

АСТРОНОМИЯ, АСТРОФИЗИКА И КОСМОЛОГИЯ

Об угловом распределении широких атмосферных ливней

М. Ю. Зотов, Н. Н. Калмыков, Г. В. Куликов^a, В. П. Сулаков*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобелевича Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.**E-mail: ^a kulikov@eas.sinp.msu.ru*

Статья поступила 08.06.2009, подписана в печать 02.07.2009

На основе экспериментальных данных установки ШАЛ МГУ построены угловые распределения широких атмосферных ливней с различным числом заряженных частиц в диапазоне $2.5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^7$. Проанализированы возможные аппроксимации полученных данных различными эмпирическими функциями, встречающимися в литературе. Показано, что наилучшее приближение в смысле критерия χ^2 достигается для представления углового распределения экспоненциальной функцией.

Ключевые слова: широкие атмосферные ливни, угловое распределение.

УДК: 537.591.15. PACS: 96.50.sd.

Введение

Несмотря на то что угловое распределение широких атмосферных ливней (ШАЛ) изучается длительное время, интерес к нему не ослабевает, поскольку оно отражает процесс развития и поглощения ливня при его прохождении через атмосферу Земли.

Первые результаты по высотному ходу ливней и их угловому распределению были получены еще в середине прошлого столетия (см., напр., обзор Грейзена [1]) и относились к ливням, зарегистрированным при фиксированной плотности потока частиц. Результаты этих экспериментов для нижней трети атмосферы свидетельствовали об экспоненциальном поглощении ливней с высотой. Как правило, распределения по зенитному углу, полученные из данных по высотному ходу, приближенно описывались законом $\sim \cos^n \vartheta$ с показателем $n \approx 8.3$ для уровня моря.

В дальнейшем этот результат неоднократно подтверждался во многих работах, в которых изучались индивидуальные характеристики ливней, в том числе и на установке KASCADE, введенной в эксплуатацию в 1996 г. специально для изучения проблемы излома в спектре первичных космических лучей при энергии $3 \cdot 10^{15}$ эВ [2]. Однако сравнительно недавно были опубликованы результаты, полученные в экспериментах на Тянь-Шане (глубина в атмосфере $690 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$), согласно которым в ливнях с числом частиц более 10^7 наблюдался существенный избыток ливней при значениях $\cos \vartheta$ порядка 0.6–0.7 [3, 4]. Этот избыток интерпретировался авторами как указание на возрастание роли так называемой длиннопробежной компоненты в продольном развитии ШАЛ [4]. В связи с этим целесообразно вновь обсудить проблему высотного хода ШАЛ и их углового распределения.

1. Экспериментальные данные

В настоящей статье представлены результаты по изучению углового распределения ливней в достаточно узких интервалах по полному числу заряженных частиц N_e в широком диапазоне изменения N_e от $2.5 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^7$. Для анализа использовались экспе-

риментальные данные, полученные на установке ШАЛ МГУ за период работы с 1984 по 1990 г. Описание установки дано в [5]. Установка покрывала площадь $\sim 0.5 \text{ км}^2$ ($800 \times 600 \text{ м}$) и включала в себя 77 детекторов плотности потока заряженных частиц для определения N_e с использованием эмпирической функции пространственного распределения [6], наилучшим образом описывающей экспериментальные данные.

Направление прихода ШАЛ, характеризующее зенитным и азимутальными углами ϑ , φ соответственно, определялось с помощью системы быстродействующих сцинтилляционных счетчиков путем измерения относительного запаздывания во времени моментов срабатывания этих счетчиков, расположенных в различных местах плоскости наблюдения. Для измерений использовались 36 счетчиков с толщиной сцинтиллятора 5 см и площадью 0.5 м^2 каждый. Восемь из них размещались в центральном пункте установки, шесть — на расстоянии около 60 м от него, остальные 22 распределялись равномерно по площади установки.

Угловые характеристики каждого ливня находились в два этапа. В качестве первого приближения использовался метод наименьших квадратов в предположении плоского фронта ливня. После этого применялся метод максимального правдоподобия, который учитывал экспериментальные данные о распределении частиц по толщине ливневого диска и кривизне ливневого фронта, полученные на установке ШАЛ МГУ [7].

Точность в определении зенитного угла для основной массы ливней составляла величину порядка 3° , возрастая с увеличением угла и падая для ливней, близких к вертикальным. Методические ошибки увеличивают угол падения, что связано с относительно меньшим запаздыванием в срабатывании пунктов, расположенных ближе к оси ливня, за счет большей плотности потока падающих частиц и их более узкого временного распределения.

2. Основные результаты

Для анализа углового распределения были отобраны ливни, зарегистрированные с вероятностью более 0.95.

Размер эффективной области для отбора зарегистрированных ШАЛ рассчитывался с учетом флуктуаций в развитии ШАЛ и определялся системой регистрации ливней, значением N_e и параметром функции пространственного распределения заряженных частиц в каждом ливне. Из рассмотрения были исключены ливни с $\vartheta > 45^\circ$, доля которых составляет примерно 1%, а также ливни с $\vartheta < 6^\circ$, погрешность определения зенитного угла для которых максимальна. Радиусы областей эффективной регистрации, интервалы по N_e , включающие область излома в спектре ШАЛ по числу частиц при $N_e \approx 4 \cdot 10^5$, и число ливней в каждом интервале приведены в таблице.

Угловые распределения для указанных интервалов по N_e построены разбиением данных по углам на интервалы шириной 3° . На рисунке для иллюстрации представлены угловые распределения для трех интервалов по N_e .

Экспериментальные угловые распределения естественно сравнить с априори ожидаемым экспоненциальным распределением

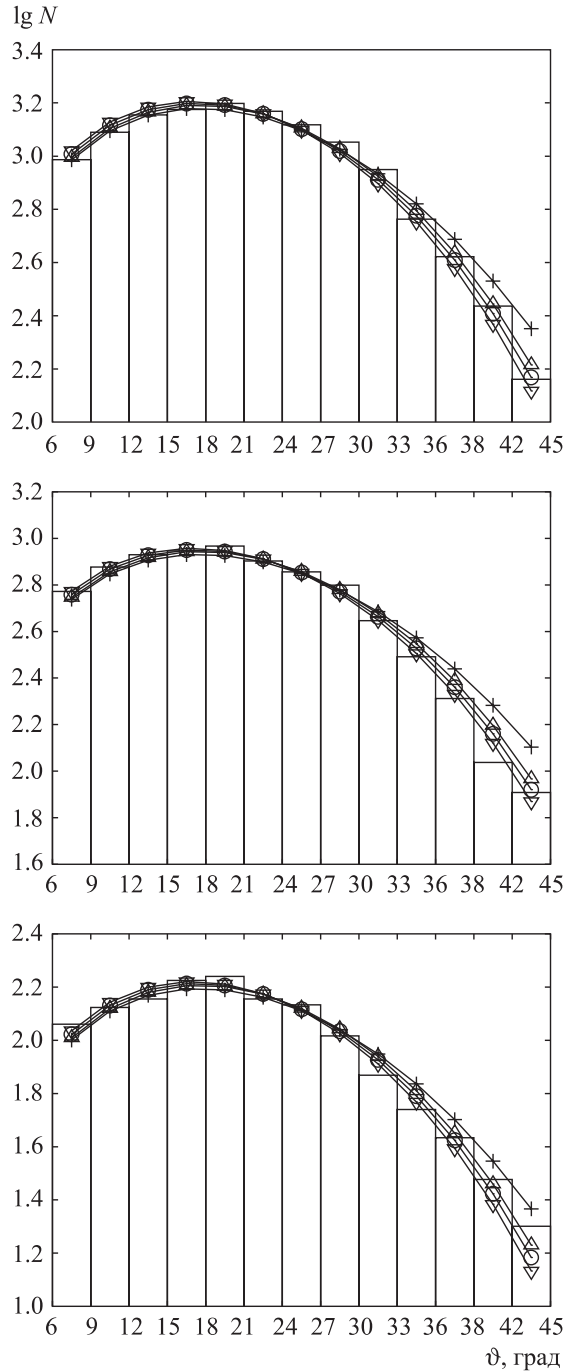
$$f(\vartheta) = A \exp \left[-\frac{x_0}{\lambda} \left(\frac{1}{\cos \vartheta} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

где A — нормировочный множитель, x_0 — глубина атмосферы по вертикали, λ — пробег поглощения ливней, а также с его аппроксимацией в виде $\cos^n \vartheta$. При этом в обоих случаях вводился дополнительный множитель $\cos \vartheta$, учитывающий уменьшение эффективной площади установки при увеличении угла наклона оси ливня, а величина пробега поглощения находилась путем минимизации величины χ^2 .

Результаты сравнения для указанных интервалов по N_e также показаны на рисунке. Как видно, согласие довольно хорошее, хотя для двух интервалов вероятность согласия $P(\chi^2)$ невелика. Значения $P(\chi^2)$ вместе с полученными значениями пробега поглощения ливней λ приведены в таблице.

Оптимальные значения пробега поглощения λ , доставляющие минимум величине χ^2 и приведенные в таблице, найдены с ошибкой $\pm 0.5 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$. Как следует из таблицы, пробег поглощения числа ливней остается практически постоянным в исследуемом диапазоне по N_e (среднее значение $\bar{\lambda} \approx 115$, среднеквадратичное отклонение $\sigma \approx 4$). Малые значения $P(\chi^2)$, возможно, связаны со случайными отклонениями.

На рисунке для сравнения приведены вычисленные угловые распределения в обычно принимаемой форме $\sim \cos^n \vartheta$, где $n = x_0/\lambda$. В нашем случае $n = 9$. Как видно из рисунка, согласие с экспериментом хуже, особенно при больших зенитных углах.



Угловые распределения для интервалов (сверху вниз) $N_e = 5.4-5.6, 6.0-6.2, 7.0-7.6$. По оси ординат отложен логарифм числа ливней N в бинах по зенитному углу ϑ . Кривыми показаны графики распределения (1) для $\lambda = 110, 115, 120 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ (∇, \circ, \triangle соответственно) и распределения $\cos^9 \vartheta$ (+)

Интервалы по N_e , радиусы областей эффективной регистрации, число отобранных ливней в каждом из интервалов, значения $P(\chi^2)$ и полученные значения пробега поглощения ливней λ

$\Delta \lg N_e$	5.4-5.6	5.6-5.8	5.8-6.0	6.0-6.2	6.2-6.6	6.6-7.0	7.0-7.6
$R_{\text{eff}}, \text{ м}$	20	30	40	50	59	85	158
Число ливней	12 923	13 699	10 608	7302	5720	1925	1338
$P(\chi^2), \%$	7	60	6	42	54	64	80
$\lambda, \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$	120	115	112	110	115	120	116

В приближении, не учитывающем флуктуации в развитии лавины, пробег поглощения ливней связан с пробегом поглощения Λ частиц в ливне соотношением $\Lambda = \kappa \lambda$, где κ — показатель интегрального спектра по числу частиц [8]. Для ливней с $N_e \lesssim 10^6$ величина $\kappa \approx 1.5$, а для $N_e \gtrsim 10^6$ значение κ возрастает приблизительно до 2.0. Таким образом, если считать λ практически постоянным в изученном интервале по числу частиц, то приходим к заключению, что при больших N_e поглощение лавины замедляется, несмотря на изменение массового состава космических лучей в сторону его утяжеления.

Заключение

Результаты, сопоставимые с нашими, получены на уровне моря в эксперименте KASCADE при изучении ШАЛ с числом частиц в интервале N_e от $3 \cdot 10^4$ до $3 \cdot 10^6$, включающем область излома в спектре по числу частиц [2]. Методом постоянной интенсивности получен пробег поглощения частиц Λ в ливне, равный $175 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ до излома и увеличивающийся до $194 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ за изломом. В другой работе также по данным KASCADE, но при ином положении места излома в спектре по N_e получено, что $\Lambda = 222 \pm 28 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ [9]. Близкие результаты получены и в эксперименте EAS-TOР ($\Lambda = 219 \pm 3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ на глубине $820 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$) [10].

В заключение остановимся на результатах работы [4], в которой обнаружен избыток ливней, приходящих с зенитными углами, соответствующими глубинам в атмосфере более $1100 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ и имеющими пробег поглощения $\lambda = 585 \pm 45 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$, в отличие

от $\lambda = 130 \pm 7 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ для ливней, наблюдаемых при меньших углах. Эксперименты МГУ и KASCADE не подтверждают этого результата.

Таким образом, проведенный нами анализ и сопоставление его результатов с данными эксперимента KASCADE не дают каких-либо оснований для заключения о возрастании роли длиннопробежной компоненты с увеличением первичной энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-02-00540).

Список литературы

1. Грейзен К. // Физика космических лучей / Под ред. Дж. Вильсона. Т. 3. М., 1958. С. 7.
2. Antoni T., Apel W.D., Badea A.F. et al. // *Astroparticle Phys.* 2003. **19**. P. 703.
3. Яковлев В.Н. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2004. **68**, № 11. С. 1630.
4. Bejl P.F., Bejsembaev R.U., Vildanov N.G. et al. // *Proc. 28th ICRC. Tsukuba, 2003.* **1**. P. 9.
5. Vernov S.N., Christiansen G.B., Atrashkevich V.B. et al. // *Proc. 16th ICRC. Kyoto, 1979.* **8**. P. 129.
6. Fomin Yu.A., Kalmykov N.N., Kalmykov V.N. et al. // *Proc. 28th ICRC. Tsukuba, 2003.* **1**. P. 119.
7. Веденеев О.В., Куликов Г.В., Маценов С.И. и др. // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1986. **50**. С. 2179.
8. Христиансен Г.Б., Куликов Г.В., Фомин Ю.А. *Космическое излучение сверхвысокой энергии*. М., 1975.
9. Chilingarian A.A., Gharagyozyan G.V., Ghazaryan S.S. et al. // *Proc. Workshop ANI 99. Report FZKA 6472. Forschungszentrum Karlsruhe, 2000.* P. 43.
10. Aglietta M., Alessandro B., Antonioli P. et al. // *Astroparticle Phys.* 1999. **10**. P. 1.

On the angular distribution of extensive air showers

M. Yu. Zotov, N. N. Kalmykov, G. V. Kulikov^a, V. P. Sulakov

D. V. Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia.

E-mail: ^a kulikov@eas.sinp.msu.ru

Angular distribution of extensive air showers with different number of charged particles in the range $2.5 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^7$ is found for the experimental data obtained with the EAS MSU array. Possible approximations of the obtained distributions with different empiric functions that can be found in literature, are analysed. It is shown that the exponential function provides the best approximation of the angular distribution in the sense of the χ^2 criterion.

Keywords: extensive air showers, angular distribution.

PACS: 96.50.sd.

Received 8 June 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2009).

Сведения об авторах

1. Зотов Михаил Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-57-35, e-mail: zotov@eas.sinp.msu.ru.
2. Калмыков Николай Николаевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. отделом ЧСВЭ; тел.: (495) 939-23-69, e-mail: kalm@eas.sinp.msu.ru.
3. Куликов Герман Викторович — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.; вед. науч. сотр.; тел.: (495) 939-57-30, e-mail: kulikov@eas.sinp.msu.ru.
4. Сулаков Владимир Петрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-44-96, e-mail: sulakov@eas.sinp.msu.ru.