

## АЗИМУТАЛЬНАЯ МОДУЛЯЦИЯ ЧАСТОТЫ СОБЫТИЙ ШИРОКИХ АТМОСФЕРНЫХ ЛИВНЕЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ГЕОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

А.А.Иванов <sup>1)</sup>, В.П.Егорова, В.А.Колосов, А.Д.Красильников, М.И.Правдин,  
И.Е.Слепцов

Институт космофизических исследований и астрономии СО РАН  
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 29 декабря 1998 г.

По данным многолетних наблюдений на Якутской установке измерено влияние магнитного поля Земли на распределение числа широких атмосферных ливней по азимутальному углу. Равномерное азимутальное распределение частоты этих ливней отвергается на уровне значимости  $10^{-14}$ . Амплитуда первой гармоники распределения зависит от зенитного угла как  $A_1 \approx 0.2 \sin^2 \theta$  и практически не зависит от энергии первичных частиц, а фаза совпадает с магнитным меридианом. Исходя из величины измеренного эффекта, определен поправочный множитель для плотности частиц, зависящий от геомагнитного параметра ливня.

PACS: 13.85.Tr, 96.40.Pq

Траектории заряженных частиц широкого атмосферного ливня (ШАЛ), развивающегося в атмосфере от частиц первичного космического излучения, искривляются в магнитном поле Земли. Это приводит к уширению пространственного распределения частиц в плоскости, перпендикулярной к оси ливня, вдоль направления действия силы Лоренца. Наблюдение этого эффекта на Якутской установке ШАЛ в сильно-наклонных ливнях с зенитными углами  $\theta > 60^\circ$  [1] показало наличие выраженной асимметрии функции пространственного распределения (ФПР) частиц из-за отклонения мюонов, пропорциональной геомагнитному параметру ливня, определяемому углом между осью ливня и вектором поля:  $g = \sin \chi / \cos^2 \theta$ , где  $\chi = \arccos(\cos \theta \cos \theta_H + \sin \theta \sin \theta_H \cos(\alpha + 20))$ ,  $\theta_H = 14^\circ$ ,  $\alpha$  – азимутальный угол. Эффект влияния геомагнитного поля на пространственное распределение частиц был подтвержден наблюдениями для ливней с зенитными углами  $20^\circ < \theta < 60^\circ$  [2]. Результаты расчетов ожидаемого эффекта в модели КГС были применены для анализа ливня наибольшей энергии  $E_0 > 10^{20}$  эВ, зарегистрированного на Якутской установке ШАЛ [3], а в работах [4] показано, что ливни от гамма-квантов сверхвысоких энергий должны проявлять северо – южную асимметрию. Но последний эффект имеет порог по энергии первичных гамма-квантов  $E_\gamma > 3 \cdot 10^{19}$  эВ.

В данной работе обращено внимание на то, что поскольку асимметрия ФПР зависит от взаимного расположения вектора поля и скорости частиц, то, отбирая ливни равной энергии с одинаковыми зенитными углами, мы должны получить модуляцию частоты ШАЛ по азимутальному углу из-за разной величины уширения ФПР, приводящей к изменению наблюдаемой энергии первичных частиц и связанной с ней интенсивности потока первичного космического излучения.

На рис.1 показано распределение числа событий ШАЛ с энергией выше  $5 \cdot 10^{16}$  эВ, измеренное на Якутской установке за период времени 1974 – 1995 гг., в интервалах

<sup>1)</sup> e-mail: a.a.ivanov@sci.yakutia.ru

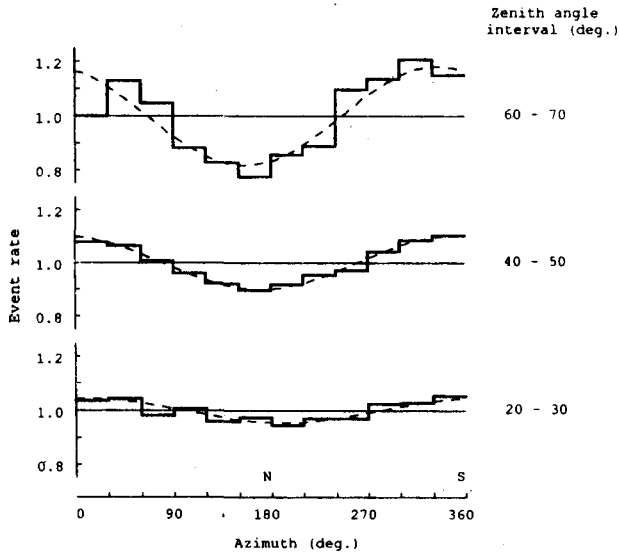


Рис.1. Нормированные числа событий ШАЛ в интервалах зенитного угла (обозначены справа) как функции азимутального угла для ливней с  $E_0 > 5 \cdot 10^{16}$  эВ. Штриховой линией показаны функции  $1 + A_1 \cos(\alpha - \alpha_1)$ ; величина амплитуды и фазы первой гармоники в зависимости от  $\theta$  и  $E_0$  приведены на рис.2, 3

зенитного угла 20 – 30°, 40 – 50°, 60 – 70°. Количество событий ШАЛ в интервалах  $\theta$ , использованное в анализе, приведено в табл.1.

Таблица 1

Числа событий ШАЛ ( $n$ ) в интервалах  $\theta$

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$\theta$ , град	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 70	70-80
$n$	25924	69114	83226	66649	37575	16384	6609	1749

Зависимость амплитуды и фазы первых трех гармоник распределения от зенитного угла и энергии первичной частицы ШАЛ показана на рис.2, 3. Амплитуды 2 и 3 гармоник соответствуют ожидаемой величине для равномерного распределения азимутальных углов, показанной штриховой линией, для измеренного количества ливней в каждом интервале. Пунктирными линиями обозначен коридор ошибок для ожидаемых амплитуд. Амплитуда первой гармоники существенно отличается от нуля в интервалах зенитных углов № 3-7 из табл.1. В этих интервалах можно отвергнуть равномерное распределение по азимутальному углу с вероятностью погрешности менее  $10^{-14}$ , основываясь на вероятности для равномерного распределения иметь амплитуду первой гармоники больше  $A_1$ :  $P(> A_1) = \exp(-n \cdot A_1^2/4)$ . Фаза первой гармоники совпадает с магнитным меридианом в Якутске. Малая величина наклона вектора магнитного поля в районе установки ( $\theta_H = 14^\circ$ ) приводит к преобладанию первой гармоники распределения азимутальных углов для  $20 < \theta < 70^\circ$ . Для других установок картина может быть иной. Например, для Тибетской установки, где направление поля имеет наклон  $45^\circ$  к вертикали, должны быть выражены и первая и вторая гармоники для углов  $\theta > 50^\circ$ , а для установки Чакалтайя ( $\theta_H = 88^\circ$ ) будет преобладать вторая гармоника.

Чтобы выяснить влияние геометрии установки на величину модуляции, было построено распределение по азимутальному углу частоты событий в выборке ливней, зарегистрированных детекторами, расположенными в круге радиусом 1.5 км

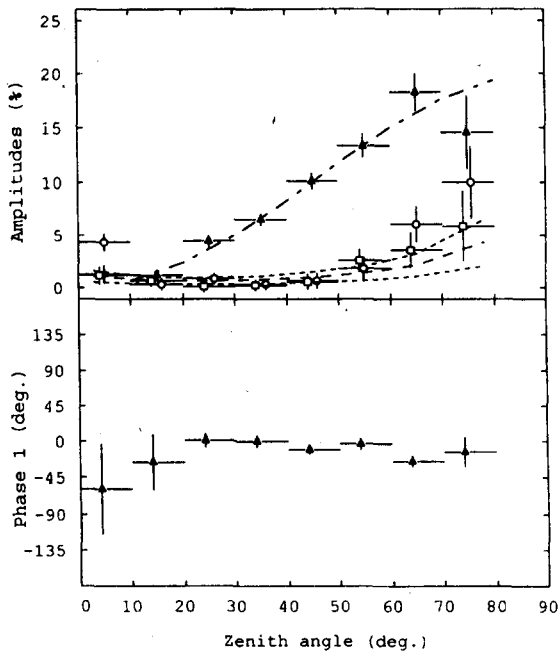


Рис.2. Амплитуды первых трех гармоник и фаза первой гармоники в зависимости от зенитного угла. Вертикальными черточками показаны статистические ошибки, горизонтальными – угловые интервалы. Обозначения:  $\blacktriangle$  – первая,  $\circ$  – вторая,  $\square$  – третья гармоники. Штрих-пунктирной линией нанесена зависимость  $0.2 \sin^2 \theta$ . Штриховой кривой показаны ожидаемые амплитуды гармоник для равномерного распределения по азимуту; разброс ожидаемых амплитуд ( $1\sigma$ ) обозначен пунктирными кривыми

от центра установки (азимутально-симметричная часть установки). Оказалось, что амплитуда и фаза первой гармоники в выборке отличаются от соответствующих величин для исходного распределения на величины, заведомо меньшие статистических ошибок. Поэтому мы приняли величину азимутальной модуляции не зависящей от геометрии установки.

Обработка ливней на Якутской установке производится подбором параметров аксиально-симметричной функции, аппроксимирующей плотности заряженных частиц в детекторах. Плотность частиц на расстоянии 300 м от оси ливня,  $\rho_{300}$ , найденная по функции, пересчитывается к энергии первичной частицы ШАЛ. Рассмотрим, как меняется  $\rho_{300}$  из-за геомагнитного рассеяния частиц для ФПР вида  $\rho_r = cr^{-\eta}$ , где  $r$  – расстояние от оси ливня в плоскости, перпендикулярной оси ШАЛ. Функции плотности положительных и отрицательных частиц смещаются относительно оси ливня на некоторое расстояние:

$$\rho_r^g = c [ ((r \cos \varphi + d)^2 + r^2 \sin^2 \varphi)^{-\eta/2} + ((r \cos \varphi - d)^2 + r^2 \sin^2 \varphi)^{-\eta/2} ] / 2,$$

где  $d$  – расстояние смещения зарядов;  $\varphi \in (0^\circ \div 360^\circ)$ .

Для  $d \ll r$  получим, усредняя по окружности  $r = 300$  м,  $\rho_{300}^g \approx \rho_{300}^{g=0} (1 + (\eta \cdot d_{300}/2)^2)$ . Здесь  $\eta \approx 3$  [1];  $d_{300} = d/300$  м. В среднем, плотности частиц в детекторах увеличиваются по сравнению с ожидаемой плотностью в случае выключенного геомагнитного поля (то есть  $g = 0$ ). Для ливней, приходящих с севера, наблюдаемые плотности частиц в детекторах выше, чем в "южных" ливнях равной энергии с одинаковым зенитным углом.

Когда мы отбираем ливни с одинаковыми плотностями  $\rho_{300}$ , энергия первичных частиц для ливней с севера меньше, что приводит к уменьшению соответствующей частоты событий ШАЛ, как это видно из рис.1, так как число регист-

рируемых ливней на Якутской установке падает с уменьшением энергии в области  $10^{16} < E_0 < 10^{18}$  эВ. Амплитуда 1 гармоника определяется относительной величиной изменения плотности  $\rho_{300}$ , измеренной для южных и северных ливней:

$$2A_1 = \Delta J/J = \gamma(\Delta\rho_{300}/\rho_{300}),$$

где  $J$  – частота событий ШАЛ;  $\gamma = \ln J/\ln \rho_{300}$ . Зенитно-угловая зависимость амплитуды  $A_1$  хорошо описывается  $0.2 \sin^2 \theta$  (рис.2), но изменение  $\gamma$  с ростом зенитного угла приводит к тому, что  $\Delta\rho_{300}/\rho_{300}$  не описывается такой же простой зависимостью. Известно, что граничный зенитный угол, разделяющий ливни с преобладанием электронно-фотонной и мюонной компонент ливня на уровне моря для  $r = 300$  м, около  $50^\circ$  [5]. Рис.2 показывает, что геомагнитный эффект в ШАЛ наблюдается в обеих этих областях.

Асимметрия ФПР из-за влияния геомагнитного поля определяется расстоянием смещения зарядов. Если обозначить через  $\xi$  отношение наибольшего к наименьшему расстоянию, соответствующему фиксированной плотности частиц  $\rho_{300}^{g=0}$ , то получим:

$$\xi \approx 1 + \frac{\eta + 2}{2} d_{300}^2 \approx 1 + \Delta\rho_{300}/\rho_{300}$$

для  $\eta = 3$ . Поэтому, измерения "овальности" ФПР можно использовать для оценки изменения  $\rho_{300}$  из-за влияния геомагнитного поля. В работе [1] показано, что коэффициент линейной пропорциональности между степенью асимметрии ФПР и геомагнитным параметром сильно-наклонных ливней равен  $d\xi/dg = 0.1 \pm 0.04$ . Используя это значение во всей области зенитных углов, получим поправочные множители к плотности  $\rho_{300}$ , зависящие от зенитного угла  $\theta$  (см. табл.2).

Таблица 2

Поправочные множители к измеренной плотности  $\rho_{300}$

	$\theta$ , град.	20	30	40	50	60
$\rho_{300}^{g=0}/\rho_{300}^g$	северные ливни	0.94	0.92	0.88	0.82	0.72
	южные ливни	0.99	0.96	0.93	0.87	0.78

Как видно из рис.3, амплитуда первой гармоника почти не зависит от  $E_0$  в области энергий, где имеется достаточное число событий, поэтому зависимостью множителей от энергии можно пренебречь.

Пересчет от  $\rho_{300}$  к  $E_0$  на Якутской установке производится с использованием методики, связывающей  $\rho_{300}$  в наклонных и вертикальных ливнях через линии равной интенсивности в спектрах под разными зенитными углами. Поскольку эти интенсивности соответствуют одной и той же энергии первичной частицы ШАЛ, а в вертикальных ливнях геомагнитными поправками можно пренебречь, то при оценке  $E_0$  корректно учитывается ее зенитно-угловая зависимость, но изменение энергии с азимутом усредняется. Это приводит к небольшой систематической ошибке в оценке энергии первичной частицы, пропорциональной  $A_1$ . Пробег поглощения  $\rho_{300}$ , полученный по линиям равной интенсивности, завышается на  $\approx 10\%$  относительно значения для  $g = 0$ .

Показатель спектра ШАЛ по  $\rho_{300}$  ( $\rho_{600}$  для ливней, зарегистрированных "большим мастером" с расстоянием между детекторами 1 км) увеличивается при внесении

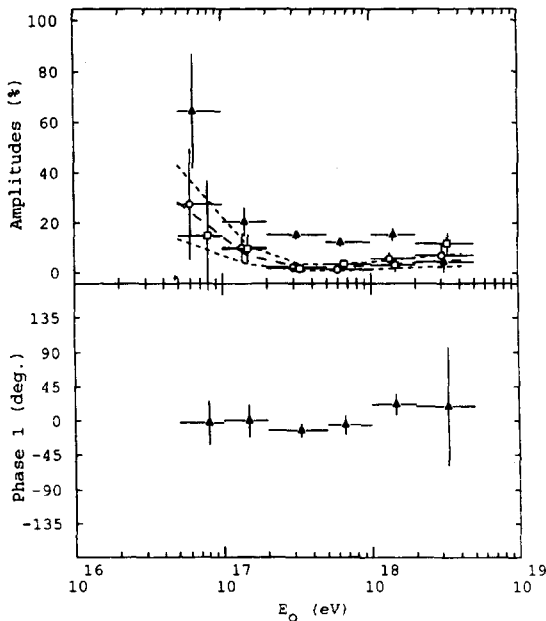


Рис.3. Зависимость амплитуд первых трех гармоник и фазы первой гармоники от энергии первичной частицы ШАЛ. Обозначения такие же, как на рис.2

геомагнитных поправок из-за того, что с ростом  $\rho_{300}$  возрастает доля наклонных ливней, регистрируемых установкой. Так, для ливней с зенитными углами меньше  $60^\circ$  и энергиями  $10^{18}$ ,  $3 \cdot 10^{18}$  и  $10^{19}$  эВ изменение показателя степенного спектра ШАЛ составляет 0.01, 0.07 и 0.24, а относительное изменение интенсивности  $\Delta J/J$  равно 0.16, 0.19 и 0.28, соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России (программа поддержки уникальных установок) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант #98-07-90315).

1. М.Н.Дьяконов, Т.А.Егоров, Н.Н.Ефимов и др., *Космическое излучение предельно высокой энергии*, Н.: Наука, 1991.
2. Т.А.Егоров, В.Н.Афанасьев, М.Н.Дьяконов et al., *Proc. Int. Workshop on Techniques for the Study of ENECR*, Tokyo, 1993, p.35.
3. Е.Е.Антонов, А.В.Глушков, Л.Г.Деденко и др., *Письма в ЖЭТФ* **68**, 177 (1998).
4. S.Karakula and W.Bednarek, *24th Int. Conf. on Cosm. Rays, Rome 1*, 1995, p.266; K.Kasahara, *Proc. Int. Symp. on ENECR: Astrophysics and Future Observatories*, Tokyo, 1996, p.221.
5. А.А.Иванов, *ЯФ* **51**, 1820 (1990).