

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
 ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 66, ВЫПУСК 5
 10 СЕНТЯБРЯ, 1997

Письма в ЖЭТФ, том 66, вып.5, стр.289 - 292

© 1997г. 10 сентября

Поиск анизотропии космических лучей сверхвысоких энергий

А.А.Михайлов¹⁾, М.И.Правдин

*Институт космофизических исследований и астрономии
 677891 Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 18 июля 1997 г.

Показано наличие статистически значимой анизотропии в направлениях прихода космических лучей при $\sim 1 \cdot 10^{17}$ эВ и при $4 \cdot 10^{18}$ эВ.

PACS: 98.70.Sa

В данной работе рассмотрены направления прихода широких атмосферных ливней (ШАЛ), образуемых космическими лучами сверхвысоких энергий, зарегистрированных на Якутской установке ШАЛ [1]. Установка за период времени 1974–1995 гг. зарегистрировала более 500000 ливней с энергиями $3 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{20}$ эВ. Для более точной оценки параметров ШАЛ рассматриваемые для анализа события выбраны по следующим критериям: зенитный угол прихода $\theta < 60^\circ$, число сработавших мастерных станций не менее трех при плотности частиц ρ на каждый детектор с 1974 г. более 2 частиц/м², с 1982 г. - 0.8 частиц/м². Ливни с энергиями выше 10^{18} эВ анализированы с 1974 г. с ноября по май месяцы (как наиболее равномерные месяцы работы установки), до 10^{18} эВ с 1982 г. в те же месяцы. После такого отбора при энергиях выше $3 \cdot 10^{16}$ эВ осталось около 230000 ливней. Точность определения энергии первичной частицы, порождающей ШАЛ, $\sim 30\%$, угла прихода $\sim 3 - 7^\circ$. Энергия ливней определена через плотность частиц ρ на расстоянии 600 м от оси ливня с учетом температуры T и давления P окружающего воздуха ($E = 4.8 \cdot 10^{17} \rho_{600}(\theta, P, T)$) эВ [2].

Всю наблюдаемую область энергий разделили на 10 равномерных интервалов и по направлениям прихода ливней по прямому восхождению определили гармоника с учетом экспозиции установки. Экспозиция установки определена с точностью до одной минуты по прямому восхождению и ее амплитуда

¹⁾ e-mail: mikhailov@sci.yakutia.ru

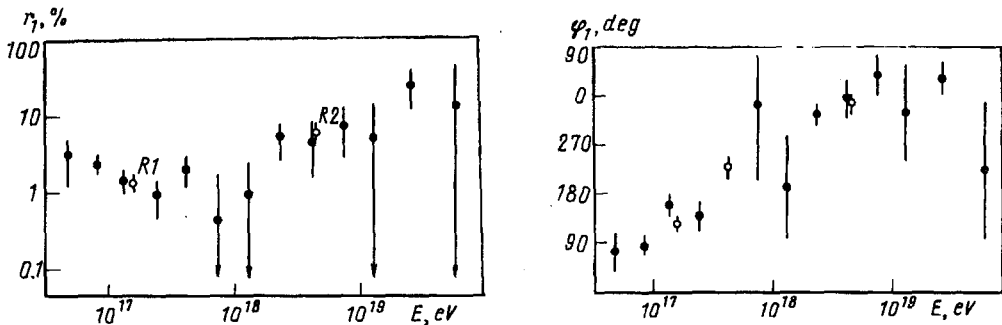


Рис.1. Результаты гармонического анализа. $R1, R2$ – статистически значимые амплитуды в областях энергий $E1$ от $3 \cdot 10^{16}$ до $3 \cdot 10^{17}$ эВ и $E2$ от $2 \cdot 10^{18}$ до $4 \cdot 10^{19}$ эВ

составляет $\sim 1.3\%$. Результаты гармонического анализа, амплитуды и фазы 1-й гармоники показаны на рис.1. Как видно из рисунка, не обнаружено статистически значимой амплитуды, но фазы в некоторых соседних интервалах в пределах ошибок коррелируют друг с другом: при $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ и $2 \cdot 10^{18} - 4 \cdot 10^{19}$ эВ.

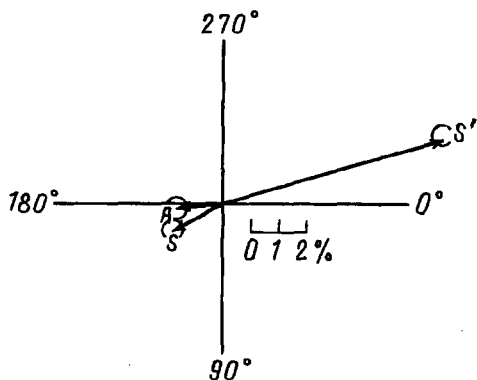


Рис.2. Первые гармоники по солнечно-суточным (S'), звездно-суточным (S) и антивзвездно-суточным (A) вариациям. Кружки показывают ошибки гармоник

Если объединить первые четыре энергетических интервала, то для интервала $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ получим статистически значимую амплитуду и фазу 1-й гармоники: $r_1 = 1.35 \pm 0.36\%$, $\varphi_1 = 123^\circ$, $n = 152280$ (число событий). Вероятность случайности равна $P \sim 0.0009$. В дальнейшем область энергий $3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{17}$ эВ обозначим буквой $E1$ и полученную гармонику – вектором $R1(1.3; 123^\circ)$.

При $2 \cdot 10^{18} - 4 \cdot 10^{19}$ эВ фазы в пяти независимых энергетических интервалах расположены внутри 73° по прямому восхождению: $326^\circ - 37^\circ$ и направлены в сторону галактической плоскости. Вероятность случайности равна $P \leq 0.001$. Направления фаз в сторону галактической плоскости скорее всего указывают, что космические лучи до $4 \cdot 10^{19}$ эВ являются галактическими, что подтверждает ранние наши результаты (см., например, [3]). Если эти энергетические интервалы объединить, то получим статически значимую амплитуду и фазу 1-й гармоники: $r_1 = 6.4 \pm 1.8\%$, $\varphi_1 = 347^\circ$, $n = 5683$, вероятность случайности

– $P \sim 0.0027$. В дальнейшем область энергий $2 \cdot 10^{18} - 4 \cdot 10^{19}$ эВ обозначим буквой $E2$ и полученную гармонику – вектором $R2(6.4; 347^\circ)$.

Для того чтобы убедиться, что обнаруженная анизотропия не является случайностью, мы провели дополнительные анализы. На распределение числа ливней по направлениям прихода могут влиять суточные и сезонные изменения температуры T и давления P окружающего воздуха. Это влияние может быть существенным для малых областей энергий, и вначале рассмотрим направления прихода ливней в области энергий $E1$.

1. Если увеличить критерии порога отбора событий по плотности ρ на мастерных станциях, то получим следующие амплитуды r_1 и фазы φ_1 1-й гармоники: а) при $\rho > 1.2$ частиц/м² – $r_1 = 1.5 \pm 0.5\%$, $\varphi_1 = 133^\circ$, $n = 72586$; б) при $\rho > 2$ частиц/м² – $r_1 = 0.6 \pm 0.1\%$, $\varphi_1 = 157^\circ$, $n = 19534$. Как показывает анализ, при изменении порога регистрации фаза анизотропии осталась почти прежней: $\varphi_1 = 123^\circ$.

На рис.2 показаны распределения векторов 1-й гармоники по солнечно-суточным (S'), звездно-суточным (S) и антизвездно-суточным (A) вариациям. При предположении, что ложная звездная анизотропия обусловлена постоянными по фазе солнечно-суточными вариациями, мы оценили истинную звездную анизотропию по методу [4]. Такая оценка приводит к вектору $r_1 = 0.4 \pm 0.6\%$, $\varphi_1 = 151^\circ$. Данный вектор, определенный только по времени прихода ливней, не противоречит основному вектору $R1(1.3; 123^\circ)$, полученному с учетом индивидуальных направлений прихода ливней.

Дальнейший анализ проведем для обеих областей энергий $E1$ и $E2$.

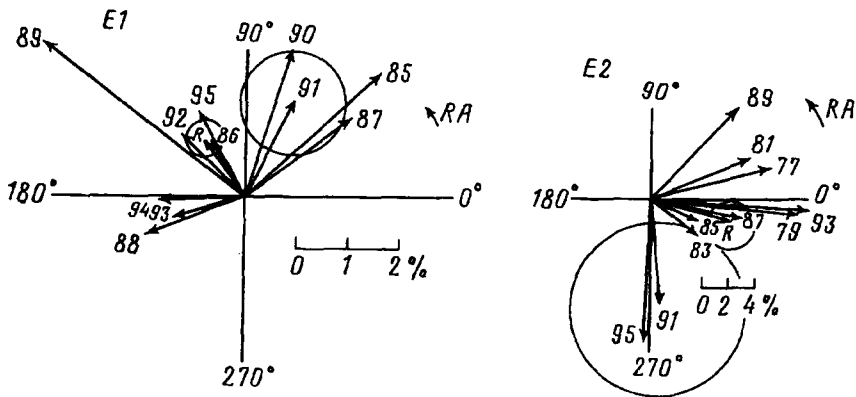


Рис.3. Первые гармоники по коротким периодам наблюдения в областях энергий $E1$ и $E2$. Цифры – годы конца периодов наблюдения

На рис.3 показаны амплитуды и фазы 1-й гармоники направлений прихода ливней по прямому восхождению по более коротким периодам наблюдения (в скобках даны годы конца периодов наблюдения, начинающихся с 1982 г. для области $E1$ и с 1974 г. для области $E2$). Как видно из рис.3, в области энергий $E1$ амплитуды и фазы находятся в пределах их ошибок от результирующего вектора $R1(1.3; 123^\circ)$ и в одной полуплоскости с ним. Вероятность того, что все векторы расположены в одной полуплоскости, $P = 5 \cdot 10^{-4}$. В

области энергий $E2$ также наблюдается подобная картина. Вероятность того, что все векторы расположены в одной полуплоскости, равна $P = 1 \cdot 10^{-3}$.

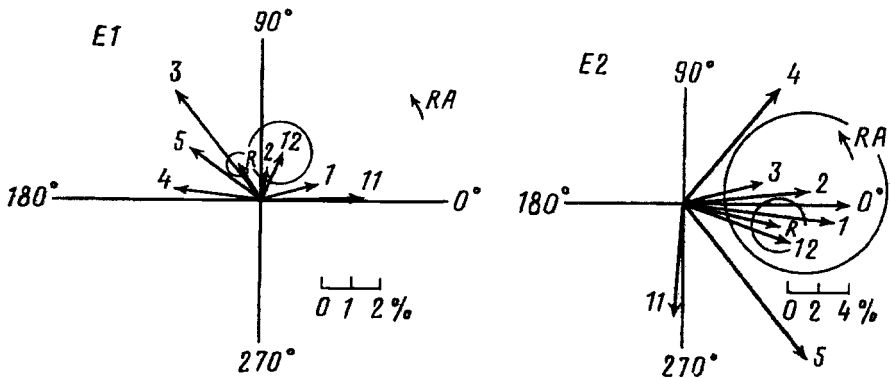


Рис.4. Первые гармоники по отдельным месяцам наблюдения в областях энергий $E1$ и $E2$ (номера месяцев показаны цифрами), кружки – ошибки гармоник

На рис.4 показаны амплитуды и фазы 1-й гармоники направлений прихода ливней по отдельным месяцам наблюдения за весь период (порядковые номера месяцев даны в скобках). Как видно из рисунков, в обеих областях энергий $E1$ и $E2$ все векторы также находятся от основных векторов $R1(1.3; 123^\circ)$ и $R2(6.4; 347^\circ)$ в пределах их ошибок и в одной полуплоскости с ними. Вероятности случайного в случаях $E1$ и $E2$ равны $8 \cdot 10^{-3}$.

Анализ данных по отдельным годам и месяцам наблюдения подтверждает первоначально полученные векторы $R1(1.3; 123^\circ)$ и $R2(6.4; 347^\circ)$.

Конечно, трудно сказать, что полностью учли влияние температуры и давления на распределение частиц. Но необходимо учесть, что векторы $R1(1.3; 123^\circ)$ и $R2(6.4; 347^\circ)$ находятся в противофазе и любой фактор, уменьшающий значимость одного вектора, может автоматически привести к увеличению значимости другого вектора.

В заключение можно сказать, что получена статистически значимая анизотропия с амплитудами τ_1 и фазами φ_1 при $\sim 10^{17}$ эВ – $\tau_1 = 1.35 \pm 0.36\%$, $\varphi_1 = 123^\circ$, при $\sim 4 \cdot 10^{18}$ эВ – $\tau_1 = 6.4 \pm 1.8\%$, $\varphi_1 = 347^\circ$. Будут продолжены работы по учету влияния атмосферных условий для уточнения полученной анизотропии.

1. N.N.Efremov, A.A.Mikhailov, M.I.Pravdin, and I.Ye.Sleptsov, Proc. Int. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observatories, Tokyo, 1996, p.418.
2. B.N.Afanasyev, M.N.Dyakonov, V.P.Egorova et al., Proc. Int. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observatories, Tokyo, 1996, p.32.
3. Н.Н.Ефремов, А.А.Михайлов, Письма в ЖЭТФ 54, 69 (1991).
4. F.J.Farley, J.R.Storey, Proc. Phys. Soc. A67, 996 (1954).