

Оценка энергии электронно-фотонной компоненты космических лучей по измерению черенковского света широких атмосферных ливней сверхвысоких энергий

С. П. Кнуренко¹⁾, А. А. Иванов, И. Е. Слепцов, А. В. Сабуров

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера Сибирского отд. РАН
677980 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 24 апреля 2006 г.

По данным регистрации черенковского излучения и заряженных частиц на Якутской установке ШАЛ оценена доля энергии E_{em}/E_0 , диссипированной в электронно-фотонную компоненту ШАЛ в области $E_0 = 10^{15} - 10^{19}$ эВ. Результаты сравниваются с моделями с разными диссипациями в электронно-фотонную компоненту и с расчётами для разных первичных ядер. В интервалах энергий $10^{15} - 10^{16}$ эВ и $10^{18} - 10^{19}$ эВ E_{em}/E_0 равно соответственно (77 ± 2) и (88 ± 2) , что не противоречит смешанному составу первичных космических лучей в первом интервале энергий и протонному составу во втором.

PACS: 13.40.-f, 13.85.Tr

1. Введение. В последнее время, в работах [1–5] было обращено внимание на оценку энергии первичной частицы, образующей широкий атмосферный ливень (ШАЛ). Связано это с тем, что энергетические спектры космических лучей, полученные на самых больших установках ШАЛ, и представленные в метрике $J \cdot E^3$, хорошо совпадают по форме, но существенно различаются по интенсивности. Одна из причин этого различия видится в разных подходах к оценке энергии на установках. В первую очередь, использование разных моделей и, как правило, зависимость оценки E_0 от выбора модели. Второе, на установках используют разные методы регистрации ШАЛ и отсюда разные характеристики ливня для оценки энергии ливня. Это может дополнительно приводить к систематическим ошибкам в оценке E_0 .

Прямым методом оценки энергии является измерение энергии, рассеянной в атмосфере частицами ливня, например, по измерению черенковского излучения ШАЛ [6] или через каскадную кривую, восстановленную из измерений ионизационного свечения азота при прохождении релятивистских частиц ливня через атмосферу [7].

Энергия, растроченная частицами на ионизацию среды, и полная энергия, переданная в электронно-фотонную компоненту, наряду с другими параметрами ШАЛ всегда считались важными для выбора модели взаимодействия первичной частицы космических лучей с ядрами атомов воздуха (так как напрямую связаны с энергией адронной компоненты лив-

ня) и безмодельной оценки энергии первичной частицы (поскольку энергия, переданная в электронно-фотонную компоненту ливня, по модельным расчётам составляет 80–90% от энергии первичной частицы). Сделать оценку последней, без привлечения каких-либо представлений о модели взаимодействия, можно только в двух случаях, когда измерен полный поток черенковского света на уровне моря или известно продольное развитие ШАЛ, а точнее, полное число частиц в максимуме развития ливня. В настоящее время только на двух установках ШАЛ проводятся такие измерения. На Якутской комплексной установке ШАЛ (Россия), где более 30 лет измеряется черенковское излучение ШАЛ и на установке Fly's Eye (США), где измеряется ионизационное свечение азота.

В предлагаемой работе подробно рассматривается вопрос определения той части энергии первичной частицы, которая передается в электромагнитный каскад ШАЛ и которая составляет основу калориметрического метода определения энергии ШАЛ на Якутской установке. Рассмотрен широкий интервал по энергии от 10^{15} до 10^{19} эВ. В методе учтены реальное пропускание атмосферы и продольное развитие ливня, а именно, X_{max} – глубина максимума развития ШАЛ [8].

2. Теория. Для основных процессов генерации частиц в ливне можно аналитически записать потерю энергии каждой из компонент ШАЛ и затем численно найти их значения. Например, ионизационные потери электронов могут быть подсчитаны по формуле

¹⁾e-mail: s.p.knurenko@ikfia.ysn.ru

$$E_i = B \cdot \int N_e(x) dx, \quad (1)$$

где $N_e(x)$ – каскадная кривая развития ливня в атмосфере; $B = 2.2 \text{ МэВ см}^2/\text{г}$.

Энергия, передаваемая в мюоны и нейтрино, также может быть вычислена согласно выражению

$$E_{\mu\nu} = \iint \frac{dE dx E B_d P_{cp}(E, x)}{x}, \quad (2)$$

где $P(E, x)$ – энергетический спектр заряженных пионов/каонов на уровне x , а B_d – постоянная распада заряженных пионов в атмосфере.

Энергия, затраченная на взаимодействие адронов с ядрами атомов воздуха, и их развал на фрагменты для заданной модели взаимодействия адронов может быть вычислена по формуле

$$E_d = E_{dis} \iint \frac{dE dx P_{cp}(E, x)}{\lambda(E)}, \quad (3)$$

где E_{dis} – средняя энергия, затраченная на развал одного ядра, $\lambda(E)$ – средний свободный путь для взаимодействия адрона в воздухе.

В некотором приближении сумма представленных значений энергий будет составлять полную энергию первичной частицы, давшей начало широкому атмосферному ливню:

$$E_0 = E_i + E_{el} + E_{\mu\nu} + E_d, \quad (4)$$

Здесь E_{el} – энергия, проносимая частицами ШАЛ за уровень наблюдения. E_{el} может быть определена интегрированием каскадной кривой ниже уровня наблюдения X_0 :

$$E_{el} = B \cdot \int N(x) dx. \quad (5)$$

Таким образом, опираясь на выбранную модель взаимодействия адронов, можно рассчитать энергию первичной частицы, инициировавшей ШАЛ в атмосфере Земли, и затем сравнить ее с эмпирическими оценками, которые мы получаем, исходя из измерений заряженных частиц, мюонов и черенковского света ШАЛ.

3. Эмпирическая оценка. Для определения первичной энергии ливня на Якутской установке ШАЛ используется выражение

$$E_0 = E_{ei} + E_{el} + E_\mu + E_{hi} + E_{\mu i} + E_\nu. \quad (6)$$

Входящие в (6) слагаемые E_0 могут быть восстановлены с использованием интегральных характеристик ШАЛ, представленных на рис.1. Энергия, пере-

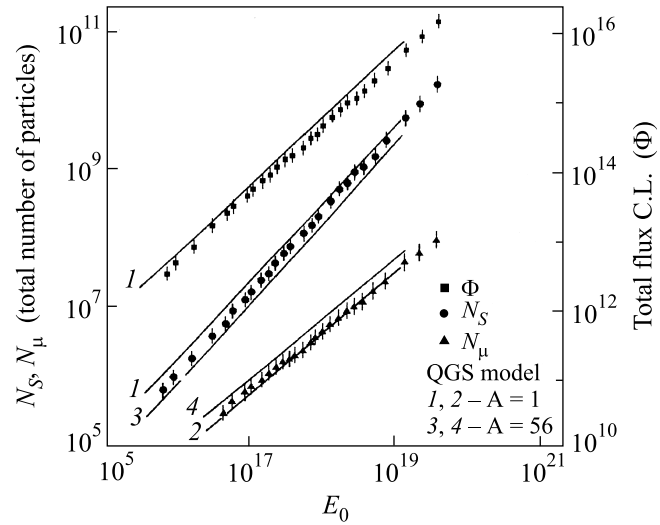


Рис.1. Средние характеристики ШАЛ, измеренные на Якутской установке. Квадратиками обозначен полный поток Φ черенковского света ШАЛ; кружками – полное число N_S заряженных частиц на уровне моря; треугольники обозначают полное число мюонов с $E_{th} \geq 1 \text{ ГэВ}$ N_μ . Прямые – расчет по модели кварк-глюонных струн (QGS model)

даваемая в мюоны с пороговой энергией $E_{th} \geq 1 \text{ ГэВ}$ согласно формуле $E_\mu = \varepsilon_\mu \cdot N_\mu$, где ε_μ – средняя энергия мюона, рассчитанная согласно измеренному энергетическому спектра ливневых мюонов до $E_\mu = 10^3 \text{ ГэВ}$ [9] и равная 10.6 ГэВ , N_μ – полное число мюонов с пороговой энергией $E_{th} \geq 1 \text{ ГэВ}$.

Оставшуюся незначительную часть ($\sim 4\%$) первичной энергии, которую трудно экспериментально измерить в космических лучах, мы взяли согласно расчетам [10]. Величину ионизационных потерь мюонной компоненты как $E_{\mu i} = (0.12 \pm 0.09) \cdot E_\mu$. Потери энергии на расщепление ядра в воздухе как 0.5 ГэВ и ионизационные потери адронной компоненты в атмосфере как $E_{hi} = (5.6 \pm 2.2) \cdot 10^{-2} \cdot E_{ei}$. Энергию, уносимую нейтринной компонентой, как $E_\nu = (0.64 \pm 0.18) \cdot E_\mu$.

В настоящей работе нас будут интересовать только первые два слагаемых – E_{ie} и E_{el} из выражения (6), так как их величины могут быть прямо определены из измеряемых на Якутской комплексной установке параметров ШАЛ.

Энергия, рассеянная электронами в атмосфере над уровнем наблюдения,

$$E_{ei} = k(x, P_\lambda) \cdot \Phi. \quad (7)$$

Здесь Φ – полный поток черенковского света ШАЛ; $k(x, P_\lambda)$ – коэффициент связи (расчетная величина), учитывающий прозрачность реальной атмосферы.

ры, характер продольного развития ливня (энергетический спектр вторичных частиц и его зависимость от возраста ливня) и выраженный через измеренную на установке глубину максимума развития ШАЛ [8].

Энергия, проносимая электронами за уровень наблюдения,

$$E_{el} = 2.2 \cdot 10^6 \cdot N_s(X_0) \cdot \lambda_{\text{eff}}, \quad (8)$$

где $N_s(X_0)$ – полное число заряженных частиц на уровне моря, а λ_{eff} – пробег поглощения ливневых частиц, найденный нами из корреляции параметров $N_s(X_0) - Q(400)$ при разных зенитных углах.

4. Результаты и обсуждение. В анализе использовался банк данных ШАЛ с черенковским излучением, накопленный на Якутской установке за более чем 30-летний период времени (1970 – 2003 гг.). Всего $\sim 3 \cdot 10^5$ ливней.

События ШАЛ отбирались по плотности потока черенковского света на расстоянии $R = 100$ м $Q(R = 100)$ для малой и $R = 400$ м от оси ливня $Q(R = 400)$ для большой установок, соответственно при $E_0 < 10^{17}$ эВ и $E_0 > 10^{17}$ эВ. Эти параметры, как следует из расчетов, пропорциональны первичной энергии [8, 11, 12]. Формулы связи E_0 с $Q(100)$ и $Q(400)$, полученные для атмосферных условий Якутской установки, имеют вид

$$E_0 = (5.8 \pm 1.4) \cdot 10^{16} \cdot \left(\frac{Q(100)}{10^7} \right)^{(0.96 \pm 0.03)}, \quad (9)$$

$$E_0 = (8.9 \pm 2.0) \cdot 10^{17} \cdot \left(\frac{Q(400)}{10^7} \right)^{(1.03 \pm 0.02)}. \quad (10)$$

Таким образом, ливни отбирались практически по первичной энергии E_0 . При отборе также учитывалась прозрачность атмосферы, точность определения оси и других параметров ШАЛ. В анализе использовались ливни, вероятность регистрации W_p которых была не менее 0.9, и зенитный угол $\theta < 30^\circ$. Далее по отобраным ливням строились средние функции пространственного распределения (ФПР) черенковского света, заряженных частиц, мюонов с $E_{th} \geq 1$ ГэВ и корреляции параметров N_s , N_μ при фиксированном Φ .

На рис.1 приведена зависимость основных параметров ШАЛ N_s , N_μ , Φ от первичной энергии. По этим данным, согласно формулам (7) и (8), определялись энергетические характеристики E_{ei} , E_{el} и отношение E_{em}/E_0 , где $E_{em} = E_{ei} + E_{el}$. Зависимость отношения E_{em}/E_0 от энергии показана на рис.2. На рис.2 экспериментальные данные сравниваются с расчетами по моделям с замедленной и умеренной

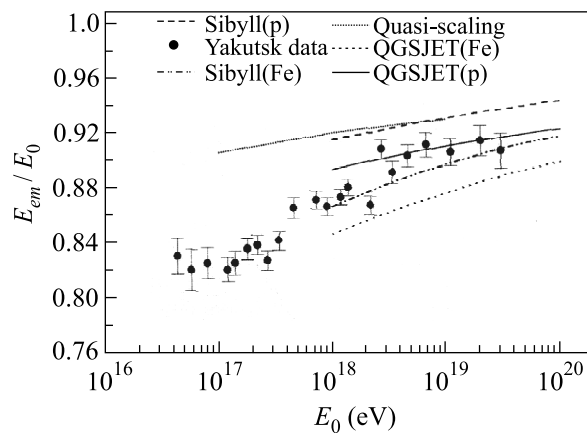


Рис.2. Доля энергии, переданная в электромагнитную компоненту по данным регистрации черенковского света на Якутской установке и по моделям развития ШАЛ Sibyll и QGSJET для первичного протона (p) и ядра железа (Fe)

диссипацией энергии в электромагнитную компоненту ШАЛ: модели квазискейлинг (точки), QGSJET (сплошная линия) [13] и SIBYLL [14].

Из рис.2 видно как согласие экспериментальных данных и расчета по модели QGSJET (протон) в области $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ, так и расхождение при $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ. Модель скейлинга дает заметно большее значение E_{em}/E_0 по отношению к экспериментальным данным, что несомненно связано с нарушением функции скейлинга в области предельных энергий, то есть скоростью диссипации энергии первичной частицы в адронную часть ливня. По этой причине существует зависимость и в современных моделях развития ШАЛ, которые основаны на теории квантовой хромодинамики, но имеют различия в деталях неупругого и упругого взаимодействий вторичных частиц, например, моделях QGSJET и SIBYLL. В работе [3] также рассматривается зависимость отношения E_{em}/E_0 от зенитного угла прихода ливня, то есть от количества вещества, пройденного частицами в атмосфере, и сорта первичной частицы. Данные расчета по модели QGSJET в случае разных зенитных углов θ , первичного протона (p) и ядра железа (Fe), а также по модели SIBYLL для p и Fe при $E_0 = 10^{18}, 10^{19}, 10^{20}$ эВ даны в таблице. Для сравнения в последней колонке таблицы приведены экспериментальные данные, полученные в Якутске. Из таблицы следует, что отношение E_{em}/E_0 слабо зависит от угла θ . Практически изменение в области энергий выше 10^{18} эВ составляет не более 1%. Значительно сильнее изменяется отношение E_{em}/E_0 , если ливень генерируется первичным ядром (в данном случае ядром желе-

Сравнение расчетных значений отношения E_{em}/E_0 по моделям QGSJET и SIBYLL с экспериментальными данными Якутской установки ШАЛ

| E_0 | Протон / ядро железа | | | QGSJET/SIBYLL | | Эксперимент (Якутск, $\theta = 17^\circ$) |
|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------|-------------|---|
| | $\theta = 0^\circ$ | $\theta = 30^\circ$ | $\theta = 45^\circ$ | протон | ядро железа | |
| 10^{18} | 0.888/0.842 | 0.893/0.844 | 0.895/0.846 | 0.893/0.916 | 0.846/0.866 | 0.874 ± 0.011 |
| 10^{19} | 0.909/0.873 | 0.911/0.876 | 0.915/0.878 | 0.911/0.931 | 0.876/0.897 | 0.898 ± 0.015 |
| 10^{20} | 0.921/0.897 | 0.926/0.899 | 0.926/0.901 | 0.926/0.945 | 0.899/0.918 | — |

за) или для интерпретации экспериментальных данных используются разные модели взаимодействия, например, QGSJET или SIBYLL. В первом случае различие составляет для $\theta = 45^\circ$ 5.5% при 10^{18} эВ, 3.8% при 10^{19} эВ и 2.5% для 10^{20} эВ. Во втором случае для $\theta = 30^\circ$ – 2.6%, 2.2% и 2.0%, соответственно. Из сравнения экспериментальных данных с расчетами из таблицы можно сделать следующие выводы:

- экспериментальное значение отношения E_{em}/E_0 при $\theta = 0^\circ$ ближе к модели QGSJET, чем к модели SIBYLL;
- при этом массовый состав первичного космического излучения должен состоять из смеси ядер с небольшим содержанием тяжелых ядер при $E_0 = 10^{18}$ эВ с постепенным переходом к большому содержанию протонов и ядер гелия при $E_0 = 10^{19}$ эВ;
- для модели SIBYLL видимое согласие эксперимента достигается только, если ШАЛ генерируется ядром железа, но это отвергается анализом, например, продольного и радиального развития ШАЛ, который выполнен по данным Якутской комплексной установки ШАЛ [15, 16].

Приведенные на рис.3 экспериментальные данные для интервала энергий $10^{15} - 10^{19}$ эВ хорошо описываются выражением вида

$$\frac{E_{em}}{E_0} = (0.964 \pm 0.011) - (0.085 \pm 0.005) \cdot E_0^{-(0.151 \pm 0.008)}. \quad (11)$$

Соотношение (11) в первую очередь важно для сравнения оценок E_0 , полученных на установке в Якутске и установке “Мушинный глаз”. Новая оценка параметра E_{em}/E_0 для установки “Мушинный глаз” приведена в работе [2]:

$$\frac{E_{em}}{E_0} = (0.959 \pm 0.003) - (0.082 \pm 0.003) \cdot E_0^{-(0.147 \pm 0.006)}. \quad (12)$$

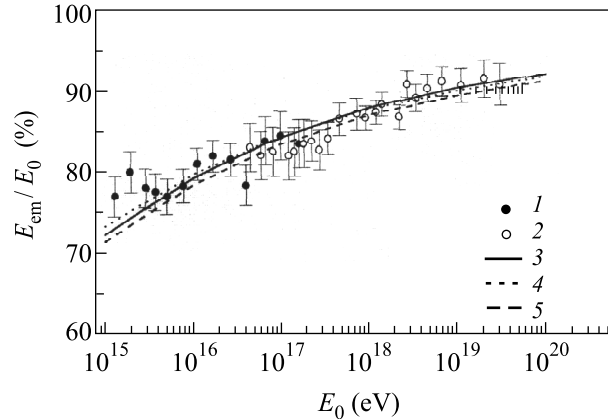


Рис.3. То же, что и на рис.2. Обозначения: 1 – данные малой черенковской установки, 2 – большой установки, 3 – аппроксимация экспериментальных данных выражением (11); 4 – расчет из работы [3], 5 – расчет из работы [2]

Из (11) и (12), а также из рис.3 видно, что среднее значение E_{em}/E_0 между протоном и ядром железа в случае модели QGSJET и экспериментальными данными расходится не более чем на (1 – 3)%, если рассматривать весь интервал энергий. Сравнение экспериментальных данных с расчетами для протона и ядра железа указывает на то, что массовый состав частиц космического излучения в области энергий $10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$ эВ и выше $3 \cdot 10^{18}$ эВ должен различаться. При $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ массовый состав скорее всего ближе к протонному. Поэтому при оценке энергии ШАЛ на установке “Мушинный глаз” разумнее пользоваться формулой (12), так как эта установка нацелена на измерения ШАЛ в области энергий выше $(3 - 5) \cdot 10^{18}$ эВ. На Якутской установке пользуются эмпирически полученной формулой (11). Систематическое различие между (11) и (12) не превышает 5%, что говорит о близости оценок E_0 в Якутске и на установке “Мушинный глаз”. Если принять это во внимание, то разница в интенсивности энергетических спектров, полученных в Якутске и на установке “Мушинный глаз”, сократится до минимума и спектры могут быть согласованы между собой.

5. Заключение. На Якутской установке ШАЛ по результатам измерений черенковского света ШАЛ, заряженных частиц и мюонов с пороговой энергией $E_{th} \geq 1$ ГэВ сделана безмодельная оценка энергии первичной частицы, генерировавшей ШАЛ. По измерениям черенковского света определена доля энергии, которая диссипирована в электронно-фотонную компоненту ШАЛ в области сверхвысоких и предельных энергий. Установлено, что при $\sim 10^{15}$ эВ ее величина составляет $(0.77 - 0.79) \cdot E_0$, а при 10^{19} эВ – $(0.87 - 0.89) \cdot E_0$.

Сравнение экспериментальных данных с разными моделями адронных взаимодействий [13, 14] говорит в пользу модели с умеренным X_{max} типа QGSJET и противоречит моделям с замедленным развитием типа скейлинг, SIBYLL с низким X_{max} .

Эмпирическая оценка E_{em}/E_0 , которая получена на Якутской установке, незначительно отличается от новой оценки энергии, полученной для установок “Мушинный глаз” и HiRes [2], и учет этой систематической разницы $\sim (5 - 7)\%$ при построении энергетического спектра сближает результаты и по величине интенсивности спектра.

Расчеты по модели QGSJET в случае первичного протона и первичного ядра железа показывает разную долю передачи энергии в электронно-фотонную компоненту ливня, так как X_{max} таких ливней находится на разной высоте относительно уровня моря. Экспериментальные данные, полученные на Якутской установке ШАЛ, как видно из рис.2, указывают на большее содержание в первичном космическом излучении протонов при $E_0 \geq 3 \cdot 10^{18}$ эВ по сравнению с областью энергий $10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$ эВ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант # 05-08-50045 и грант # 06-02-16973.

1. M. Nagano and A. A. Watson, Rev. Mod. Phys. **72**, 689 (2000).
2. Song C. Song, Z. Cao, B. R. Dawson et al., Astroparticle Phys. **14**, 7 (2000).
3. H. M. J. Barbosa, F. Catalani, J. A. Chinellato et al., Astroparticle Phys. **22**, 159 (2004).
4. V. P. Egorova, A. V. Glushkov, A. A. Ivanov et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **136**, 3 (2004).
5. V. Berezhinsky, A. Gazizov, and S. Grigorieva, Nucl. Phys. Proc. Suppl. **136**, 147 (2004).
6. Д. Д. Красильников, С. П. Кнуренко и др., Якутск: ЯФ СО АН СССР, 117 (1983).
7. R. M. Baltrusaitis, G. I. Cossiday et al., Proc. 19th ICCR, La Jolla, **4**, 1985, p. 159.
8. М. Н. Дьяконов, Т. А. Егоров, Н. Н. Ефимов и др., Космическое излучение предельно высокой энергии, Н.: Наука, 1991.
9. N. V. Grishina, B. A. Khrenov, G. B. Khristiansen et al., Proc. 17th ICRC, **6**, 1981, p. 3 ; Б. А. Хренов, Докторская диссертация: МГУ, 1986.
10. С. И. Никольский, Проблемы физики космических лучей, М.: Наука, 1987.
11. Т. А. Егоров, Д. Д. Красильников, В. А. Колосов et al., Proc. 12th ICRC, **6**, 1971, p. 1264.
12. А. А. Беляев, И. П. Иваненко, Б. П. Каневский и др., Электронно-фотонные каскады в космических лучах при сверхвысоких энергиях, М.: Наука, 1980.
13. N. N. Kalmykov, S. S. Ostapchenko, and A. I. Pavlov, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **52**, 17 (1997).
14. R. S. Fletcher, T. K. Gaisser, P. Lipari, and T. Stanev, Phys. Rev. **50**, 5710 (1994).
15. С. П. Кнуренко, А. А. Иванов, И. Е. Слепцов, Изв. РАН, сер. физ. **69**, 363 (2005).
16. S. P. Knurenko, V. P. Egorova, A. A. Ivanov et al., Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) **151**, 92 (2006).