

# Гигантские атмосферные ливни: проблема событий с $E_0 \geq 10^{20}$ эВ

А. В. Глушков<sup>1)</sup>

Институт космофизических исследований и аэронавтики Якутского научного центра  
Сибирского отделения РАН им. Ю. Г. Шафера, 677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 3 ноября 2003 г.

Рассмотрена проблема “верхнего конца” энергетического спектра гигантских атмосферных ливней (ГАЛ) с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ. Обсуждается вопрос почти полного отсутствия ГАЛ с предельными энергиями ( $E_0 \geq 10^{20}$  эВ) на Якутской установке и их значительное количество на AGASA, хотя обе установки схожи между собой по типу основных детекторов и методике обработки данных.

PACS: 96.40.–z, 98.70.–f

**1. Введение.** Уже первые наблюдения широких атмосферных ливней (ШАЛ) на крупнейших мировых установках Volcano Ranch (США) [1], Haverah Park (Англия) [2], SUGAR (Sydney University Giant Airshower Recorder) [3] и в Якутске [4] позволили обнаружить гигантские атмосферные ливни (ГАЛ) с энергиями  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ. Вслед за открытием реликтового излучения было показано, что из-за взаимодействий первичных протонов и ядер с этим излучением их поток при  $E_0 > 3 \cdot 10^{19}$  эВ должен резко уменьшиться за счет обрезания Грейзена–Зацепина–Кузьмина (ГЗК) [5, 6]. Этому предсказанию противоречат наблюдения ГАЛ на разных установках [7–10], энергии которых оцениваются вплоть до  $\sim (1–3) \cdot 10^{20}$  эВ. Для исследования проблемы “верхнего конца” энергетического спектра ГАЛ создаются еще более крупные, чем упомянутые выше, установки. В настоящее время действует установка AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) площадью  $\sim 100$  км<sup>2</sup> [11]. Проектируются и строятся гигантские установки с площадью  $\sim 1000–5000$  км<sup>2</sup>, с раздвижением между детекторами 1–1.5 км [12, 13].

Однако уже сейчас существует острое противоречие в изменениях энергетического спектра первичного космического излучения (ПКИ) вблизи  $E_0 \sim 10^{20}$  эВ. С одной стороны, на Якутской установке, которая функционирует непрерывно более 30 лет (экспозиция  $\approx 825$  км<sup>2</sup> · год · стерад), зарегистрирован лишь один ГАЛ с  $E_0 \approx 1.5 \cdot 10^{20}$  эВ [8]. С другой стороны, на установке AGASA, у которой экспозиция всего лишь в два раза больше (1649 км<sup>2</sup> · год · стерад), зарегистрированы 11 событий с  $E_0 > 10^{20}$  эВ [14]. Этот факт использован Ватсоном [15] для критики методов регистрации и оценки энергии ГАЛ на Якутской установке.

Давайте еще раз вернемся к этому вопросу. Прежде всего заметим, что ранее на установке Haverah Park с участием Ватсона были зарегистрированы шесть ГАЛ с  $E_0 \geq 10^{20}$  эВ [7], но после пересмотра данных и снижения оценки энергии на  $\approx 30\%$  таких событий не осталось ни одного [16]. Недавняя ревизия данных установок Fly’s Eye и Hires также уменьшила число зарегистрированных ГАЛ с  $E_0 \geq 10^{20}$  эВ с восьми до одного [17]. Таким образом, все мировые установки (кроме AGASA) фиксируют резкий обрыв в спектре ГАЛ при  $E_0 \approx 10^{20}$  эВ.

**2. Измерения на Якутской установке.** Теперь по существу критики [15]. Одной из основных причин, которая, по мнению Ватсона, привела к недомеру числа ГАЛ с  $E_0 \geq 10^{20}$  эВ, является их пропуск мастерной системой Якутской установки. Это ошибочное мнение. Во-первых, время совпадений между двумя сцинтилляционными детекторами (площадью по 2 м<sup>2</sup>) на всех станциях не 1.2 мкс, как сообщается в [15], а равно 2 мкс. Во-вторых, Якутская установка имеет достаточно густую сеть станций, которые образуют правильные треугольники со сторонами 500 м в центре и 1000 м на периферии. С 1995 г. все станции находятся в круге с радиусом 2 км и образуют треугольную сетку со сторонами 500 м.

Каждая станция, с любыми двумя своими соседями, включена в мастерную систему, отбирающую ливни. При регистрации ГАЛ с осью внутри периметра установки в подавляющем большинстве случаев срабатывают  $\geq$  двух мастерных треугольников. Поэтому ось таких ливней всегда оказывается на расстояниях  $R \leq 1000$  м вблизи 3–4 станций с максимальными плотностями частиц.

На рис.1 для примера показаны средние экспериментальные функции пространственного распределения (ФПР) всех заряженных частиц (темные кружки) и мюонов с пороговой энергией  $E_\mu \geq 1$  ГэВ (свет-

<sup>1)</sup>e-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

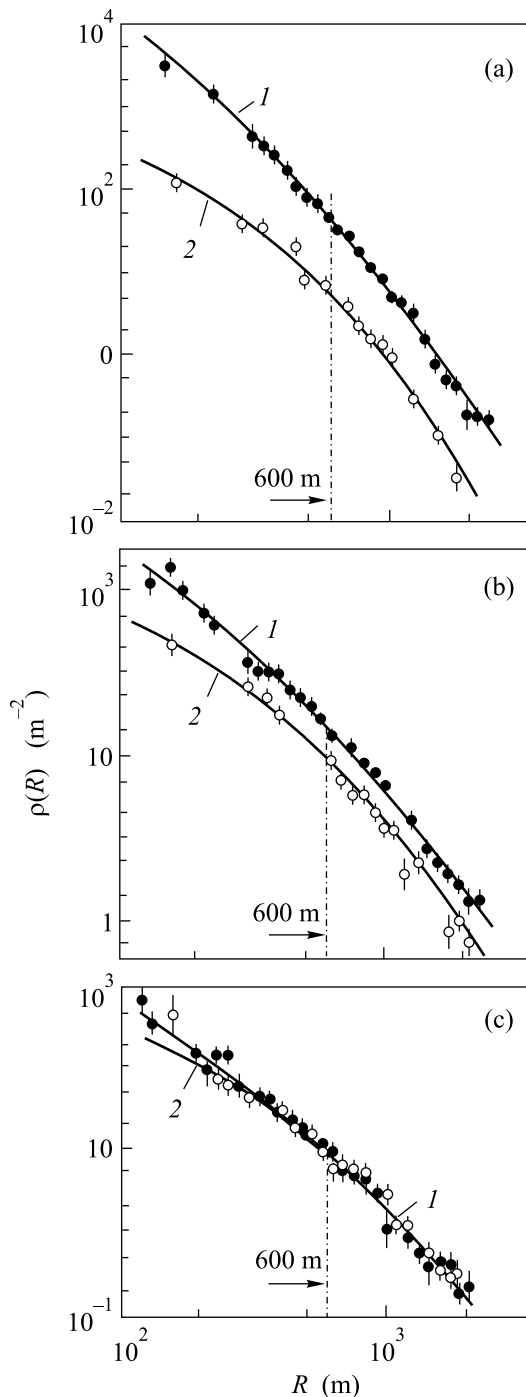


Рис.1. Пространственные распределения всех заряженных частиц (●) и мюонов (○) с пороговой энергией  $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec \theta$  ГэВ в ливнях с  $E_0 = 2 \cdot 10^{19}$  эВ: (а) –  $\langle \cos \theta \rangle \geq 0.98$ , (б) –  $\langle \cos \theta \rangle = 0.78$  и (с) –  $\langle \cos \theta \rangle = 0.58$ . Кривые 1 и 2 – аппроксимации (1) и (2) экспериментальных данных

лые кружки) в ГАЛ с  $E_0 = 2 \cdot 10^{19}$  эВ и  $\langle \cos \theta \rangle = 0.98, 0.78, 0.58$  [18]. Сплошными кривыми 1 и 2 изображены аппроксимации

$$f_s(R) = \rho_{s,600} (R/600)^{-1.3} ((R+R_M)/(600+R_M))^{1.3-b_s} \times ((R+2000)/2600)^{-3.5} \quad (1)$$

с  $b_s = 3.19, 2.67, 2.15$  и

$$f_\mu(R) = \rho_{\mu,600} (R/600)^{-0.75} ((R+280)/880)^{0.75-b_\mu} \times ((R+2000)/2600)^{-8.0} \quad (2)$$

с  $b_\mu = 1.92, 2.07$  и  $1.32$  для трех зенитных углов, соответственно. Здесь  $R_M$  – мольеровский радиус (для Якутска  $R_M = 70$  м).

На рис.1а видно, что в близких к вертикали ГАЛ плотности заряженных частиц на расстояниях  $R \approx 1000$  м составляют величину  $\approx 10 \text{ м}^{-2}$ . Соответственно через каждый детектор пройдет  $\approx 20$  частиц. Вероятность того, что два детектора на станции при такой плотности частиц не выработают за 2 мкс совпадение  $\leq 10^{-6}$ . У ливней с  $E_0 \approx 10^{20}$  эВ плотности частиц на указанном расстоянии примерно в 5 раз больше, то есть составляют величину  $\approx 50 \text{ м}^{-2}$ . Это исключает любую возможность не срабатывания мастерной системы Якутской установки.

Вторая причина, как полагает Ватсон [15], которая привела к недомеру числа ГАЛ с  $E_0 \geq 10^{20}$  эВ на Якутской установке, является недостаточное время интегрирования сигналов на станциях амплитудными преобразователями. Это вызывает, по его мнению, занижение величины  $\rho_{s,600}(\theta)$  примерно на 25%. Соответственно и энергия  $E_0$  недооценивается в 1.25 раза.

Это также ошибочное мнение. Самый большой ГАЛ был зарегистрирован на Якутской установке под углом  $\theta = 58.7^\circ$  [8]. Он почти целиком состоял из мюонов. На выходе одного из стандартных наземных сцинтилляционных детекторов была измерена форма импульса на расстоянии от оси  $R = 930$  м, ширина которого на полувысоте  $T_{1/2} \approx 200$  нс. Этот результат согласуется с измерениями формы импульсов на установке Pierre Auger Observatory [19], где в ГАЛ с  $E_0 \approx (2 - 3) \cdot 10^{19}$  эВ и  $\theta = 54^\circ$  на расстоянии от оси  $R = 977$  м на выходе водяного черенковского детектора (water Cherenkov tank) сигнал на полувысоте также имел длительность  $T_{1/2} \approx 200$  нс. Его полная ширина составила  $\approx 400$  нс. При переходе от наклонных к вертикальным ливням толщина диска на расстояниях  $R \approx 1000 - 2000$  м по данным установки AGASA [20] и расчетов [21], увеличивается за счет добавления к мюонам электронов примерно в 2 раза. Отсюда следует, что эффективная толщина диска (95% всех частиц) на уровне моря в ГАЛ с  $E_0 \approx 10^{20}$  эВ на расстоянии от оси  $R \approx 1000$  м составляет  $T_{0.95} \approx 800$  нс.

Заметим, что исследования временной структуры диска ГАЛ на установке Haverah Park [22] приводят к такому же выводу. Эта и Якутская установка расположены примерно на одинаковой высоте над уровнем моря. В этой работе измерено время  $\approx 260$  нс (на уровне от 10% до 50% полного заряда) в ГАЛ с  $E_0 = 6 \cdot 10^{19}$  эВ и  $\theta = 30^\circ$  на расстоянии от оси  $R = 1029$  м. Это время соответствует эффективной толщине диска  $T_{0.95} \approx 1250$  нс. Отсюда видно, что толщина ливневого диска всех частиц в ГАЛ с  $E_0 \approx (2 - 6) \cdot 10^{19}$  эВ составляет 0.8–1.2 мкс (в среднем  $\approx 1$  мкс) на расстоянии от оси  $R \approx 1000$  м.

Для измерения амплитудных сигналов на Якутской установке используются логарифмические RC-преобразователи ( $R, C$  – сопротивление и емкость входной цепи) с постоянной времени интегрирования  $\tau = RC \approx 10$ –12 мкс входного сигнала  $U$ :

$$U \sim \exp(-t/\tau). \quad (3)$$

Расчеты [23] показывают, что когда на детектор падают  $\geq 10$  частиц, коэффициент передачи входного сигнала  $k = U/U_0 \approx 1 + d/\tau$  ( $U_0$  – амплитуда неискаженного сигнала,  $d$  – полуширина ливневого диска). В нашем случае  $d \approx 0.5$  мкс и  $k \leq 1.05$ . Вряд ли здесь можно говорить о каком-либо недомере плотностей заряженных частиц на расстояниях  $R \leq 1000$  м, тем более при измерении  $\rho_{s,600}$ .

**3. Измерения на установке AGASA.** Таким образом, почти полное отсутствие ГАЛ с  $E_0 \geq 10^{20}$  эВ на Якутской и других мировых установках является, вероятно, реальным фактом. В связи с этим давайте еще раз критически рассмотрим метод определения энергии ГАЛ на установке AGASA. Ранее мы неоднократно сообщали о том, что при  $E_0 \geq (3 - 5) \cdot 10^{18}$  эВ ливни развиваются иначе, чем в области меньших энергий [18, 24–26]. Особенно это касается ГАЛ с предельно большими энергиями. У них существенным образом меняется пространственная структура.

Чтобы лучше понять суть проблемы, проведем сравнительный анализ ФПР на Якутской установке и AGASA. Сначала рассмотрим zenithно-угловые изменения параметров  $\rho_{s,600}(\theta)$  и  $\rho_{\mu,600}(\theta)$ , используемых на обеих установках для оценки энергии  $E_0$ . Они показаны на рис.2 для событий с  $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$  эВ (а),  $10^{19}$  эВ (б) и  $3 \cdot 10^{19}$  эВ (с) темными и светлыми значками, соответственно. Сплошными и штриховыми кривыми изображены теоретические ФПР, относящиеся к обеим установкам для заряженных частиц (1) и мюонов (2). Расчеты выполнены по модели QGSJET для первичных протонов соответственно для Якутской установки и AGASA

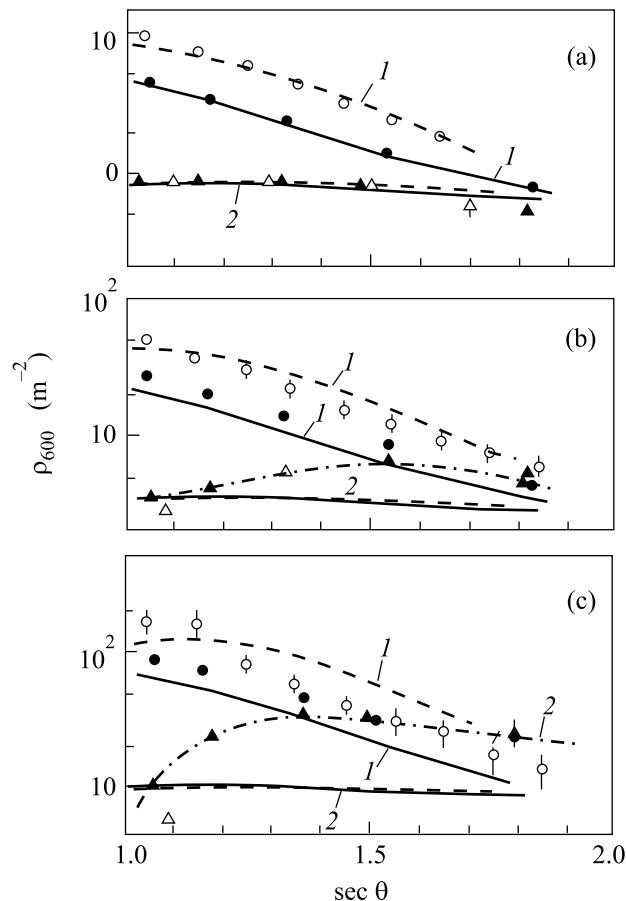


Рис.2. Zenithно-угловые зависимости параметров  $\rho_{600}$  заряженных частиц (1) и мюонов (2) от  $\sec \theta$  при  $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$  эВ (а),  $10^{19}$  эВ (б) и  $3 \cdot 10^{19}$  эВ (с) по данным Якутской установки ( $\bullet$ ,  $\blacktriangle$ ) и AGASA ( $\circ$  – [27],  $\triangle$  – [28]). Сплошные и штриховые кривые – расчет [26] по модели QGSJET для первичных протонов соответственно для Якутской установки и AGASA

установке AGASA методом линий равных интенсивностей [27], а  $\rho_{\mu,600}(\theta)$  на этой установке относятся к мюонам с порогом  $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec \theta$  ГэВ [28].

Видно, что при  $E_0 = 2 \cdot 10^{18}$  эВ (рис.2а) наблюдается согласие всех экспериментальных данных с расчетами. В ГАЛ такого согласия нет. Данные Якутской установки показывают, что при  $E_0 = 10^{19}$  эВ измеренные энергии больше расчетных значений в  $\sim 1.25$  раза (рис.2б). Более сильные изменения претерпевают  $\rho_{\mu,600}(\theta)$  (штрихпунктир), которые в наклонных событиях ( $\theta \geq 52^\circ$ ) совпадают с  $\rho_{s,600}(\theta)$ . В данных AGASA намечается тенденция, наоборот, к занижению экспериментальных  $\rho_{s,600}(\theta)$  в интервале zenithных углов  $35^\circ$ – $50^\circ$  в  $\sim 1.25$  раза.

Отмеченная выше аномалия развития ГАЛ быстро усиливается с ростом энергии первичного косми-

ческого излучения. Это хорошо видно на рис.2с для ливней с  $E_0 = 3 \cdot 10^{19}$  эВ. Все экспериментальные данные полностью противоречат предсказаниям модели QGSJET. Это противоречие не связано с относительно малой статистикой событий. Наметившееся изменение  $\rho_{\mu,600}(\theta)$  в данных Якутской установки (штрихпунктир 2) усиливается еще больше и составляет примерно трехкратное увеличение в сравнении с расчетами при  $\theta \geq 35^\circ$ . Экспериментальные  $\rho_{s,600}(\theta)$  в близких к вертикали ГАЛ больше расчетных в  $\sim 1.4$  раза, а при  $\theta \geq 45^\circ$  совпадают с  $\rho_{\mu,600}(\theta)$ . Измеренные AGASA величины  $\rho_{s,600}(\theta)$  также при  $\theta \leq 30^\circ$  больше расчетных в  $\sim 1.4$  раза, а в более наклонных ливнях быстро убывают, идут при  $\theta \geq 37^\circ$  ниже расчетов в  $\sim 1.4$  раза и сравниваются при  $\theta \geq 45^\circ$  с данными Якутской установки.

Отсюда следует, что в этих ливнях на указанном расстоянии от оси при  $\theta \geq 45^\circ$  регистрируются одни мюоны с энергией  $E_\mu \geq 1.5$  ГэВ. Здесь нет более “мягких” мюонов и, тем более, электронов. По-видимому, с приближением энергии ГАЛ к предельному значению отмеченная выше тенденция будет еще больше усиливаться. Не учет этого обстоятельства приводит, вероятно, к большим ошибкам в оценках  $E_0$ .

Теперь обратим особое внимание на некоторые важные детали рис.2с. При  $\sec\theta \leq 1.2$  измеренные  $\rho_{s,600}(\theta)$  на обеих установках оказались в  $\approx 1.5$  раза больше, а  $\rho_{\mu,600}(\theta)$  по данным AGASA – в 1.7 раза меньше теоретических величин. С точки зрения продольного развития ГАЛ это может означать аномально более глубокое положение максимума каскадной кривой. Экспериментально такое предположение подтверждают данные на рис.3 для ГАЛ с  $E_0 = 1.3 \cdot 10^{19}$  эВ (а) и  $3.3 \cdot 10^{19}$  эВ (б), полученные на установке Pierre Auger Observatory [29]. Видно, что измеренные величины  $X_m \approx 950 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  действительно на  $\Delta X_m \approx 160 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$  больше, чем ожидается ( $X_m \approx 790 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ ) по модели QGSJET для первичных протонов. Такая ситуация для AGASA, расположенной на высоте  $920 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ , может оказаться драматической. Ведь глубина, максимум, развития ГАЛ при  $E_0 \approx 10^{20}$  эВ лежит непосредственно в плоскости установки (или ниже ее). Здесь нужны уже иные расчеты для интерпретации экспериментальных данных, чем использовались ранее в области меньших энергий ШАЛ.

Отметим еще одну интересную особенность данных на рис.2с. Видно, что все экспериментальные  $\rho_{s,600}(\theta)$ , измеренные на Якутской установке, идут хотя и выше, но параллельно расчетным величинам. А вот данные AGASA (светлые кружки) ведут се-

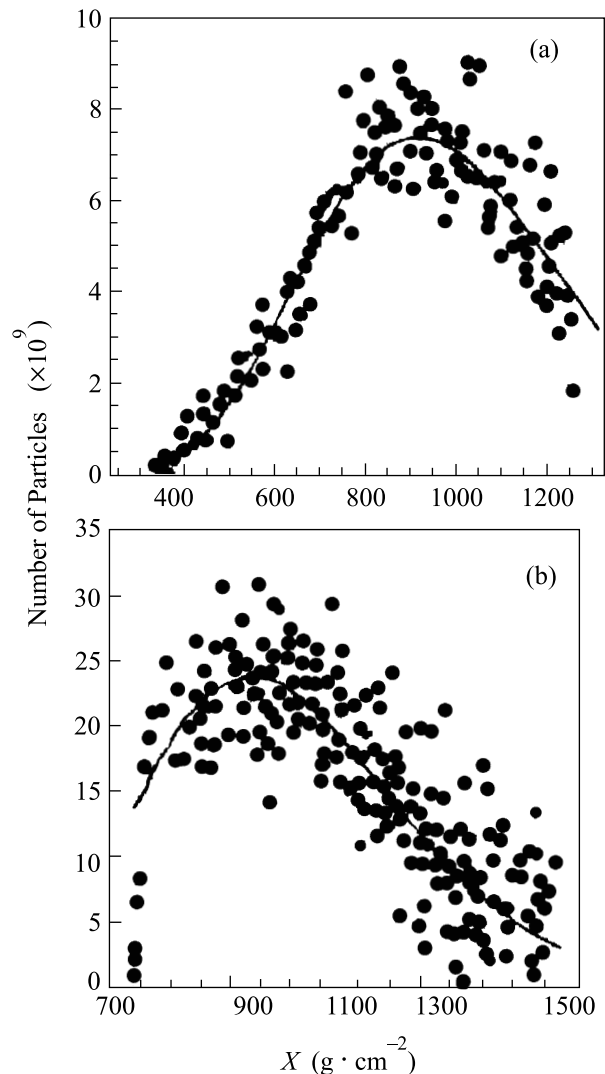


Рис.3. Каскадные кривые ГАЛ с  $E_0 = 1.3 \cdot 10^{19}$  эВ (а) и  $3.3 \cdot 10^{19}$  эВ (б), полученные на установке Pierre Auger Observatory [29]

бя по-другому. Они пересекают теоретическую кривую 1. Причем увеличение  $\rho_{s,600}(\theta)$  в близких к вертикали ГАЛ (при  $\sec\theta \leq 1.2$ ) по сравнению с наклонными событиями относительно расчетов составляет величину  $\approx 2.5$ . Данные на рис.2а не имеют такой особенности. Мы полагаем, что это может быть чисто методической ошибкой эксперимента. В методе линий равных интенсивностей, который был использован AGASA для получения указанных выше данных, такая ситуация сложилась, вероятно, из-за неконтролируемого роста  $\rho_{s,600}(\theta)$  при переходе от наклонных к вертикальным событиям.

Покажем на примере одного из самых больших ливней AGASA, как это могло быть. На рис.4а темными кружками изображена ФПР заряженных час-

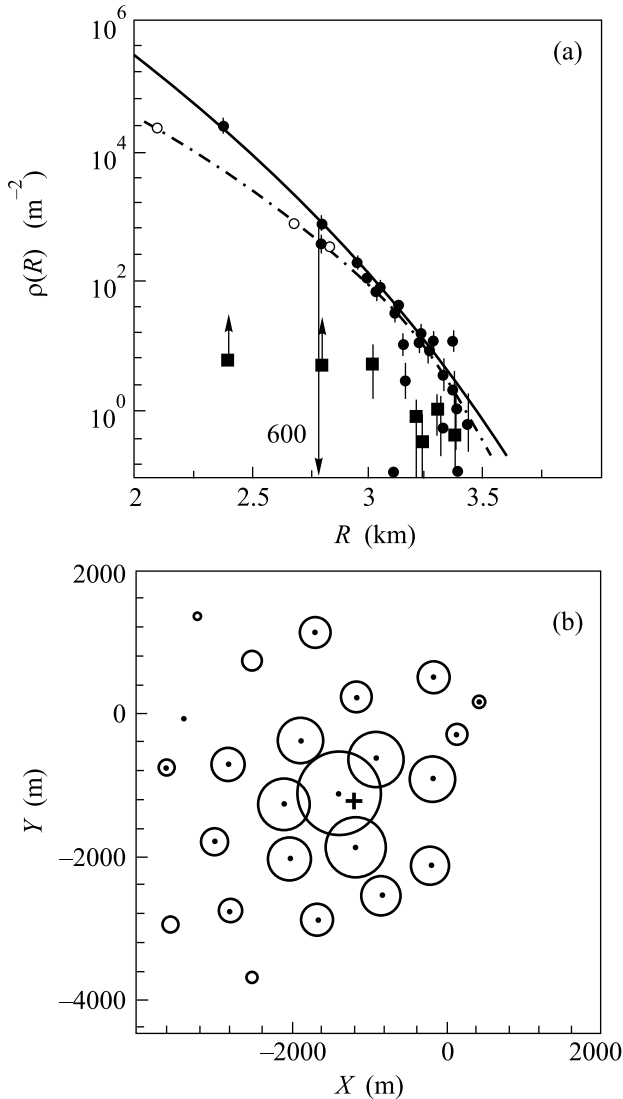


Рис.4. Один из самых больших ливней AGASA с  $E_0 \approx (1.7 - 2.6) \cdot 10^{19}$  эВ и  $\theta \approx 23^\circ$  [30]: (а) ФПР заряженных частиц (●) и мюонов (■) с порогом  $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec \theta$  ГэВ; сплошная и штрихпунктирная кривые – аппроксимации (4) и предполагаемая нами; (б) – карта плотностей в плане установки; радиусы кругов пропорциональны логарифму плотности в каждом детекторе; + – положение оси ливня согласно [30]

тиц ГАЛ с энергией  $E_0 \approx (1.7 - 2.6) \cdot 10^{19}$  эВ и  $\theta \approx 23^\circ$  [30]. Сплошная кривая соответствует аппроксимации

$$\rho_s(R) \sim (R/R_M)^{-1.2} (1 + R/R_M)^{1.2 - \eta} (1 + (R/1000)^2)^{-0.6} \quad (4)$$

с  $R_M = 91.6$  м и с параметром

$$\eta = 3.97 - 1.79(\sec \theta - 1), \quad (5)$$

которая использовалась для нахождения координат оси ливня (крестик на рис.4б). Темными квадра-

тами показаны плотности мюонов с порогом  $E_\mu \approx 1.0 \cdot \sec \theta$  ГэВ. Стрелки означают насыщение детекторов. Глубина атмосферы для этого события составляет  $X = 920 \cdot \sec \theta \approx 1000$  г · см<sup>-2</sup>.

Теперь посмотрим, что произойдет, если обработать данные с помощью другой, более “горбатой” ФПР (штрихпунктир на рис.4а). В результате ось ГАЛ заметно приблизится к детекторам с наибольшими плотностями частиц: первый детектор с максимальным числом частиц (23682) станет ближе к новой оси на  $\approx 120$  м (светлый кружок), следующий (687 частиц) приблизится к ней на  $\approx 100$  м. Третий детектор (357 частиц) отодвинется на  $\approx 30$  м, а на остальные точки рис.4а указанный сдвиг координат оси почти не влияет. Это приводит к уменьшению  $\rho_{s,600}(\theta) = 892$  м<sup>-2</sup>, найденного AGASA, в  $\approx 2.5$  раза. Соответственно во столько же раз уменьшится и  $E_0$ .

Штрихпунктир на рис.4а является всего лишь нашим предположением, грубым, но вполне возможным, так как подавляющее большинство плотностей ГАЛ AGASA измеряются на расстояниях  $R > 600$  м. Ранее [18, 26] и на рис.2 мы показали, что ФПР заряженных частиц в ГАЛ по данным Якутской установки существенно меняются. Рассмотрим, к чему это может привести в случае AGASA. Воспользуемся ФПР на рис.1а (для глубины атмосферы  $X = 1040$  г · см<sup>-2</sup>) и заменим в аппроксимации (1) мольеровский радиус  $R_M = 70$  м на 91.6 м. Результат показан на рис.5 сплошной кривой. Штриховой кривой на этом рисунке изображена аппрок-

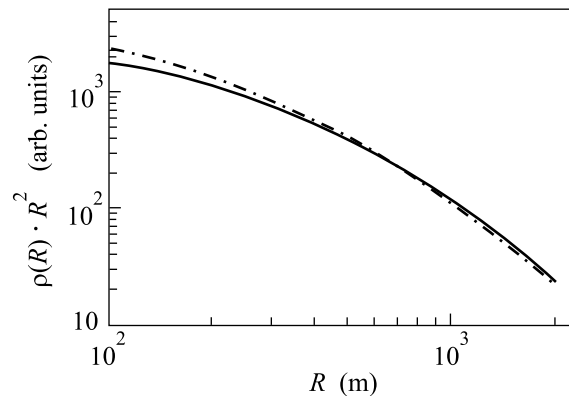


Рис.5. ФПР всех заряженных частиц ГАЛ с  $E_0 = 2 \cdot 10^{19}$  эВ на глубине атмосферы  $X = 1040$  г · см<sup>-2</sup>: сплошная кривая – аппроксимация (1) с  $b_s = 3.19$ ,  $\cos \theta = 0.98$  и  $R_M = 91.6$  м; штриховая кривая – аппроксимация (4) с  $\eta = 3.74(\sec \theta = 1.13)$

симация (4) для той же глубины атмосферы (с параметром  $\eta = 3.74$ , который соответствует (5) для

сек  $\theta = 1.13 = 1040/920$ ). Обе кривые нормированы между собой при  $R = 1000$  м.

Видно, что формы ФПР на рис.5 почти не различимы на расстояниях  $R \approx 600-2000$  м. Это еще один аргумент в пользу неискаженных измерений плотностей заряженных частиц Якутской установкой на периферии ГАЛ. Однако ближе к оси аппроксимация (1) идет лучше, чем (4). Вероятно, по мере приближения энергии ГАЛ к предельному значению указанная тенденция быстро усиливается. Ситуация усугубляется тем обстоятельством, что максимум каскадной кривой оказывается почти на уровне установки. Здесь многие частицы пересекают сцинтилляционные детекторы на расстояниях  $R > 1000$  м под очень малыми углами к их поверхности. В таких условиях их отклики на потоки частиц могут существенно отличаться от того, что наблюдается в области гораздо меньших энергий ШАЛ.

**4. Заключение.** Из сказанного выше видно, что увеличение числа событий с  $E_0 \sim 10^{20}$  эВ на действующих установках или за счет строительства установок с гигантскими площадями ( $\sim 1000-5000$  км<sup>2</sup>) и с раздвижением между детекторами 1–1.5 км [12, 13] может ничего не дать в решении вопроса о предельных энергиях ГАЛ. На наш взгляд, какие-либо экстраполяции не только расчетных (сделанных при  $E_0 \leq (2-3) \cdot 10^{18}$  эВ), но и экспериментальных зависимостей в эту область недопустимы. Они могут привести к большим ошибкам в оценках энергии первичных частиц. Здесь нужны отдельные исследования ФПР заряженных частиц и мюонов на установках с раздвижением детекторов не более 200–300 м. Что касается критики [15] методов регистрации и оценки энергии ГАЛ на Якутской установке, то с ней вряд ли можно согласиться. По-видимому, здесь сказался определенный недостаток пропаганды с нашей стороны технических характеристик Якутской установки в широкой печати.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки России Якутской комплексной установки ШАЛ (рег. #01-30), включенной в “Перечень уникальных научно-исследовательских и экспериментальных установок национальной значимости”.

1. J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **10**, 146 (1963).
2. D. M. Edge, A. C. Evans, H. J. Garmston et al., J. Phys. **A6**, 1612 (1973).
3. C. J. Bell et al., J. Phys. **A7**, 990 (1974).
4. D. D. Krasilnikov, A. I. Kuzmin, J. Linsley et al., J. Phys. **A7**, 176 (1974).
5. K. Greisen, Phys. Rev. Lett. **2**, 748 (1966).

6. Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **4**, 78 (1966).
7. *Catalog of Highest Energy Cosmic Rays. Giant Extensive Air Showers*, N1, World Data Center C2 for Cosmic Rays, Japan, 1980.
8. N. N. Efimov, T. A. Egorov, A. V. Glushkov et al., in *Proc. of Intern. Workshop of Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays, Kofu*, 1990 p. 20.
9. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al., ICRP Report (Tokyo) **324-94-19** (1994).
10. D. J. Bird, S. C. Corbato, H. Y. Dai et al., *Astrophys. J.* **424**, 491 (1994).
11. N. Chiba, K. Hashimoto, N. Hayashida et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **A311**, 338 (1992).
12. J. C. Cronin et al., Preprint EHI 92-08, University of Chicago, 1992.
13. M. Teshima, M. Bessho, H. Y. Dai et al., *Proc. RIKEN, Intern. Workshop on Electromagnetic and Nuclear Cascade Phenomena at High and Extremely High Energies*, 1993, p. 135.
14. M. Takeda, N. Sakaki, K. Honda et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 381.
15. A. A. Watson, in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 373.
16. M. Ave, J. A. Hinton, J. Knapp et al., in *Proc. 27th ICRC, Hamburg*, **1**, 2001, p. 381.
17. T. Abu-Zayyad, G. Archbold, J. A. Bellido et al., arxiv: astro-ph/0208243, 5 Sep (2002).
18. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **63**, 1557 (2000).
19. J. Bluemer et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 445.
20. K. Honda, K. Hashimoto, N. Kawasumi et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 361.
21. T. Suomijarvi et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 473.
22. M. Ave, J. Knapp, M. Marchesini et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 349.
23. А. Н. Гадалов, А. В. Глушков, Т. А. Егоров и др., сб. *Экспериментальные методы исследования космических лучей сверхвысоких энергий*, Якутск, 1974, стр 30.
24. А. В. Глушков, И. Т. Макаров, Е. С. Никифорова и др., ЯФ **58**, 1265 (1995).
25. А. В. Глушков, И. Т. Макаров, М. И. Правдин и др., Письма в ЖЭТФ **71**, 145 (2000).
26. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **65**, 1346 (2002).
27. M. Nagano, D. Heck, S. Shinozaki et al., Preprint FZKA № 6191, Karlsruhe, 1998.
28. S. Yoshida, N. Hayashida, K. Honda et al., *J. Phys.* **G20**, 651 (1994).
29. S. Argiro et al., in *Proc. 28th ICRC, Tsukuba*, **1**, 2003, p. 457.
30. N. Hayashida, K. Honda, M. Honda et al., *Phys. Rev. Lett.* **73**, 39 (1994).