УДК 537.591, 519.2

ПОИСК ВЫДЕЛЕННЫХ НАПРАВЛЕНИЙ ПРИХОДА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЕЙ НА УСТАНОВКЕ ШАЛ МГУ

Н. Н. Калмыков, Г. В. Куликов, Алексей А. Силаев, А. А. Силаев, В. П. Сулаков

(*НИИЯФ; кафедра физики космоса*)

Существуют указания на наличие возможной кластеризации в направлениях прихода широких атмосферных ливней (ШАЛ). Для исследования этой проблемы разработана программа анализа направлений прихода ШАЛ, проанализирован банк данных установки ШАЛ МГУ за период 1982–1989 гг. Получены распределения в экваториальных координатах для космических лучей с энергией $E \geqslant 2 \cdot 10^{15}$ эВ с углом прихода $< 40°$. Однородность полученных распределений проверена с использованием различных статистических критериев.

Введение

Анализ направлений прихода ШАЛ позволяет исследовать общую анизотропию космических лучей (КЛ), а также локальную, мелкомасштабную анизотропию, что существенно как в связи с вопросами распространения КЛ, так и для проблем распределения источников КЛ. Так, в работе [1], выполненной по данным якутской установки ШАЛ, были приведены аргументы в пользу того, что существует мелкомасштабная анизотропия и наблюдается тенденция к кластеризации направлений ливней с энергиями $E_0 > 4 \cdot 10^{17}$ эВ и зенитными углами $\theta < 45°$ вокруг направлений на квазары с различными значениями красного смещения. Такая кластеризация возможна лишь при серьезном допущении, что поток КЛ в какой-то мере состоит из нейтральных частиц [2], не отклоняющихся магнитными полями.

В настоящей работе предпринята попытка обнаружить неравномерность в распределении направлений приходов ШАЛ, зарегистрированных на установке ШАЛ МГУ [3] с энергиями $E_0 > 2 \cdot 10^{15}$ эВ. Ранее подобный анализ уже проводился для данных, зарегистрированных за 1987–1989 гг. [4]. В этой работе были использованы данные, полученные на установке за 1982–1989 гг., что существенно (в 2.7 раза) увеличило статистику.

Установка ШАЛ МГУ работала с перерывами. Производились суточные отключения в 8 ч 30 мин по московскому времени на интервалы в несколько часов. Влияние суточных отключений на число зарегистрированных ливней отображено на рис. 1. Регулярные суточные отключения мало влияют на распределение интенсивности ШАЛ по звездному времени при условии работы установки в таком режиме в течение года. Это обусловлено тем, что звездные сутки короче земных примерно на 4 мин и момент выключения установки по звездному времени постоянно смещается, «пробегая» сутки за год работы в таком режиме. Таким образом, остается лишь небольшое влияние на распределение интенсивности по звездному времени, связанное с тем, что установка не всегда четко включалась в одно и то же время рис. 2.

Значения зенитного угла отбирались в пределах от 3 до 40°. Классификация ливней осуществлялась по числу электронов N_e, причем ливни с различными значениями θ приводились к вертикали согласно соотношению

$$N_e = N_e(\theta) \exp\left(\frac{1020}{200}\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)\right), \qquad (1)$$

причем $N_e = 2 \cdot 10^5$ примерно соответствует частицам с энергией $2 \cdot 10^{15}$ эВ. Из 875 585 ливней, имеющихся в базе данных, критериям отбора удовлетворяют 256 593 ливня.

Результаты и их обсуждение

В базе данных ШАЛ МГУ записаны порядковый номер ливня, дата, время и результаты обработки данных с детекторов: координаты, параметр возраста, полное число частиц и направление прихода — зенитный угол θ, азимутальный угол φ. Направления прихода ливней были пересчитаны в экваториальные координаты (прямое восхождение α и склонение δ). Выборка (группировка) ливней производилась с шагом 3° по α и δ, что примерно соответствует угловым размерам кластеров в [1]. Вид распределения определяется геометрией установки ШАЛ и может быть приближенно описан функцией

$$S(\delta_i) = \left(1 - \frac{4(n/2 - i)^2}{n^2}\right)^{1/2} \frac{1}{\pi \cdot \cos\delta_i}, \qquad (2)$$

где $S(\delta_i)$ — часть площади (сегмент), просматриваемая установкой в направлении δ_i; n — число сегментов, $i = 0, \ldots, n$.

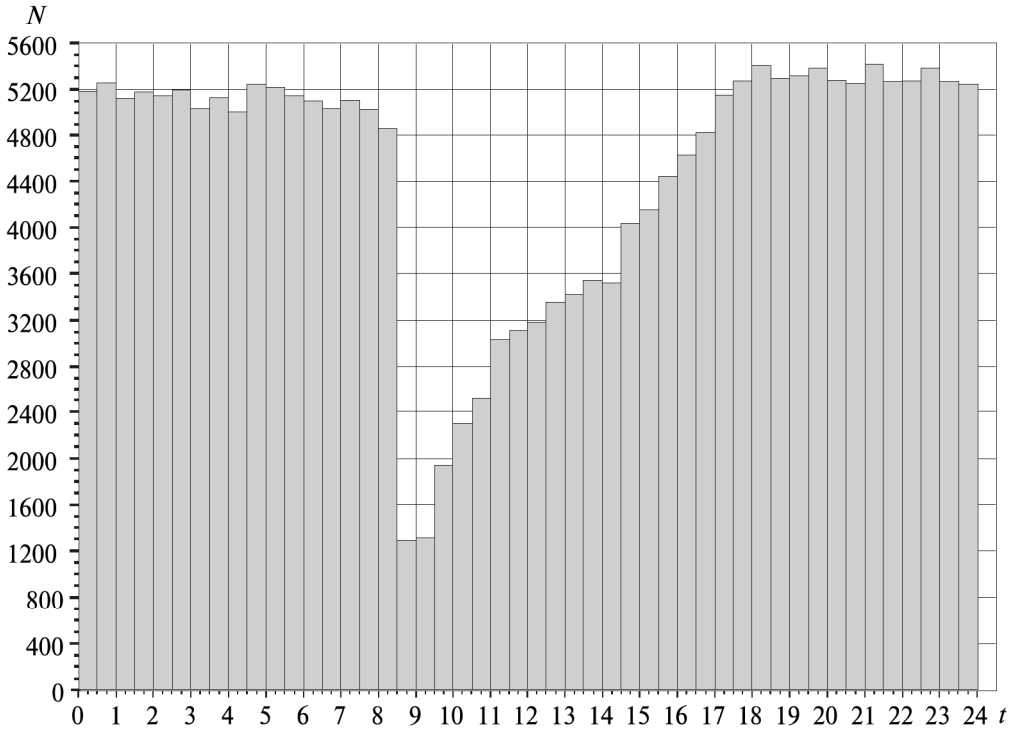

Рис. 1. Распределение числа зарегистрированных ШАЛ N по местному (московскому) времени t

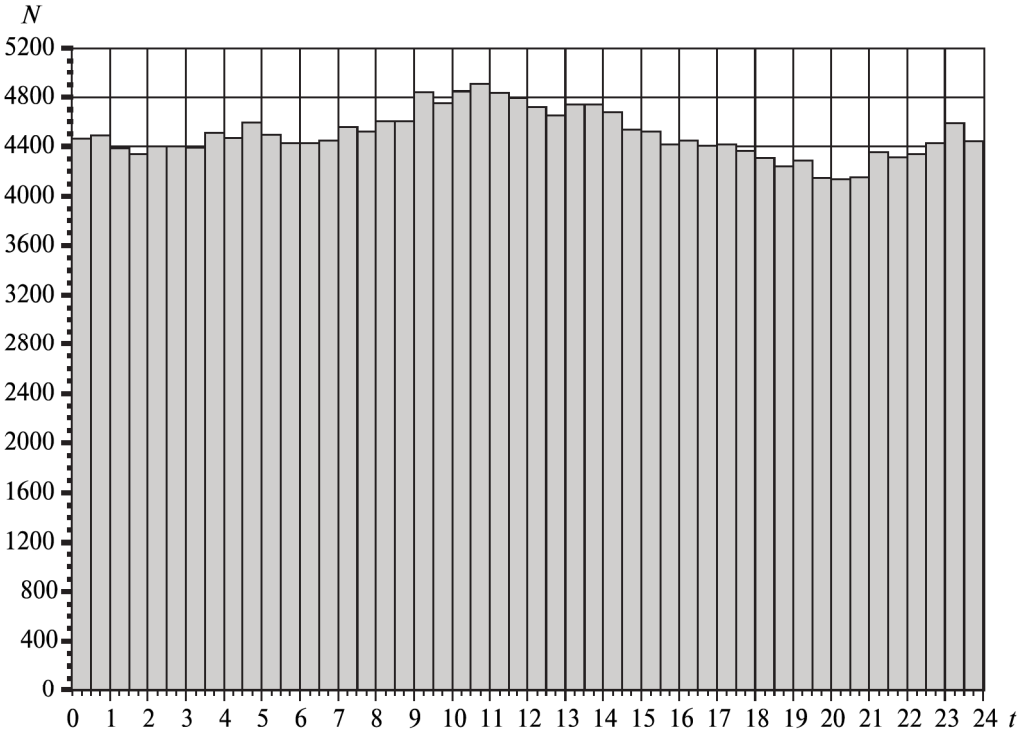

Рис. 2. Распределение числа зарегистрированных ШАЛ N по звездному времени t

Время экспозиции установки для различных углов δ разное. Число событий на «краях» распределения много меньше, чем в «центре» и ячейки для различных интервалов δ не могут быть сравнены непосредственно. Поэтому анализировалось двумерное распределение в координатах α–δ, представленное на рис. 3 α изменяется от 0 до 360°, весь диапазон разделен на 120 интервалов по 3°, δ взято от 23 до 83°, диапазон разделен на 20 интервалов также по 3° (симметрично относительно максимума распределения при $\delta = 53°$). Интервалы 53–56° и 56–59°, соответствующие вертикальным ШАЛ, не рассматривались, поскольку для вертикальных ливней азимутальный угол определяется с большой ошибкой.

Для каждого фиксированного интервала δ со-

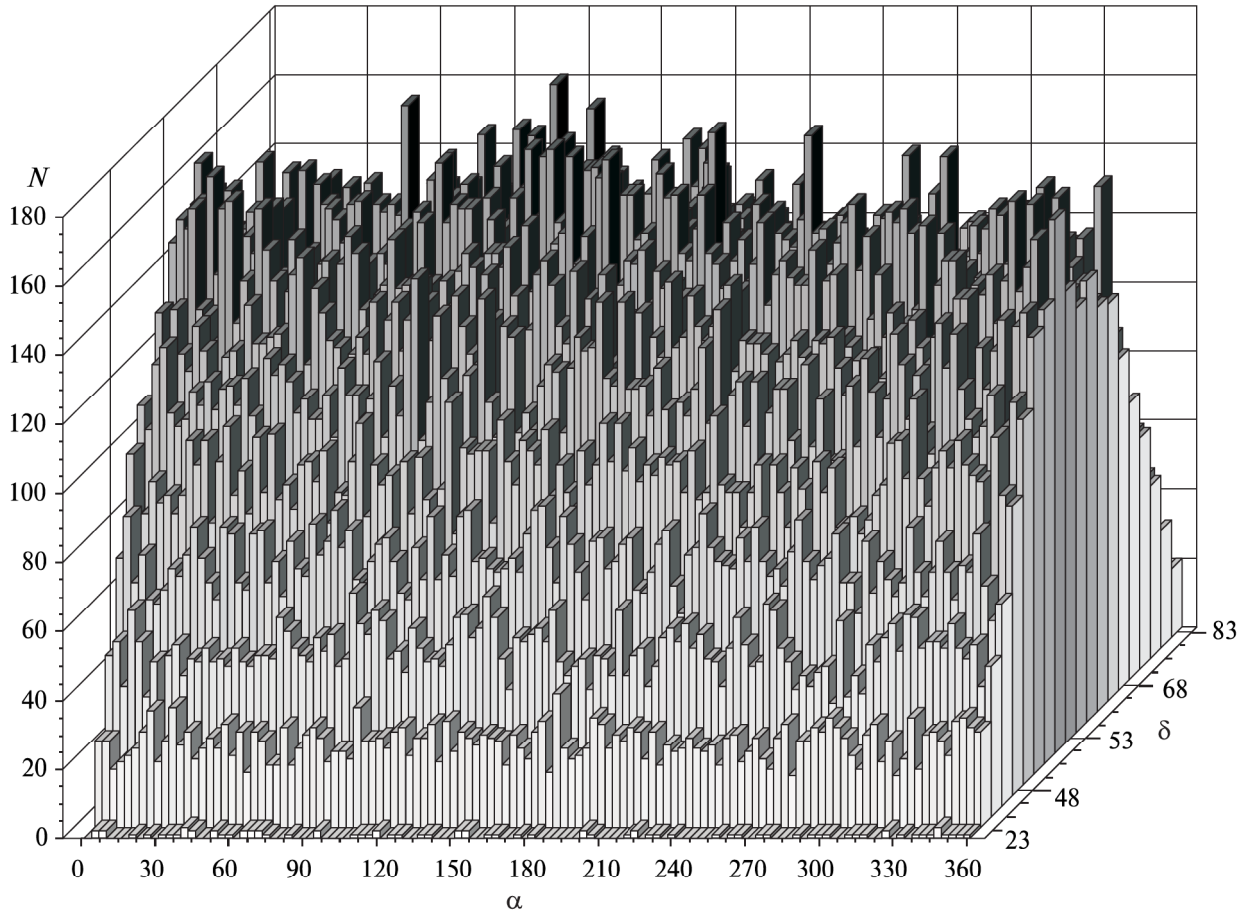

Рис. 3. Распределение числа зарегистрированных ШАЛ N по прямому восхождению α и склонению δ

ответствующее ему распределение по α исследовалось на равномерность по критериям Колмогорова и ω^2 [5, 6]. Как правило, распределения можно считать равномерными. Для трех интервалов по δ, однако, вероятности того, что распределения по α равномерны, оказались меньше 1%. Эти интервалы, представленные в таблице, были подвергнуты дальнейшему анализу.

Результаты исследований распределений по α

Δ	n	Dn	$P(>Dn)$, %	ω^2	$P(>\omega^2)$, %
41–44	15110	1.7294	0.5	0.7987	0.7
50–53	17850	1.7084	0.6	0.7851	0.8
59–62	16116	1.9307	0.12	0.9613	0.3

Приведены границы интервалов по склонению δ, число ШАЛ в данном интервале n, статистики критериев Колмогорова Dn и критерия ω^2, а также соответствующие вероятности равномерности распределений $P(>Dn)$ и $P(>\omega^2)$.

Для интервала δ 41–44° максимальное число ливней наблюдается в интервале α 162–165° (рис. 4). В предположении, что исходное распределение равномерно, проверялось значение вероятности отклонения от среднего этого интервала α 162–165° для биномиального распределения. Полученное значение вероятности такого отклонения 4%. Для интервала δ 50–53° максимальное число ливней наблюдается в интервале α 150–153°. Вероятность отклонения от среднего для биномиального распределения в нем 0.7%. Для интервала 59–62° максимальное число ливней наблюдается в интервале α 195–198°. Вероятность отклонения от среднего для биномиального распределения в нем 0.54%. В ливнях из рассмотренных интервалов не обнаружено особенностей — как среднее число электронов, так и средний возраст не отличаются значимо от значений в других интервалах выборки. Хотя вероятности 4, 0.7 и 0.54% малы, по нашему мнению, этого не достаточно, чтобы делать заключение о том, что данные направления действительно выделены.

Заключение

Проведенный анализ распределений направлений приходов ливней на установке ШАЛ МГУ за 1982–1989 гг. показал, что для частиц с энергией больше $2 \cdot 10^{15}$ эВ эти распределения можно считать равномерными. Таким образом, рассмотренные данные установки ШАЛ МГУ не дают достаточных оснований для заключения о существовании выделенных направлений прихода ШАЛ.

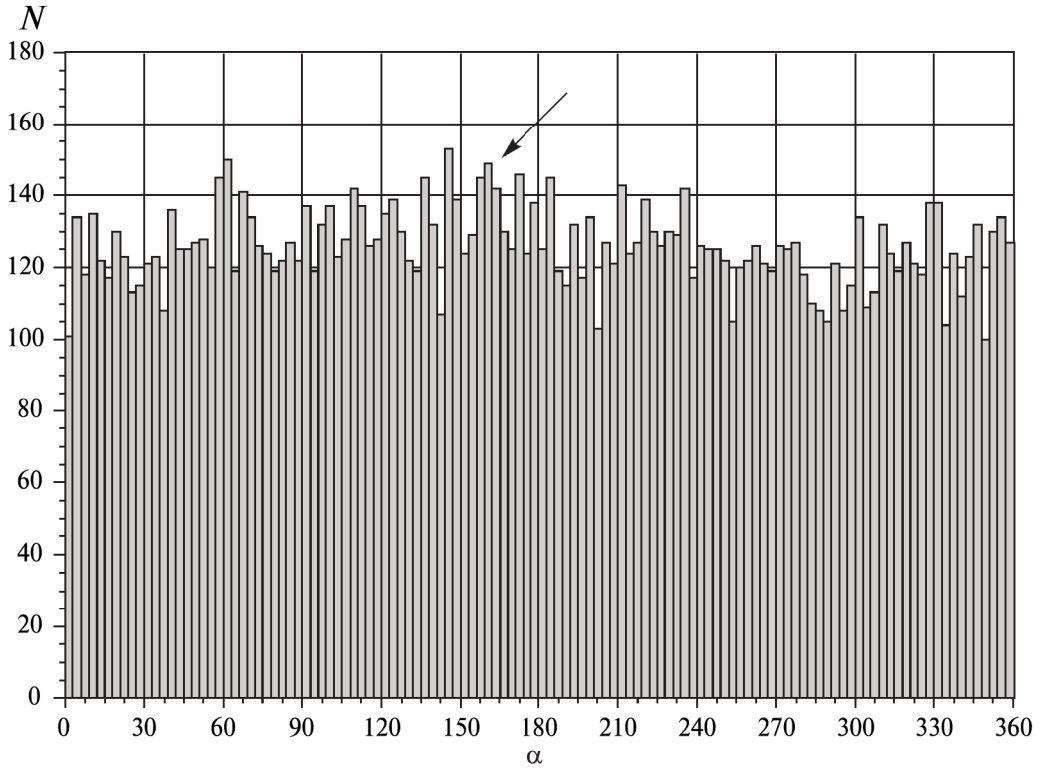

Рис. 4. Распределение числа зарегистрированных ШАЛ N по прямому восхождению α для интервала δ 41–44°

Авторы признательны М. Ю. Зотову и Е. Б. Постникову за полезные обсуждения.

Литература

1. *Глушков А.В., Правдин М.И.* // ЖЭТФ. 2001. **119**, № 6. С. 1029.
2. *Глушков А.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2002. **66**, № 11. С. 1599.
3. *Вернов С.Н., Христиансен Г.Б., Атрашкевич В.Б.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. **44**, № 3. С. 537.
4. *Калмыков Н.Н., Куликов Г.В., Алексей А. Силаев* и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. **69**, № 3. С. 350.
5. *Лагутин М.Б.* Наглядная математическая статистика. М., 2003.
6. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики. М., 1983.

Поступила в редакцию
26.03.07