http://livni.jinr.ru>
2. Sciutto S.J. Air Shower Simulations with the AIRE System // Proc. of th 26th International Cosmic-ray Conference. Salt Lake City. August 17-25, 1999. Vol. 1, P. 411.
3. Ссылка: <http://root.cern.ch>.
4. Беркова М.Д., Белов А.В., Ерошенко Е.Ф., Янке В.Г. Температурный эффект мюонной компоненты и практические вопросы его учета в реальном времени. // Изв. РАН. Сер. физ. 2011. Т. 75. № 6. С. 887.
5. Ссылка: <http://weather.uwyo.edu>
6. Grieder P. Extensive air showers / Springer. P. 279.
7. Гасникова К.Ю. Измерение температурной зависимости счета атмосферных ливней // Труды 55 Научной Конференции МФТИ, МФТИ, 2012. С. 145-147.
8. Bartels, J., Heck, N.H. & Johnston, H.F., 1939. The three-hour range index measuring geomagnetic activity // Geophys. Res., 44, P. 411-454.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2013

К. Yu. Gasnikova^{1,2}

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

e-mail: ksugasnikova@jinr.ru

DISTRIBUTED SETUP "RUSALKA" FOR DETECTION OF EXTENSIVE ATMOSPHERIC SHOWERS

Distributed setup "Rusalka" for detection of extensive atmospheric showers (EAS), developed in JINR (Dubna) under scientific-educational project "Knowledge showers", is described. Some examples of scientific and methodological studies performed at the setup are also presented.

Keywords: cosmic rays, extensive atmospheric showers, scientific-educational project.

К.Ю. Гаснікова^{1,2}

¹Об'єднаний Інститут Ядерних Досліджень, Дубна, Росія

²Московський Фізико-Технічний Інститут, Москва, Росія

e-mail: ksugasnikova@jinr.ru

РОЗПОДІЛЕНА УСТАНОВКА ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНИХ ЗЛИВ «РУСАЛКА»

У роботі представлено опис розподіленої установки для реєстрації ШАЛ «Русалка», яка створена на території ОІЯД (Дубна) у рамках науково-освітнього проекту "Лівні Знань". Також представлені приклади науково-методичних досліджень, виконаних на цій установці.

Ключові слова: космічні промені, широкі атмосферні зливи, науково-освітній проект.