

РЕКОРДНАЯ ЭНЕРГИЯ ГИГАНТСКОГО ЛИВНЯ

Е.Е.Антонов, А.В.Глушков⁺, Л.Г.Деденко¹⁾, М.И.Правдин⁺, Ю.П.Пытьев,
Т.М.Роганова*, И.Е.Слепцов⁺, Г.Ф.Федорова*

Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова, 119899 Москва, Россия

⁺ Институт космофизических исследований и астрономии Сибирского отделения РАН
677891 Якутск, Россия

* НИИ ядерной физики МГУ им.М.В.Ломоносова, 119899 Москва, Россия

Поступила в редакцию 26 марта 1999 г.

Согласно надежной (значение $\chi_1^2=0.93$ при 36 степенях свободы) интерпретации показаний всех сработавших детекторных станций в гигантском ливне, зарегистрированном на Якутской установке 7 мая 1989 г. в 13 ч 23 мин по Гринвичу, в рамках модели кварк-глюонных струн с учетом геомагнитного поля энергия этого ливня равна $3 \cdot 10^{20}$ эВ.

PACS: 13.85.Tr, 96.40.Pq

1. Введение. После первых упоминаний [1–3] о возможном существовании гигантских атмосферных ливней (ГАЛ) последовали сообщения [4–6] об обнаружении трех ГАЛ, оценки энергии которых существенно превышали величину $E_0 \sim 10^{20}$ эВ. Поэтому предсказание Грейzenым–Зацепиным–Кузьминым (ГЗК) [7, 8] возможно "обрезания" энергетического спектра частиц первичного космического излучения из-за их взаимодействий с микроволновым реликтовым излучением можно рассматривать как указание в пользу гипотезы локального распределения источников частиц сверхвысоких энергий (в пределах ~ 30 Мпс). Недавно появилось сообщение о детектировании новых 6 ливней с энергиями выше 10^{20} эВ [9]. Все эти факты можно интерпретировать как возможное свидетельство существования либо новых форм материи (топологических дефектов), либо гипотетических сверхтяжелых частиц, либо неизвестных механизмов ускорения заряженных частиц в близлежащих источниках, либо неизвестных ранее процессов и объектов. Таким образом, можно говорить об открытии нового явления – ГАЛ с энергиями выше 10^{20} эВ.

Ввиду исключительной важности этого явления, особое значение приобретают достоверность, надежность и точность оценок как энергии, так и направлений прихода ГАЛ. В данной работе предложен и реализован новый метод получения таких оценок на основе интерпретации показаний всех детекторов в рамках модели кварк-глюонных струн (КГС) [10] с учетом внешних факторов (геомагнитного поля) и нормировки некоторых расчетных параметров ливней в соответствии с экспериментальными данными.

2. Новый метод получения оценок. Интерпретация экспериментальных данных проводится в несколько этапов. Сначала по данным временного канала показаний детекторов получают оценки зенитного θ и азимутального ϕ углов, характеризующих направление оси ГАЛ. Нами было показано [11], что интерпретация данных не в рамках модели плоского фронта, а на основе рассчитанной пространственно-

¹⁾ e-mail: ddn@dec1.npi.msu.su

временной структуры ливня для разных типов регистрируемых частиц приводит к уменьшению погрешности оценок углов от нескольких градусов до $\sim 1.5^\circ$ при использовании метода минимума χ^2 и до $\sim 0.5^\circ$ – в случае метода минимакса. В частности, для Якутского ГАЛ, состоящего из мюонов, методом минимакса нами были получены оценки $\theta = 58.2^\circ \pm 0.5^\circ$ и $\phi = 164.2^\circ \pm 0.4^\circ$. При этом величина χ_1^2 уменьшается от ~ 2.2 до значения ~ 0.4 при 14 степенях свободы, то есть надежность интерпретации существенно возрастает.

Следующий этап – определение координат X и Y точки пересечения осью ливня плоскости установки и параметра $\rho(600, \theta)$ (плотности заряженных частиц на расстоянии 600 м от оси ливня) на основе принятой симметричной функции пространственного распределения (ФПР) частиц в плоскости, перпендикулярной оси ливня (далее – в плоскости ливня). На наш взгляд, при такой процедуре в показания детекторов вносятся дополнительные ошибки, связанные с переходом из плоскости установки в плоскость ливня. Другой существенный источник возможных ошибок – практическое игнорирование качества такой интерпретации. Принятая ФПР частиц может не соответствовать их фактическому распределению по каким-либо причинам, однако результат интерпретации – значение параметра $\rho(600, \theta)$ – будет принят. Например, при стандартной интерпретации данных Якутского ГАЛ величина $\chi_{21}^2 = 39.1$ (надежность менее 1%). Ясно, что оценки параметра $\rho(600, \theta)$ и координат оси ливня, полученные в этом случае, не являются оптимальными.

Нами предлагается проводить интерпретацию показаний всех детекторов в плоскости установки на основе рассчитанной ФПР регистрируемых частиц в рамках выбранной модели с учетом внешних факторов (геомагнитного поля). Результатами должны быть оценки энергии E_0 и координат X и Y оси ливня в плоскости установки. Таким образом, приходим к задаче минимизации величины

$$\chi_{n-3}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_i - \rho_{exp}}{\sigma} \right)^2, \quad (1)$$

где n – число сработавших детекторов, ρ_{exp} и ρ_i – зарегистрированная и рассчитанная плотности частиц, на множестве возможных значений X , Y и E_0 . Ясно, что даже "самая хорошая" модель и различные приближения не обязательно должны соответствовать данным в области самых высоких энергий. Поэтому принята процедура нормировки рассчитанных характеристик ГАЛ на экспериментальные данные, полученные при реализации метода калориметрирования [12], то есть в соответствии с законом сохранения энергии. Детали нормировки описаны в п.3.

На рис.1 для Якутского ГАЛ показана "сетка" отношений z плотностей мюонов, рассчитанных с учетом геомагнитного поля \mathbf{B} и в пренебрежении этим полем. Плоскость $z=1$ соответствует случаю $\mathbf{B}=0$; точки с погрешностями – экспериментальные данные для ГАЛ [4], поделенные на рассчитанные плотности в приближении $\mathbf{B}=0$. Из рис. 1 видно, что экспериментальные точки группируются около "сетки". Таким образом, из-за влияния геомагнитного поля существенно нарушается азимутальная симметрия ФПР мюонов, и поэтому использование симметричной ФПР в стандартной процедуре интерпретации является упрощением. Именно потому, что несимметричную ФПР мюонов для каждого конкретного случая можно рассчитать, нами предлагается метод (1). В случае учета геомагнитного поля величина $\chi_1^2 = 0.93$ при 36 степенях свободы, то есть предлагаемая интерпретация данных ГАЛ вполне

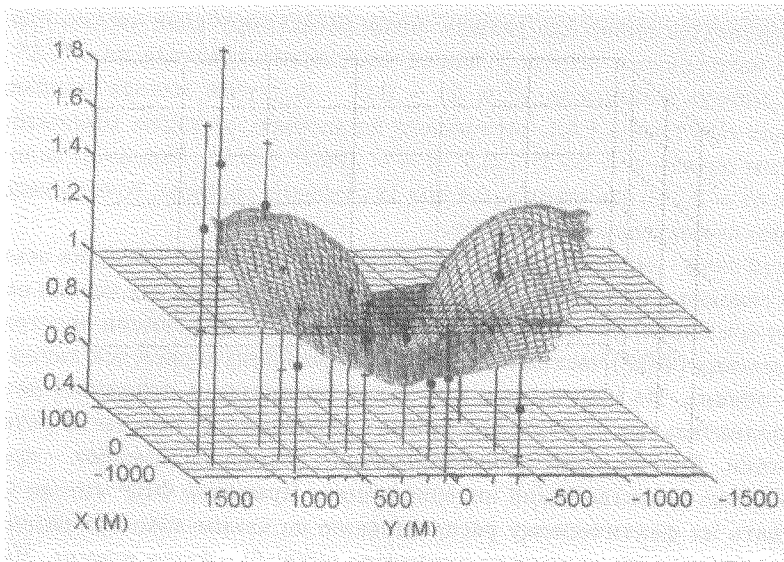


Рис.1. "Сетка" отношений z (вертикальная ось) плотностей мюонов, рассчитанных с учетом геомагнитного поля \mathbf{B} и в приближении $\mathbf{B}=0$; кружочки с погрешностями – данные [4]; плоскость $z=1$ – случай $\mathbf{B}=0$

разумна, тогда как надежность стандартной процедуры $\sim 1\%$. Пренебрежение геомагнитным полем приводит к $\chi_1^2=2.03$ (вероятность согласия меньше 0.03%) [13]. Значения координат $X = 1112$ м и $Y = -452$ м оси ливня в плоскости установки, определенные новым методом, отличаются от первоначальных оценок $X_0 = 1055$ м и $Y_0 = -406$ м, что приводит к увеличению среднего значения параметра $\rho(600, \theta)$ в 1.45 раза. Так как этот параметр $\rho(600, \theta, \phi)$ зависит также от азимутального угла ϕ (минимальное значение может отличаться от максимального примерно в ~ 1.5 раза! – см. рис. 1), то его не следует использовать для оценки энергии E_0 . Согласно предлагаемому методу, оценка E_0 , как и оценки X и Y , определяется из условия минимума выражения (1). С учетом нормировки расчетных плотностей мюонов (см. п.3) этот минимум достигается при значении энергии $E_0 = 3 \cdot 10^{20}$ эВ, что в 2–3 раза выше старой оценки [4]. Следует особо отметить, что на этом этапе интерпретация результатов эксперимента заканчивается, так как получены все необходимые оценки.

Согласно стандартной процедуре, необходимы другие этапы, каждый из которых может приводить к дополнительным ошибкам. Например, переход от среднего по азимутальным углам параметра $\rho(600, \theta)$ к его значению для вертикальных ливней ($\theta=0$) в предположении экспоненциального поглощения может существенно отличаться от теории, которая также не дает однозначных предсказаний (см. ниже). Это иллюстрирует рис.2, на котором показана расчетная зависимость плотности заряженных частиц $\rho(600, \theta)$ от θ :

$$\rho(600, \theta) = \rho_e(600, \theta) + 1.25 \cdot k_\mu \cdot \rho_\mu(600, \theta, \geq E_\mu), \quad (2)$$

где ρ_e и ρ_μ – плотности электронов и мюонов; $E_\mu=0.3$ ГэВ; коэффициент 1.25 учитывает электроны, возникающие от распада мюонов; $k_\mu=1.42$ – коэффициент нор-

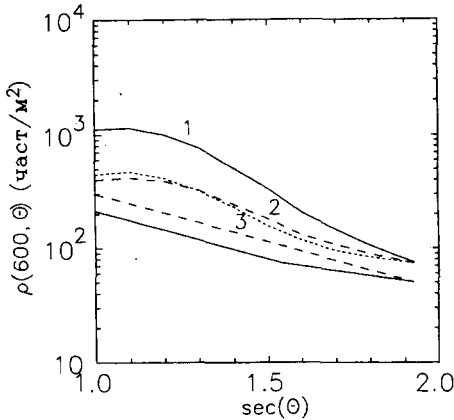


Рис.2. Плотность заряженных частиц на расстоянии 600 м от оси ливня с энергией $3 \cdot 10^{20}$ эВ как функция зенитного угла θ . Кривые 1, 2 и 3 соответствуют предположениям [14], [15] и [16] о ФПР электронов и проведены от $\rho(600, \theta) = 77.6$. Две прямые – два варианта экспоненциального поглощения и проведены от $\rho(600, \theta) = 53.9$

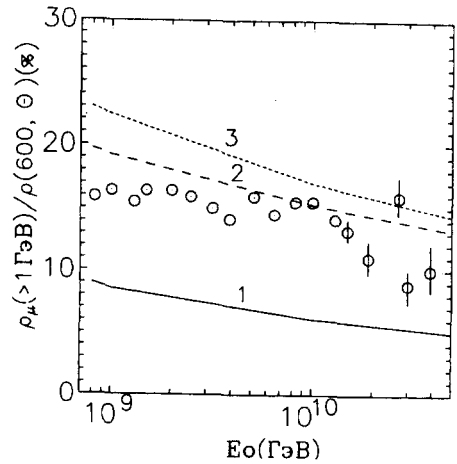


Рис.3. Доля мюонов с энергией $E_\mu \geq 1$ ГэВ на расстоянии 600 м от оси ливня как функция E_0 . Кривые 1, 2 и 3 соответствуют предположениям [14], [15] и [16] о ФПР электронов. Кружочки – данные [19] для $\theta = 18^\circ$

мировки (см. п.3). Кривые 1, 2 и 3 рассчитаны согласно трем различным гипотезам о ФПР электронов (1 – приближение НКГ [14], 2 – модель модифицированной функции НКГ [15], 3 – аппроксимация [16]). Эти кривые проведены от нового значения $\rho(600, \theta) = 77.6$ и демонстрируют неоднозначность перехода к $\rho(600, 0)$. Две прямые соответствуют двум значениям пробега поглощения λ , принятым на Якутской установке, и проведены от старой оценки $\rho(600, \theta) = 53.9$.

Метод калориметрирования [12] приводит к следующей оценке E_0 по значению параметра $\rho(600, 0)$:

$$E_0 = a \cdot \rho^\alpha(600, 0), \quad (3)$$

где $a = 4.8 \cdot 10^{17}$ эВ и $\alpha = 1$. Однако ввиду ограниченной статистики событий при сверхвысоких энергиях такая калибровка реализована фактически в узком энергетическом диапазоне, когда погрешность оценки α велика. При самых высоких энергиях максимум ливня приближается к уровню наблюдения, изменяются соотношения между различными его характеристиками, и поэтому экстраполяция калибровки на область сверхвысоких энергий не представляется вполне обоснованной. Например, вычисления в рамках модели КГС с учетом нормировки сигнала (см. п.3) приводят к параметрам $a = 4.55 \cdot 10^{17}$ эВ и $\alpha = 1.07$ и, следовательно, к дополнительному увеличению оценки энергии E_0 примерно в 1.5 раза. Наш метод (1) не содержит и этого этапа, и связанных с ним дополнительных погрешностей.

3. Нормировка расчетных параметров ливней. Метод калориметрирования [12], основу которого составляют измерения черенковского света, – главное преимущество Якутской установки. Поэтому представляет интерес идея нормировки расчетных параметров ливней по результатам [12]. Для экспериментально оцененных энергий E_0 [12] расчетные значения потока Φ черенковских фотонов превышают

измеренные на 2% – 5%. Это означает, что динамика развития каскадов адронов в атмосфере вполне удовлетворительно описывается в рамках принятой модели [10] и приближений. Хорошее согласие расчетной каскадной кривой [17] с данными [6] также свидетельствует о том, что развитие ливня в продольном направлении можно описать в рамках модели КГС и при энергиях $\sim 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Однако вычисленная доля энергии $E_{\mu\nu}/E_0$, которая переходит в мюоны и нейтрино, в среднем в 1.42 раза меньше оцененной экспериментально. Поэтому в формуле (2) для плотности заряженных частиц введен коэффициент $k_\mu=1.42$, то есть реализована нормировка расчетных плотностей мюонов. Отметим также, что при $k_\mu=1.42$ результаты наших расчетов плотности мюонов и вычислений по коду COSMOS [18] совпадают. В общем балансе энергий это означает уменьшение расчетной доли энергии электронно-фотонной компоненты на 2% – 3%, то есть как раз на ту величину, которая следует из сравнения потоков черенковских фотонов.

Рис. 3 иллюстрирует, что при выбранной нормировке плотностей мюонов ($k_\mu=1.42$) и предположении [15] о ФПР электронов расчетная доля мюонов с энергией $E_\mu \geq 1$ ГэВ согласуется с экспериментальной [19], то есть в этом случае удается хорошо описать всю имеющуюся совокупность экспериментальных данных.

Итак, интерпретация показаний всех сработавших детекторов в ГАЛ, зарегистрированном на Якутской установке, в рамках модели КГС с учетом геомагнитного поля и нормировки только одного параметра ливня (плотности мюонов) с высокой степенью надежности ($\chi_1^2=0.93$ при 36 степенях свободы) показывает, что энергия E_0 этого ливня равна $\sim 3 \cdot 10^{20}$ эВ. Этот вывод не зависит от предположения [15] о ФПР электронов, так как предложенный метод анализа мюонного ГАЛ не содержит перехода к параметрам ливня для вертикального направления. Интересно, что как оценка энергии, так и направление прихода этого ливня хорошо совпадают с аналогичными оценками ГАЛ, зарегистрированного в США на установке Fly's Eye [6]. Без нормировки (то есть при $k_\mu=1$) энергия E_0 возрастает до величины $4.3 \cdot 10^{20}$ эВ.

В заключение авторы выражают благодарность Г.Т.Зацепину за плодотворное обсуждение результатов, советы и поддержку.

-
1. J.Linsley, Phys. Rev. Lett. **10**, 146 (1963).
 2. G.Brooke, G.Cunningham, P.I.Eames et al., Proc. 19th ICRC, La Jolla **2**, 150 (1985).
 3. M.M.Winn, J.Ulrichs, L.Horton et al., Proc. 19th ICRC, La Jolla **9**, 499 (1985).
 4. N.N.Efimov, T.A.Egorov, A.V.Glushkov et al., Proc. Int. Workshop on Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays, Kofu (1990), p.20.
 5. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., Phys. Rev. Lett. **73**, 3491 (1994).
 6. D.J.Bird, S.C.Corbato, H.U.Dai et al., Astroph. J. **424**, 491 (1994).
 7. K.Greisen, Phys. Rev. Lett. **2**, 748 (1966).
 8. Г.Т.Зацепин, В.А.Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 78 (1966).
 9. M.Takeda, N.Hayashida, K.Honda et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 1163 (1998).
 10. А.Б.Кайдалов, К.А.Тер-Мартirosян, Ю.М.Шабельский, ЯФ **43**, 1282 (1986).
 11. Е.Е.Антонов, А.В.Глушков, Т.А.Григорян и др., Изв. РАН, сер. физ. **63**, 542 (1999).
 12. А.В.Глушков, М.Н.Дьяконов, Т.А.Егоров и др., Изв. АН СССР, сер. физ. **55**, 713 (1991).
 13. Е.Е.Антонов, А.В.Глушков, Л.Г.Деденко и др., Письма в ЖЭТФ **68**, 177 (1998).
 14. К.Грейзен, Физика космических лучей, М.: ИЛ, **3**, (1958), с.3.
 15. L.G.Dedenko, N.M.Nesterova, S.I.Nikolsky et al., Proc. 14th ICRC, Munchen **8**, 2731 (1975).
 16. А.А.Lagutin, A.V.Plyasheshnikov, and V.V.Melentjeva, Proc. 25th ICRC, Durban **6**, 289 (1997).
 17. А.М.Анохина, В.И.Галкин, Л.Г.Деденко и др., ЯФ **60**, 290 (1997).
 18. N.Hayashida, K.Honda, M.Honda et al., Proc. 25th ICRC, Durban **6**, 241 (1997).
 19. А.В.Глушков, В.Б.Косарев, И.Т.Макаров и др., Письма в ЖЭТФ **67**, 361 (1998).