

УДК 537.591.15

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕН ПРИХОДА ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ ПО ДАННЫМ УСТАНОВКИ ШАЛ МГУ МЕТОДАМИ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

М. Ю. Зотов, Г. В. Куликов, Ю. А. Фомин

(НИИЯФ)

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

Представлены результаты анализа моментов регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), зарегистрированных на установке «Прототип ШАЛ-1000», работающей в составе установки ШАЛ МГУ. Показано, что для подавляющего большинства ливней эти моменты времени распределены по закону Пуассона. В то же время обнаружены локальные отклонения от данного распределения.

Введение

Изучение космических лучей, открытых около 100 лет тому назад Виктором Гессом [1], позволяет получить информацию как о характеристиках адронных взаимодействий, так и о процессах, происходящих во Вселенной.

Энергетический спектр космических лучей простирается приблизительно от 10^{10} до 10^{20} эВ, однако интенсивность космических лучей с энергией выше нескольких сотен ТэВ очень мала, и пока еще нет экспериментов по их регистрации за пределами атмосферы с помощью спутников или космических станций. Единственно возможным методом их изучения остается метод широких атмосферных ливней, возникающих в атмосфере при прохождении через нее первичной космической частицы сверхвысокой энергии. ШАЛ представляет собой поток вторичных частиц, рожденных вследствие ядерного и электромагнитного каскадов, покрывающий площадь на уровне наблюдения в сотни и более квадратных метров. Такое большое расхождение позволяет регистрировать полный поток вторичных частиц (пропорциональный энергии первичной частицы) детекторами небольшой площади, расположенными на расстояниях в десятки и более метров друг от друга. С помощью метода ШАЛ успешно изучаются энергетический спектр, массовый состав и направления прихода первичных частиц.

Вследствие взаимодействия первичных частиц с магнитными неоднородностями в Метагалактике и в нашей Галактике, их распространение носит диффузный характер. В результате этого естественно ожидать, что попадание космических частиц на границу атмосферы представляет собой случайный процесс и характеризуется достаточно большой степенью изотропии. (Мы не рассматриваем здесь частицы предельно высоких энергий, ларморовский радиус которых очень велик.)

Одной из характеристик этого процесса является распределение времен прихода ШАЛ, или, что то же самое, распределение интервалов времени (или

задержек) между последовательными ливнями. В ряде работ было получено, что распределение задержек подтверждает ожидаемый случайный характер прихода ливней и удовлетворительно описывается распределением Пуассона (см., напр., [2]). Однако в некоторых работах были обнаружены события, дающие отклонение от пуассоновского распределения [3, 4], что может указывать на существование пока еще неизвестного процесса, вносящего вклад в генерацию и распространение космических лучей. Поэтому представляется целесообразным более детальное изучение распределения времен прихода ШАЛ.

Данная работа посвящена анализу времен прихода широких атмосферных ливней при первичных энергиях более $3 \cdot 10^{14}$ эВ по данным установки «Прототип ШАЛ-1000», работающей в НИИЯФ МГУ в составе установки ШАЛ МГУ.

1. Описание установки «Прототип ШАЛ-1000» и экспериментальные данные

Установка «Прототип ШАЛ-1000» размещена на территории установки ШАЛ МГУ [5]. Основной целью создания «Прототипа ШАЛ-1000» являлась методическая отработка аппаратуры для гигантской ливневой установки, создаваемой для изучения широких атмосферных ливней предельно высоких энергий ($10^{19} - 10^{21}$ эВ). Длительная эксплуатация прототипа позволяла проверить надежность и стабильность работы аппаратуры в естественных условиях в течение большого периода времени.

Установка «Прототип ШАЛ-1000» состоит из 8 детекторных пунктов (ДП), расположенных на площади 67×22 м в центральной части установки ШАЛ МГУ. Расположение детекторных пунктов показано на рис. 1. Каждый детекторный пункт представляет собой бетонный бокс, в котором в светонепроницаемом кожухе находятся пластический сцинтиллятор площадью 1 м^2 и толщиной 5 см, фотоумножитель типа ФЭУ-173 и блок электроники для амплитудных и временных измерений сигналов, создаваемых



Рис. 1. Расположение детекторных пунктов прототипа установки ШАЛ-1000

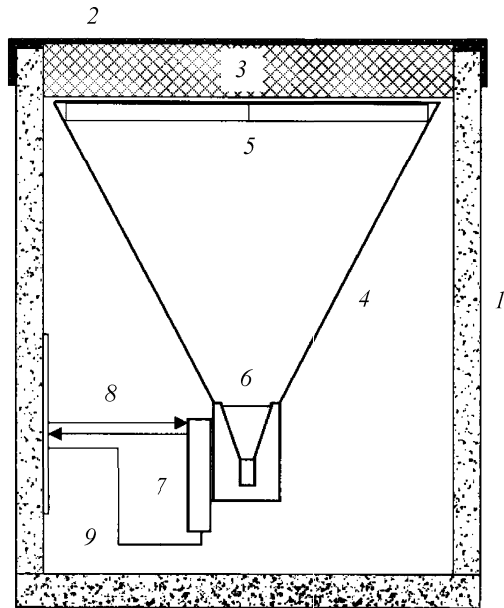


Рис. 2. Конструкция детекторного пункта: 1 — железобетонный контейнер (бокс); 2 — крышка бокса; 3 — пенопласт; 4 — пирамидальный кожух; 5 — сцинтилляционные пластины; 6 — фотоумножитель; 7 — блок электроники ДП; 8 — оптоволоконный кабель; 9 — сеть питания 220 В

ливневыми частицами в сцинтилляторе (рис. 2). В одном из детекторных пунктов расположена компактная метеостанция, позволяющая измерять температуру, давление и влажность атмосферы.

Информация со всех детекторных пунктов поступает в компьютер, где программно происходит предварительный анализ качества информации и отбор событий ШАЛ. Признаком прохождения ливня является срабатывание четырех детекторов, входящих в любой из трех квадратов установки в течение времени менее 3.2 мкс. Установка регистрирует ливни от космических лучей с энергией выше 10^{14} эВ.

Для анализа распределения времен прихода ШАЛ было отобрано 203 дня круглосуточной, бесперебойной работы установки в период с августа 1997 по февраль 1999 г. Общее количество ливней в данной группе составило 1 668 489 событий. Средний интервал времени между последовательными моментами регистрации равен приблизительно 10.5 с. Дискретность в моментах регистрации ШАЛ имеет величину

порядка 0.055 с (один «тик» часов персонального компьютера).

Известно, что темп счета ливней зависит от давления. Давление определялось по показаниям компактной метеостанции. Измерялся темп счета ШАЛ за часовые периоды времени. Статистическая ошибка при этом не превышала 5%. В качестве примера на рис. 3 показано изменение темпа счета (рис. 3, а) и давления (рис. 3, б) от времени за период работы установки порядка 1400 ч [5]. Хорошо видна корреляция темпа счета с давлением. Для определения барометрического эффекта была построена зависимость темпа счета от давления, которая хорошо описывалась аппроксимацией вида $\ln n(P) = -\beta P + \text{const}$, где $n(P)$ — число ливней, зарегистрированных в единицу времени при давлении P . Оказалось, что значение барометрического коэффициента β лежит в интервале $(1.08 - 1.24) \times 10^{-2}$ мм рт. ст. в зависимости от метода его нахождения. При этом статистическая ошибка значения β имеет величину порядка 10^{-4} . С учетом барометрического коэффициента были получены значения темпа счета при давлении 742 мм рт. ст. (рис. 3, в).

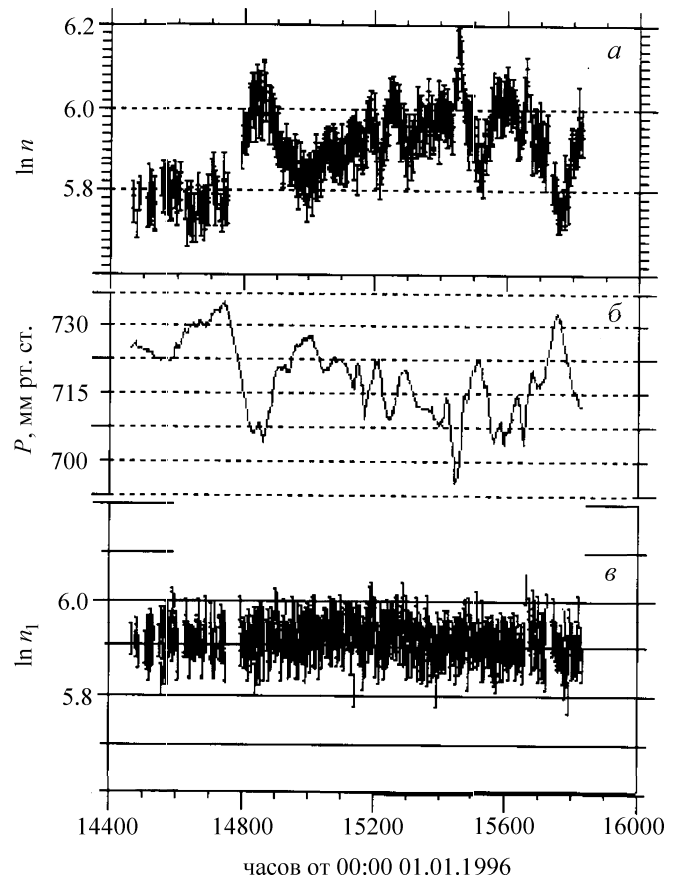


Рис. 3. Изменение темпа счета ШАЛ n (а) и атмосферного давления P (б); значение темпа счета n_1 с учетом барометрического эффекта (в)

Можно ожидать, что темп счета ливней зависит также и от температуры воздуха. Однако анализ данных о вариациях темпа счета в зависимости от температуры показал, что в диапазоне наблюдаемых

температур корреляция между ними практически отсутствует.

2. Анализ экспериментальных данных методами классической статистики

На первом этапе настоящего исследования экспериментальные данные, полученные на «Прототипе ШАЛ-1000», были проанализированы с целью определения вида распределения интервалов времени между соседними ливнями, или задержек. Для обеспечения стационарности изучаемых данных все наблюдаемые задержки на основе найденного значения барометрического коэффициента β были приведены к атмосферному давлению 742 мм рт. ст., близкому к среднему за анализируемый период работы установки.

Как известно, первым шагом проверки гипотезы о том, что некая выборка данных описывается тем или иным законом распределения, является анализ предположения об однородности данной выборки (см., напр., [6]). В нашем случае выборка представляет собой последовательность задержек определенной длины. Для проверки однородности выборки был использован критерий серий [7]. Под серией понимается группа последовательных задержек, величины которых внутри данной группы все одновременно меньше или больше медианного значения задержки для заданной выборки. Используя критерий серий, была проверена гипотеза об однородности данных, сгруппированных в выборки по 100, 200, 500 и 1000 ливней, в выборки за время суточной работы установки и за время непрерывной работы установки от 2 до 21 дня, а также выборка для всей имеющейся совокупности данных. Гипотеза об однородности проверялась для уровней значимости 0.1, 0.05, 0.02 и 0.01.

Проведенный анализ показал, что среди выборок длиной 100 и 200 ливней имеются такие, для которых гипотеза об однородности не может быть принята даже с самым минимальным разумным уровнем значимости. Встречались случаи, когда гипотезе об однородности не удовлетворяли выборки, объединяющие данные за несколько дней непрерывной работы, т. е. выборки, насчитывающие несколько десятков тысяч событий. При этом не удалось обнаружить каких-либо причин, связанных с работой установки, которые могли бы привести к подобному результату, и, следовательно, встал вопрос о феноменологических причинах данного явления.

Для наборов данных, удовлетворяющих гипотезе об однородности, с помощью критерия χ^2 для различных временных интервалов была проанализирована гипотеза о том, что распределение задержек является экспоненциальным. В частности, оказалось, что выборка, состоящая из 416998 ливней, зарегистрированных за 51 сутки работы установки, в течение которых величина среднего атмосферного давления лежала в пределах 740–745 мм рт. ст. и дневная вариация не превышала 10 мм рт. ст., удовлетворяет гипотезе об однородности на уровне значимости 0.05, и распределение временных интервалов длиной не более 55 с является экспоненциальным на уровне значимости 0.9 [8].

Для выявления возможных причин отклонения от однородности в полученных экспериментальных данных были применены подходы, основанные на методах нелинейного и кластерного анализа. Результаты этих исследований будут изложены в следующей статье.

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. Hess V.F. // Phys. Z. 1912. **13**. P. 1084.
2. Веденеев О.В., Зотов М.Ю., Игошин А.В. и др. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2001. **65**, № 8. С. 1224.
3. Chikawa M., Kitamura T., Konishi T., Tsuji K. // Proc. 22nd ICRC. Dublin, 1991. **4**. P. 287.
4. Tsuji K., Konishi T., Kitamura T., Chikawa M. // Proc. 23rd ICRC. Calgary, 1993. **4**. P. 223.
5. Атрашкевич В.Б., Веденеев О.В., Игошин А.В. и др. Прототип установки ШАЛ-1000. Первые результаты. Препринт 98-53/554. М., 1998.
6. Bendat J.S., Piersol A.G. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. N. Y., 1986.
7. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М., 1983.
8. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kulikov G.V. et al. // Proc. 27th ICRC. Hamburg, 2001. **1**. P. 195.

Поступила в редакцию
08.10.03