

## ПОИСК КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ ВОЗМУЩЕНИЯМИ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ, ВЫЗВАННЫМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ, И ПОТОКОМ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ УСТАНОВКОЙ РУСАЛКА

*А. А. Бычков<sup>а</sup>, А. В. Гуськов<sup>б</sup>*

<sup>а</sup> Школа № 7 Изобильненского района Ставропольского края, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для поиска корреляций между значением индекса геомагнитной активности  $K_p$  и величиной суточных вариаций счета станций применен статистический подход. Установлен верхний предел на изменение счета станций, связанное с солнечной активностью. Для  $K_p = 8$  он составил 1,2 % (CL = 99 %).

The statistical approach has been applied to looking for correlations between value of the geomagnetic index  $K_p$  and amplitude of daily variations of the stations rate. The upper limit of the rate variations related with solar activity for  $K_p = 8$  is 1.2 % (CL = 99 %).

PACS: 95.85.Ry; 95.55.Vj; 94.05.Sd

### ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи традиционно являются инструментом не только физики элементарных частиц, но и астрофизики. Энергетический спектр, состав и зависимость потока космических лучей высоких энергий галактического и внегалактического происхождения от направления несут информацию о свойствах межзвездной среды, конфигурации галактических магнитных полей, пространственном распределении источников космических лучей и механизмах ускорения частиц до высоких энергий. В настоящее время в ОИЯИ в рамках научно-образовательного проекта «Ливни знаний» [1] создается распределенная установка РУСАЛКА для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ), порождаемых взаимодействием первичных космических лучей с атмосферой Земли. Установка способна восстанавливать направление и грубо оценивать энергию ШАЛ в диапазоне энергий выше 10–100 ГэВ. Отдельные станции установки способны регистрировать вторичные частицы, порожденные первичными протонами гораздо более низких энергий (от 10 ГэВ). Научными задачами, в решение которых установка РУСАЛКА может внести свой вклад, являются изучение вариаций потока первичных космических лучей и поиск пространственных и временных корреляций между ШАЛ.

Первым шагом для изучения вариаций потока космических лучей не известного на сегодняшний день происхождения является наблюдение и учет вариаций, связанных с хорошо известными явлениями в атмосфере Земли и ближнем космосе. В данной работе представлены результаты попытки обнаружить в счете отдельных станций установки компоненту, поведение которой скоррелировано с состоянием геомагнитного поля, определяемым солнечной активностью.

## 1. УСТАНОВКА РУСАЛКА

Установка РУСАЛКА состоит из семи базовых станций, расположенных на территории ЛЯП ОИЯИ. Диаметр описанной вокруг установки окружности составляет 300 м. Одна базовая станция включает в себя два сцинтилляционных детектора площадью  $0,5 \text{ м}^2$  каждый на основе фотоэлектронных умножителей, приемник GPS-сигнала, блок электроники для оцифровки и первичной обработки сигналов, высоковольтный и низковольтный блоки питания, а также одноплатный мини-компьютер для управления набором данных, их хранения и передачи на центральный сервер. Условием записи события является одновременное появление сигналов в обоих сцинтилляционных детекторах ( $|t_1 - t_2| < 1200 \text{ нс}$ ). Это условие позволяет игнорировать значительную часть событий, не связанных с прохождением ШАЛ (это одиночные частицы вторичных космических лучей, распад  $^{40}\text{K}$ , шумы фотоэлектронных умножителей и т. д.), поскольку вероятность их одновременного появления в двух счетчиках невелика. Скорость счета отбираемых таким образом событий лежит в интервале 0,1–1 Гц, в то время как скорость счета каждого сцинтилляционного счетчика составляет около 60 Гц. Следует отметить, что, несмотря на величину окна в 1200 нс, разница времени прихода сигналов со счетчиков, вызванных ШАЛ, заметно меньше и составляет несколько десятков наносекунд. Распределение для величины  $|t_1 - t_2|$  показано на рис. 1. Узкий пик в нуле соответствует сигналам от ШАЛ, в то время как равномерное распределение соответствует фоновым событиям монте-карло-моделирования отклика отдельной станции на ШАЛ, инициированные первичными протонами различных энергий. Монте-карло-моделирование пока-

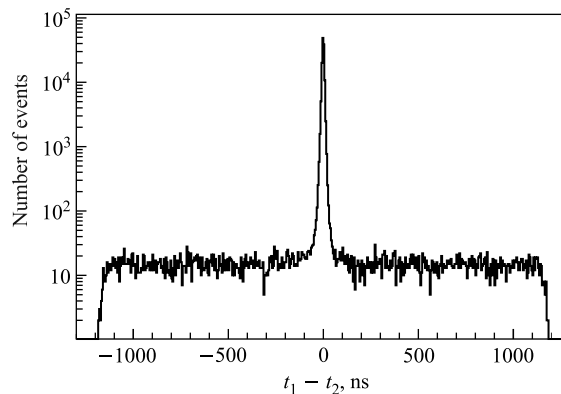


Рис. 1. Распределение для разницы времен прихода сигналов с двух сцинтилляционных детекторов одной станции

зало, что основная доля событий, регистрируемых станцией, соответствует начальной энергии протона 0,1–1000 ТэВ. Посредством периодического получения станцией GPS-сигнала каждое событие получает временную привязку ко всемирному времени (UTC) с точностью не хуже нескольких десятков наносекунд.

Раз в шесть часов каждая станция передает набранные данные на центральный сервер для хранения и последующей обработки. События, зарегистрированные разными станциями установки во временном окне в 1000 нс, интерпретируются как порожденные одним и тем же ШАЛ и при последующей обработке объединяются в суперсобытие. Точное знание времени регистрации каждого события в суперсобытии позволяет определить направление приходящего ШАЛ, а следовательно, и первичной высокоэнергетичной частицы. Также разработаны косвенные методы оценки энергии первичной частицы.

В рамках научно-образовательного проекта «Ливни знаний» данные установки с небольшой задержкой доступны через веб-интерфейс для анализа широкому кругу заинтересованных пользователей.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ СЧЕТА СТАНЦИЙ ОТ МЕТЕОУСЛОВИЙ

Изменение атмосферного давления во времени — наиболее сильный эффект, приводящий к изменению счета станций. Эффект обусловлен тем, что с изменением давления изменяется плотность атмосферы над точкой наблюдения, а значит и условия развития ШАЛ. Увеличение длины свободного пробега вторичных частиц в ливне с уменьшением давления приводит к тому, что счет станции тем выше, чем ниже давление. Зависимость счета станций от атмосферного давления (барометрический эффект) может быть измерена для каждой станции, поскольку в состав установки входит метеостанция, непрерывно мониторящая состояние атмосферы. На рис. 2 показан пример зависимости счета от давления для одной из станций. В первом приближении зависимость счета от давления можно считать линейной:

$$R = R_0(1 + k(P - 100 \text{ кПа})), \quad (1)$$

где  $R_0$  — счет станции при давлении 100 кПа, а  $R$  — счет станции при давлении  $P$ . Значение углового коэффициента  $k$  для каждой станции может быть определено незави-

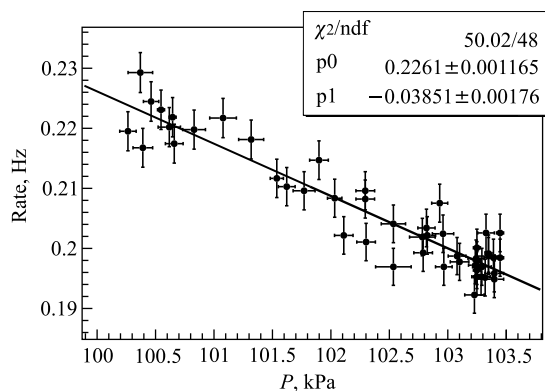


Рис. 2. Зависимость счета станции от атмосферного давления

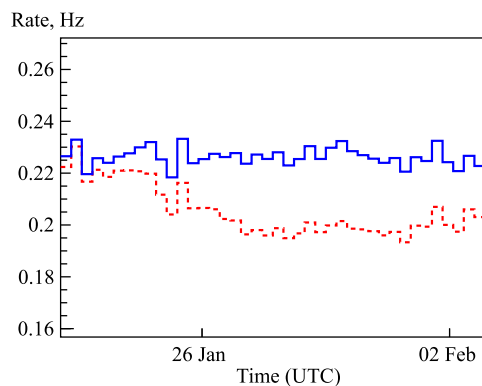


Рис. 3. Счет станции регистрируемый (пунктирная линия) и откорректированный на величину барометрического эффекта (сплошная линия)

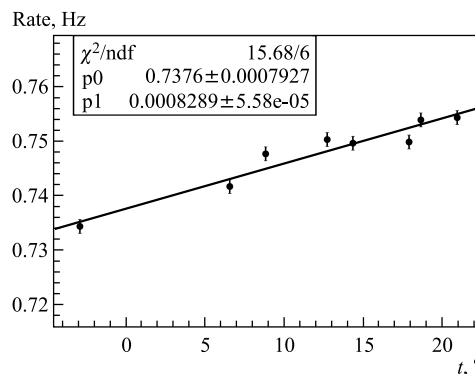


Рис. 4. Зависимость счета станций от температуры при постоянном давлении

симо для произвольного периода времени. Для устранения вариаций счета, связанных с барометрическим эффектом, счет станций при давлении  $P$  в соответствии с вышеприведенной формулой пересчитывается в счет при давлении 100 кПа. На рис. 3 показан пример счета станции до и после такой корректировки. Видно, что вариации, связанные с изменением давления, практически полностью сглаживаются.

Зависимость счета станций от температуры атмосферы у поверхности при постоянном давлении показана на рис. 4. Поскольку среднеквадратичное отклонение температуры от среднего значения в течение суток невелико и составляет обычно не более  $3\text{--}5^\circ$ , вариации счета станций в пределах суток, вызванные температурным эффектом, не должны превышать  $0,3\text{--}0,5\%$ . Из-за малости этой величины в настоящее время счет станций не корректируется на температурный эффект.

### 3. ПОИСК КОРРЕЛЯЦИЙ МЕЖДУ СЧЕТОМ СТАНЦИЙ И СОСТОЯНИЕМ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

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. [2, 3]. Низкоэнергетичная область спектра первичных космических лучей наиболее подвержена вариациям, связанным с солнечной активностью (эффект может составлять десятки процентов), в то время как влияние солнечной активности на жесткие космические лучи, продукты взаимодействия которых в атмосфере Земли и регистрируют станции установки РУСАЛКА, незначительно.

Для анализа были использованы данные о счете станций 4, 5, и 6 в период с марта по октябрь 2011 г. События, для которых разность времен прихода сигналов с двух сцинтилляционных детекторов каждой станции превышала 30 нс, исключались из анализа. Для устранения вариаций счета станций, связанных с изменением во времени атмосферного давления, счет станций корректировался на величину барометрического эффекта согласно формуле (1).

Коэффициент  $k$ , характеризующий величину барометрического эффекта, определялся для каждой станции раз в 7–10 сут на основании зависимости счета от давления. Пример временной зависимости измеренного счета станции и счета, откорректированного на барометрический эффект, приведен на рис. 3.

В качестве величины, характеризующей состояние геомагнитного поля, был использован индекс геомагнитной активности  $K_p$ , который непосредственно связан с максимальным значением флуктуаций индукции геомагнитного поля [4]. Значение индекса  $K_p > 4$  соответствует магнитной буре.

Основная идея, использованная в данной работе, заключается в том, что для поиска корреляций между изменением регистрируемого потока вторичных космических лучей и солнечной активностью исследовалась не зависимость среднего счета станций от времени, сопоставленная со временем начала солнечных вспышек, а зависимость флуктуаций регистрируемого числа событий от индекса геомагнитной активности. Была сделана попытка выделить в наблюдаемых флуктуациях компоненту, не связанную со статистическими флуктуациями и зависящую от  $K_p$ .

Единичным временным интервалом, используемым в анализе, являлись сутки. Каждые сутки делились на восемь трехчасовых интервалов, для каждого из которых вычислялась средняя скорость счета  $n_i$ . Далее для каждого суток вычислялась относительная флуктуация скорости счета

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 n_i^2 - \left( \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 n_i \right)^2}}{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 n_i}. \quad (2)$$

Таким образом, каждые сутки измерения для каждой станции характеризовались всего двумя величинами: относительной флуктуацией скорости счета  $f$  и максимальным за сутки значением индекса геомагнитной активности  $K_p$ . Весь набор данных для каждой станции был разделен на девять групп с одинаковым значением  $K_p$  (от 0 до 8). Для каждой из девяти групп было вычислено среднее значение относительной флуктуации скорости счета

$$\bar{f}_{K_p} = \frac{1}{N_{K_p}} \sum_{j=1}^{N_{K_p}} f_j, \quad (3)$$

где  $N_{K_p}$  — число суток в соответствующей группе, и оценена статистическая ошибка  $\Delta \bar{f}_{K_p}$  величины  $\bar{f}_{K_p}$  из предположения, что в пределе большого числа событий дисперсия  $\sigma_f$  величины  $f$  в каждой группе  $K_p$  одинакова и равна

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N n_k^2 - \left( \frac{1}{N} \sum_k^N n_k \right)^2}. \quad (4)$$

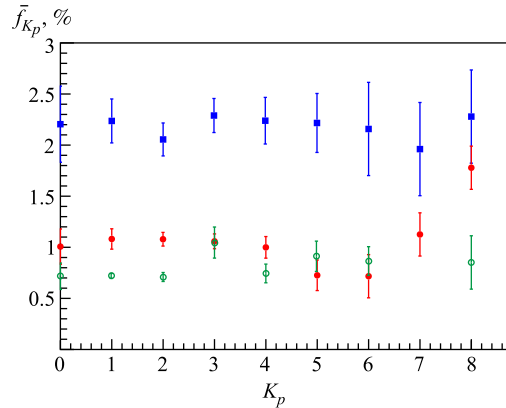


Рис. 5. Зависимость среднего значения относительной флуктуации скорости счета от индекса геомагнитной активности  $K_p$

Здесь  $N = \sum N_{K_p}$  — полное число анализируемых суток для данной станции. Тогда

$$\Delta \bar{f}_{K_p} = \frac{\sigma_{\bar{f}}}{\sqrt{N_{K_p}}}. \quad (5)$$

Зависимость величины  $\bar{f}_{K_p}$  от  $K_p$  для каждой из трех анализируемых станций приведена на рис. 5.

Было сделано предположение о том, что флуктуации счета каждой станции  $\bar{f}_{K_p}$  определяются вкладами двух компонент: статистическими флуктуациями скорости счета  $f_{\text{stat}}$  (поскольку  $n_i$  является случайной величиной, подчиняющейся статистике Пуассона) и флуктуациями  $f_{\text{SA}}$ , связанными с солнечной активностью:

$$\bar{f}_{K_p}^2 = f_{\text{stat}}^2 + f_{\text{SA}}^2. \quad (6)$$

Предполагалось, что вклад  $f_{\text{SA}}$  одинаков для всех станций, пренебрежимо мал для периода спокойного Солнца ( $K_p < 4$ ) и растет с ростом  $K_p$ , в то время как вклад  $f_{\text{stat}}$  уникален для каждой станции и не зависит от  $K_p$ , поскольку определяется только абсолютной величиной счета станции. На рис. 6 представлена зависимость величины  $f_{\text{SA}}^2$ , рассчитанной изначально для каждой станции по формуле (6), а затем усредненной по трем станциям, от  $K_p$ . Величина  $f_{\text{stat}}$  для каждой станции оценивалась как среднее значение  $\bar{f}_{K_p}$  для  $K_p < 4$ .

Полученная зависимость  $f_{\text{SA}}^2(K_p)$  не противоречит статистической гипотезе о том, что  $f_{\text{SA}}^2 \equiv 0$  во всем диапазоне значений  $K_p$  (для данной гипотезы  $\chi^2/\text{ndf} = 0,74$ , вероятность случайно получить большее значение  $\chi^2$  для данного числа степеней свободы — 67%). Таким образом, не удалось обнаружить зависимости вариаций потока вторичных космических лучей от солнечной активности. Однако полученные данные позволяют сделать вывод о верхнем пределе для величины таких вариаций. На рис. 7 показаны уровни значений  $f_{\text{SA}}$  в зависимости от  $K_p$ , соответствующие вероятности 95 и 99% нахождения вклада флуктуаций, вызванных солнечной активностью, ниже данного значения. Таким образом, можно утверждать с вероятностью 99%, что даже во время сильных магнитных

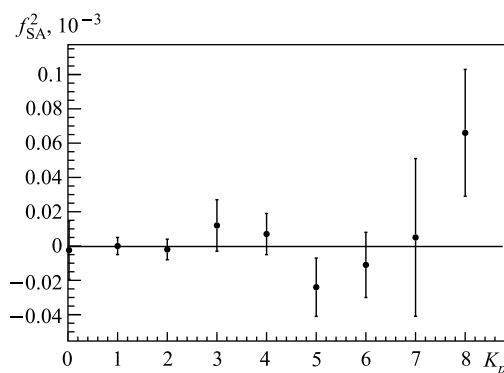


Рис. 6. Зависимость уровня относительных флуктуаций, вызванных солнечной активностью, от индекса геомагнитной активности  $K_p$

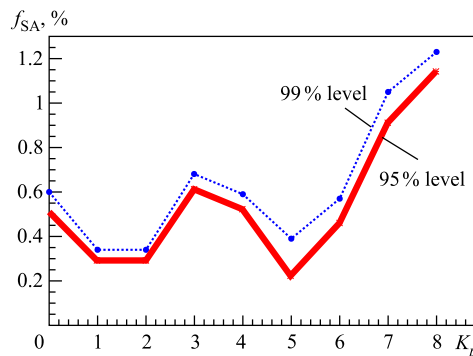


Рис. 7. Зависимость оценки максимально возможного уровня вариаций, вызванных солнечной активностью, от индекса геомагнитной активности  $K_p$

бурь ( $K_p = 8$ ) уровень флуктуаций потока первичных космических лучей с энергией выше 100 ГэВ временного масштаба порядка нескольких часов, вызванных возмущением магнитосферы Земли, не превышает 1,2 %.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат свидетельствует об отсутствии статистически значимой зависимости вариаций счета вторичных частиц, порожденных первичными протонами с энергией выше 100 ГэВ, от солнечной активности на уровне выше 1 % даже во время сильных солнечных вспышек. Увеличение объема анализируемых данных, а также введение поправки на температурный эффект позволят в дальнейшем повторить измерения с более высокой точностью. Этому, несомненно, будет способствовать и тот факт, что в настоящее время наблюдается рост солнечной активности в соответствии с 11-летним циклом. Следует отметить, что полученный результат находится в согласии с результатом поиска проявления форбуш-эффекта для мюонов с энергией выше 220 ГэВ, регистрируемых баксанским подземным сцинтилляционным телескопом [5].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веб-сайт проекта «Ливни знаний». <http://livni.jinr.ru/>
2. Фейнберг Е. Л., Дорман Л. И. // УФН. 1956. Т. 59. С. 6.
3. Дорман Л. И. // УФН. 2010. Т. 180. С. 519.
4. Bartels J. et al. // Geophys. Res. 1939. V. 44. P. 411.
5. Костюк М. Г. и др. // Изв. РАН. Физ. секция. 2011. Т. 75. С. 548.

Получено 5 марта 2012 г.