

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И АНИЗОТРОПИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ С $E_0 \geq 10^{17}$ эВ ПО ДАННЫМ ЯКУТСКОЙ УСТАНОВКИ ШАЛ

A. B. Глушков^{*}, M. I. Правдин

*Институт космофизических исследований и аэрономии Якутского научного центра им. Ю. Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук
677891, Якутск, Россия*

Поступила в редакцию 22 ноября 2004 г.

Приведены результаты анализа энергетического спектра и анизотропии первичного космического излучения (ПКИ) с энергией $E_0 \geq 10^{17}$ эВ по данным Якутской установки широких атмосферных ливней за период 1974–2004 гг. Показано, что спектры из разных областей неба отличаются друг от друга по форме. При $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ из дисков Галактики и Сверхгалактики (Местного сверхскопления галактик) идут повышенные, а при $E_0 \leq (2-3) \cdot 10^{18}$ эВ — пониженные потоки частиц. Это интерпретируется как проявление возможного взаимодействия внегалактического ПКИ с веществом указанных структур пространства.

PACS: 95.30.-k, 96.40.Pq, 96.40.-z, 98.70.-f

1. ВВЕДЕНИЕ

Космические лучи сверхвысоких энергий ($E_0 \geq 10^{17}$ эВ) регистрируются на Якутской установке широких атмосферных ливней (ШАЛ) с 1970 г., а в режиме устойчивой работы — с 1974 г. За этот период времени по мере накопления экспериментальных данных мы неоднократно сообщали результаты своих исследований энергетического спектра первичного космического излучения (ПКИ) [1–5]. Форма и интенсивность спектра в области обрыва (около 10^{20} эВ), предсказанного Запепиным, Кузьминым [6] и Грейзеном [7], имеют важное значение для выявления состава ПКИ и источников их образования. Экспериментальные результаты, полученные на разных установках [5, 8, 9], в два раза различаются между собой по абсолютной интенсивности, но близки по форме. Изменение интенсивности не описывается единой степенной зависимостью. Форма спектра при $E_0 > 10^{19}$ эВ соответствует предположению, что основной поток ПКИ образуется во внегалактических источниках [10, 11]. В этом случае должен наблюдаться обрыв спектра около 10^{20} эВ. Результаты Якутской

установки [3–5] и американской установки HiRes [9] согласуются с этим, а результаты, полученные на установке AGASA (Akemo Giant Air Shower Array) с большим числом событий при $E_0 \geq 10^{20}$ эВ, противоречат такому выводу [8]. Эта проблема рассмотрена нами в работах [12, 13].

До сих пор энергетический спектр изучался без учета расположения участков неба, откуда приходит ПКИ. Однако, как показали наши исследования [14–23], в разных областях энергии первичных частиц наблюдается заметное отклонение их потока от изотропии. Ниже мы рассмотрели влияние этого фактора на энергетический спектр и проблему происхождения ПКИ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ в целом.

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Измерение энергии первичных частиц и интенсивности их потока на Якутской установке производится по классификационным параметрам, которые определяются с минимальными искажениями [2–5]. До 1992 г. ливни отбирались по всей площади установки станциями, образующими равносторонние треугольники со сторонами 1 км — большой «мастер». Такие «мастерные» треугольники отбира-

*E-mail: a.v.glushkov@ikfia.ysn.ru

ют ШАЛ с $E_0 \geq 10^{18}$ эВ. Для них классификационным параметром является $\rho_{S,600}(\theta)$ — плотность заряженных частиц, измеряемая наземными сцинтиляционными детекторами на расстоянии $R = 600$ м от оси ливня с зенитным углом θ . В центре установки на площади с диаметром 1 км расстояние между мастеровыми станциями равно 500 м (малый «мастер»). Здесь регистрируются в основном ливни с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ, у которых лучше определяется $\rho_{S,300}(\theta)$. После 1992 г. почти вся площадь установки стала управляться малым мастером. Это позволило исследовать спектр вплоть до его правой границы с однородными условиями отбора событий.

Для определения координат оси и параметров $\rho_{S,600}$ ($\rho_{S,300}$) используется функция пространственного распределения (ФПР) заряженных частиц в аппроксимации Грейзена–Линсли с параметрами, полученными на Якутской установке [24]:

$$f(R) \propto (R/R_M)^{-1}(1+R/R_M)^{1-b}, \quad (1)$$

где R_M — мольеровский радиус (для Якутска $\langle R_M \rangle \approx 70$ м). Однако позже мы установили [25], что эта ФПР для ливней с $E_0 \geq 10^{19}$ эВ плохо соответствует экспериментальным данным на расстояниях $R > 1000$ м от оси. Была предложена модифицированная аппроксимация

$$f(R) \propto (R/R_M)^{-1.3} \times (1+R/R_M)^{1.3-b} (1+R/2000)^{-3.5}. \quad (2)$$

Для ШАЛ с $E_0 \geq 2 \cdot 10^{19}$ эВ параметр b почти не меняется, но зависит от зенитного угла. В работе [13] мы определяли ось в таких ливнях по этой уточненной ФПР. В результате оценки $\rho_{S,600}$ увеличились в среднем приблизительно на 10 % для ливней, ось которых расположена внутри границ установки, и до 20 % для ливней, ось которых расположена на ее периферии.

При определении интенсивности при стандартной обработке используется эффективная площадь, в пределах которой вероятность регистрации событий $P \geq 0.9$ с учетом флуктуаций наклона ФПР. Суммарная экспозиция в зависимости от $\rho_{S,600}$ ($\rho_{S,300}$) и зенитного угла рассчитывается с учетом реально работающих в данный момент станций. Преодолеваемая площадь ограничивается контуром соответствующего триггера.

Для оценки энергии ШАЛ в настоящей работе использованы следующие соотношения:

$$E_0 = (4.8 \pm 1.6) \cdot 10^{17} (\rho_{S,600}(0^\circ))^{1.00 \pm 0.02} [\text{эВ}], \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho_{S,600}(0^\circ) &= \rho_{S,600}(\theta) \times \\ &\times \exp((\sec \theta - 1) \cdot 1020/\lambda_\rho) [\text{м}^{-2}], \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda_\rho = (450 \pm 44) + (32 \pm 15) \lg(\rho_{S,600}(0^\circ)) [\text{г}/\text{см}^2]. \quad (5)$$

Ошибка в формуле (3) определяется, главным образом, точностью абсолютной калибровки детекторов черенковского излучения и ошибкой определения средней прозрачности атмосферы [2, 3]. Она не влияет на форму спектра, но является существенной для оценки интенсивности.

3. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР

На рис. 1а темными значками показан дифференциальный энергетический спектр, полученный в [13] для малого (квадраты) и большого (треугольники

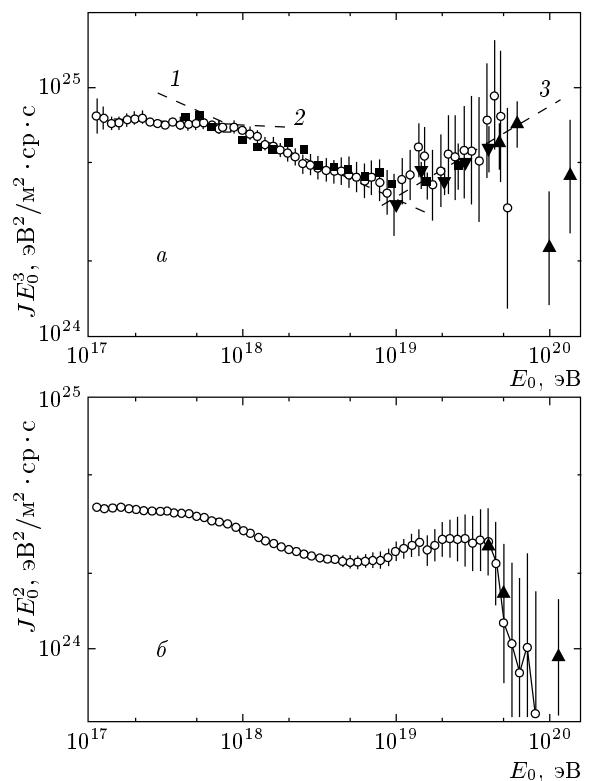


Рис. 1. Дифференциальный (а) и интегральный (б) энергетические спектры, полученные на Якутской установке ШАЛ: о — настоящая работа; наши результаты [13] для малого (□) и большого (▼) мастеров в пределах границ установки; ▲ — выборка событий с $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$ эВ по расширенной площади, с выходом осей за пределы установки; штриховые линии — аппроксимации $J(E_0) \approx E_0^{-\gamma}$ с показателями $\gamma_1 = 3.02 \pm 0.02$, $\gamma_2 = 3.27 \pm 0.05$ и $\gamma_3 = 2.62 \pm 0.17$

вниз) мастеров в пределах границ установки, а также для выборки событий с $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$ эВ по расширенной площади, с выходом осей за пределы установки (треугольники вверх). Ливни взяты с $\cos \theta \geq 0.5$ ($\theta \leq 60^\circ$) и разбиты на интервалы по энергии с шагом $\lg E_0 = 0.1$.

Форма спектра [13] в целом не отличается от полученных нами ранее результатов [4, 5]. Однако жесткий отбор ливней для энергетического спектра приводит к потере почти всех данных с $E_0 < 4 \cdot 10^{17}$ эВ. Это происходит из-за отбора лишь наиболее эффективно зарегистрированных ливней (с вероятностью $P \geq 0.9$), которые фиксируются мастерными станциями при прохождении через них не менее 8 частиц. Фактически этот критерий нужен для правильной оценки площади сбора событий (при заданных E_0 и θ), которая вычисляется путем численного моделирования всего эксперимента. Здесь очень важную роль играют флуктуации развития ШАЛ, которые не всегда и не в полной мере известны.

В настоящее время на Якутской установке зарегистрировано около $1.2 \cdot 10^6$ ливней. Мы провели дополнительный анализ событий при $10^{17} \leq E_0 < 10^{18}$ эВ с точки зрения возможности более полного их использования для построения энергетического спектра. Оказалось, что эффективную площадь регистрации таких ливней можно найти эмпирически. Это демонстрирует спектр, показанный на рис. 1а светлыми кружками. Он получен для ШАЛ с $\cos \theta \geq 0.6$ при разбиении всего массива данных на интервалы с шагом $\Delta \lg E_0 = 0.05$. В указанной выше области энергий мы ограничились рассмотрением лишь шести мастерных треугольников в центральном круге установки с радиусом $R = 500$ м. В спектр вошли все ливни, которые были отобраны любым из этих треугольников без какой-либо селекции по числу частиц, прошедших через станции. При этом лишь требовалось, чтобы ось ливня попала в один из шести кругов с радиусом r , вписанный в один из шести названных выше мастерных треугольников. Искомая интенсивность (при заданных E_0 и θ) находилась увеличением размеров этих кругов (начиная с $r_1 = 20$ м) путем последовательного увеличения их радиуса $r_i = 20 + 10(i-1)$ до тех пор, пока она не начинала уменьшаться. В этом случае $i+1$ итерация вычисления интенсивности в заданном интервале энергий (с шагом $\Delta \lg E_0 = 0.05$) прекращалась и возобновлялась вновь (с $r_1 = 20$ м) в следующем интервале энергий.

На рис. 1а видно, что оба метода дают одинак-

ковые результаты. Здесь отчетливо выделяются три характерных участка спектра. Первый из них (штриховая линия 1) соответствует степенному закону

$$J(E_0) \propto E_0^{-\gamma} \quad (6)$$

с показателем $\gamma_1 = 3.02 \pm 0.02$. Второй в интервале энергий $E_0 = (0.7-10) \cdot 10^{18}$ эВ удовлетворяет (6) с $\gamma_2 = 3.27 \pm 0.05$. И, наконец, третий (штриховая линия 3) отражает наиболее пологий участок спектра с показателем $\gamma_3 = 2.62 \pm 0.17$. Ниже мы рассмотрим и обсудим вид спектра более подробно. А пока обратим лишь внимание на небольшой пик при $E_0 \approx (1-2) \cdot 10^{19}$ эВ. Недавно по данным Якутской установки методом вейвлет-анализа здесь обнаружена локальная область избытка космических лучей в направлениях их прихода на уровне значимости 0.007 [26]. Полюс с максимальным числом событий имеет экваториальные координаты $\alpha_{max} \approx 35^\circ \pm 20^\circ$ и $\delta_{max} \approx 52.5^\circ \pm 7.5^\circ$ и лежит в плоскости Сверхгалактики (Местного сверхскопления галактик).

На рис. 1б показан интегральный спектр (35935 событий), полученный из дифференциального, представленного на рис. 1а. Треугольниками приведены результаты из работы [13] для выборки событий с $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$ эВ по расширенной эффективной площади с незначительным выходом осей за пределы установки. Видно, что сложная форма энергетического спектра здесь передается с гораздо большей точностью. Поэтому в ходе дальнейшего анализа мы будем использовать интегральные спектры.

В работах [14–23] показано, что при $E_0 \geq 10^{17}$ эВ в направлениях прихода ПКИ наблюдается заметное отклонение потока частиц от изотропии. В разных интервалах энергии анизотропия имеет разную величину и направленность. Мы полагаем, что эта особенность ПКИ может отразиться в энергетическом спектре, полученном для событий из разных областей неба. Рассмотрим в первую очередь Галактику. На рис. 2а темными и светлыми кружками показаны спектры для 28431 и 7504 ливней соответственно из северных ($b_G > 0^\circ$) и южных ($b_G < 0^\circ$) широт. Здесь видны некоторые важные детали, которыми различаются оба спектра. Во-первых, при $5 \cdot 10^{18} < E_0 < 2 \cdot 10^{19}$ эВ хорошо заметна северо-южная асимметрия, которую мы неоднократно отмечали ранее [14, 15, 22, 27]. Во-вторых, статистически значимый избыток ПКИ из южных широт наблюдается также в области меньших энергий, с максимумом при $E_0 \approx 5 \cdot 10^{17}$ эВ.

Чтобы иметь более полную картину, рассмотрим дополнительно спектр ПКИ из других областей Галактики. На рис. 2б показаны две примерно одинако-

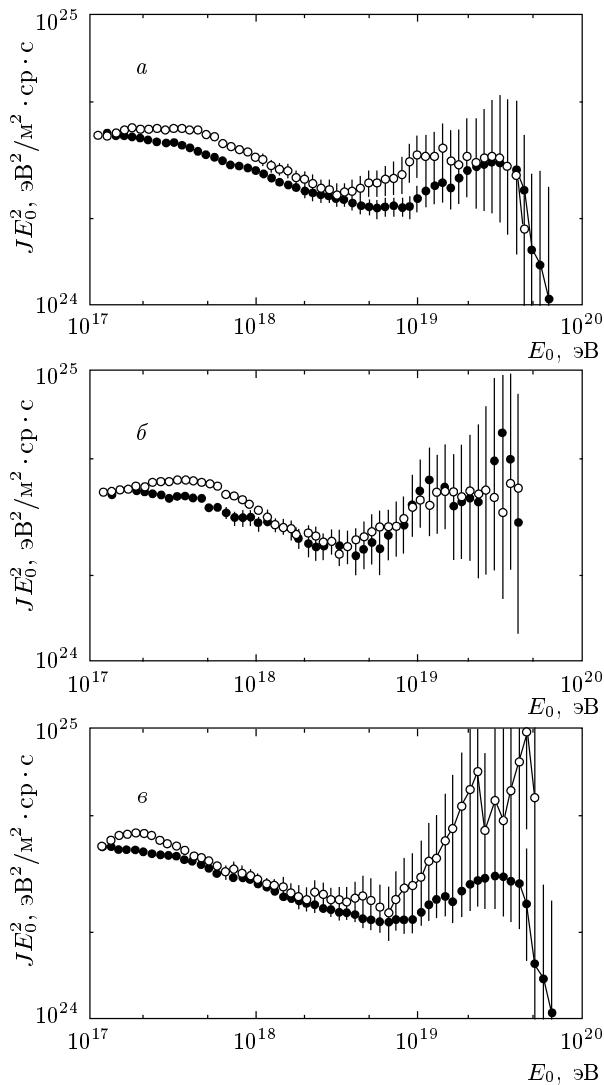


Рис. 2. Интегральные энергетические спектры: *a* — для 28431 и 7504 ливней с направлениями прихода в северном (●) и южном (○) полушариях Галактики, соответственно; *б* — для 3270 и 4234 ливней с направлениями прихода $-10^\circ < b_G < 0^\circ$ (●) и $b_G \leq -10^\circ$ (○), соответственно; *в* — для 28431 и 3276 ливней с направлениями прихода $b_G > 0^\circ$ (●) и $b_G \geq 60^\circ$ (○) в северном полушарии Галактики, соответственно

вые выборки ливней, приходящих только из южных широт. Спектр одной из них (3270 ливней) изображен темными кружками. Он содержит события из непосредственно примыкающей к диску Галактики полосы широт $-10^\circ < b_G < 0^\circ$. Вторая выборка из 4234 ливней (светлые кружки) включает в себя более южные широты $b_G \leq -10^\circ$. Видно, что именно она формирует отмеченную выше нерегулярность

спектра при $E_0 \approx 5 \cdot 10^{17}$ эВ.

На рис. 2 α светлыми кружками показан спектр ПКИ из полярной ($b_G \geq 60^\circ$) области Галактики для 3276 ливней. Темными кружками изображен спектр для всех событий с $b_G > 0^\circ$ (он приведен на рис. 2*a*). Видно, что эти спектры также существенно отличаются друг от друга по форме. В области максимальных энергий ($E_0 \geq 6 \cdot 10^{18}$ эВ) наблюдается самый большой пик по сравнению с предыдущими спектрами. Кроме того, при $E_0 \approx 2 \cdot 10^{17}$ эВ имеется еще один заметный пик. Все это говорит о сложном процессе формирования потоков ПКИ, идущих из разных участков неба.

В работе [28] группа AGASA нашла при $E_0 \approx (5-20) \cdot 10^{17}$ эВ значимую анизотропию, обусловленную повышенным потоком ПКИ из области, расположенной рядом с центром Галактики. Этот результат подтвердил и уточнил австралийская группа на установке SUGAR (Sydney University Giant Air Shower Recorder) [29]. По мнению авторов [28], этот поток может быть обусловлен нейтронами. Высказывается предположение [30], что такие нейтроны могут образоваться в результате нескольких последних гамма-вспышек (gamma-ray bursts) в нашей Галактике.

В этой связи определенный интерес вызывает спектр частиц сверхвысоких энергий, приходящих непосредственно из диска Галактики. Мы рассмотрели выборку (3713) ливней с направлениями прихода в полосе широт $|b_G| \leq 5^\circ$. Диск представлен здесь в секторе с галактической долготой $40^\circ < l_G < 200^\circ$, доступном для наблюдения на Якутской установке. Спектр из этой области Галактики показан на рис. 3*a* светлыми кружками. Для сравнения на этом же рисунке темными кружками изображен «фоновый» спектр, построенный точно так же из 22465 ливней, направления прихода которых имеют галактическую широту $|b_G| > 10^\circ$, т. е. лежат вне экваториальной области Галактики. Мы исключили из «фонового» спектра также все события с $|b_{SG}| \leq 10^\circ$, попадающие в экваториальную область Сверхгалактики. Вклад Сверхгалактики весьма ощутим [14–23] и будет рассмотрен нами ниже. А пока заметим, что плоскости Галактики и Сверхгалактики расположены почти перпендикулярно друг другу. Они пересекаются в обозреваемой Якутской установкой части неба при галактической долготе $l_G \approx 137.4^\circ$.

На рис. 3*a* при $E_0 > (5-7) \cdot 10^{18}$ эВ отчетливо видно избыточное излучение из диска Галактики, заметно превышающее фоновое. Максимальный вклад приходится на область пересечения плоскостей Га-

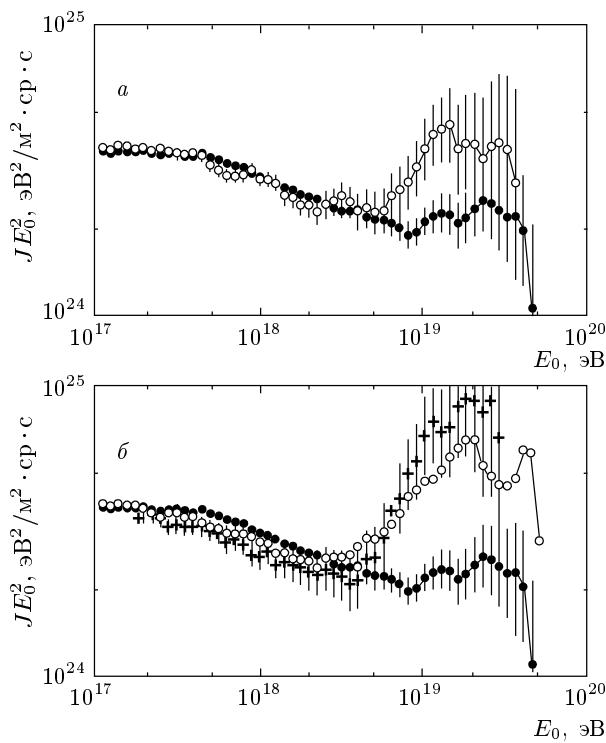


Рис. 3. Интегральные энергетические спектры: • — для 22465 ливней с направлениями прихода вне экваториальных областей Галактики и Сверхгалактики ($|b_G| > 10^\circ$ и ($|b_{SG}| > 10^\circ$); ○ — для 3713 ливней с широтой $|b_G| \leq 5^\circ$ Галактики (а) и для 4295 ливней в полосе широт $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$ Сверхгалактики (б); + — для ливней из области неба с $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$ и $100^\circ < l_{SG} < 130^\circ$

лактики и Сверхгалактики [23]. При $E_0 < 5 \cdot 10^{18}$ эВ оба спектра почти не различимы. Это вряд ли согласуется с результатами [28, 29], где обнаружен поток частиц из центральной области Галактики. Вместо ожидаемого нами избытка на рис. 3а имеется лишь некоторое систематическое занижение интенсивностей в спектре из диска Галактики в интервале $5 \cdot 10^{17} < E_0 < 2 \cdot 10^{18}$ эВ с небольшим пиком при $E_0 \approx 10^{18}$ эВ. Ниже мы еще вернемся к этому вопросу.

Теперь рассмотрим спектр ПКИ из диска Сверхгалактики. Он показан на рис. 3б светлыми кружками и включает в себя 4295 ливней. Мы построили его для событий из области с сверхгалактическими широтами $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$. Ошибки интенсивностей не приведены, чтобы не загромождать рисунок (они примерно такие же, как в спектре из диска Галактики на рис. 3а). Темными кружками показан «фоновый» спектр, изображенный аналогичными кружками на рис. 3а.

Здесь сразу же обращают на себя внимание некоторые важные, на наш взгляд, моменты. Во-первых, при $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ в экваториальной области Сверхгалактики отчетливо видно избыточное излучение, превышающее излучение из диска Галактики. Оно заметно усиливается (крестики), если в диске Сверхгалактики взять более узкий сектор ($100^\circ < l_{SG} < 130^\circ$), с максимумом потока частиц в направлении с экваториальными координатами $\alpha \approx 79^\circ$ и $\delta \approx 74^\circ$. Во-вторых, при $5 \cdot 10^{17} < E_0 < 2 \cdot 10^{18}$ эВ из диска Сверхгалактики приходит приблизительно на 10–15 % меньше частиц, чем наблюдается в целом для остальной части неба в «фоновом» спектре.

Полученные выше результаты при $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ не были неожиданными, так как имеется целый ряд экспериментальных данных, свидетельствующих об определенной роли Галактики в происхождении частиц таких энергий (см., например, [14, 15, 27, 31–33]). Кроме того, по данным Якутской установки было определено [14–23], что из диска Сверхгалактики также наблюдается повышенный поток ПКИ. Поэтому спектры на рис. 3 лишь еще раз подтвердили эти установленные ранее факты.

А вот избыточные потоки частиц на рис. 2б при $2 \cdot 10^{17} < E_0 < 10^{18}$ эВ из южных широт и на рис. 2в при $E_0 \approx (1.5\text{--}4) \cdot 10^{17}$ эВ из полярной области Галактики требуют дальнейшего исследования. Вероятно эти нерегулярности спектра отражают какие-то неизвестные пока астрофизические процессы.

Большой интерес на рис. 3 вызывает ослабление потоков частиц при $5 \cdot 10^{17} < E_0 < 2 \cdot 10^{18}$ эВ в диске Галактики, которое особенно заметно в диске Сверхгалактики. Чем оно вызвано, сказать пока трудно. Мы проверили методику построения энергетического спектра, но ошибок не обнаружили. Видно, что спектры на рис. 3 в целом похожи. Это наводит на мысль, что Галактика и Сверхгалактика каким-то одинаковым образом участвуют в генерации ПКИ сверхвысоких энергий.

4. АНИЗОТРОПИЯ ПКИ

Рассмотрим дополнительно некоторые особенности пространственного распределения ПКИ. Проанализируем их глобальное распределение на небесной сфере в экваториальных координатах. Для этого воспользуемся методом гармонического анали-

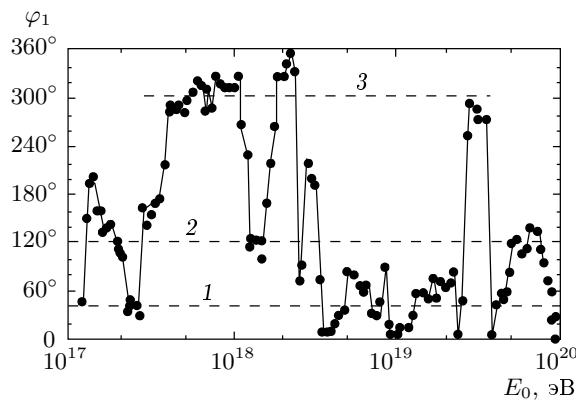


Рис. 4. Изменения фазы первой гармоники соотношения (7) для выборки ливней в спектре на рис. 1 в зависимости от положения бина по энергии с шагом $\Delta \lg E_0 = 0.05$

за [34], суть которого заключается в выборе наилучших значений амплитуды A_1 и фазы φ_1 функции

$$f(\alpha) = f_0 (1 + A_1 \cos(\alpha - \varphi_1)) \quad (7)$$

путем минимизации величины

$$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(f_i - N_i)^2}{f_i}, \quad (8)$$

где N_i — число ливней в i -ом секторе $(\Delta\alpha)_i$. При этом

$$f_0 = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} = \frac{N}{n},$$

$$A_1 = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_{max} + f_{min}}. \quad (9)$$

Мы разбили небо на $n = 36$ сферических секторов. Анизотропия изучалась в интервалах $h = \Delta \lg E_0 = 0.15$ (назовем их бинами) путем последовательного их сдвига по энергии на $0.2h$. Это делалось для более детального исследования поведения фазы первой гармоники φ_1 , характеризующей направление максимума глобального потока ПКИ.

На рис. 4 показаны изменения фазы φ_1 для выборки 35935 ливней, вошедших в спектр на рис. 1, в зависимости от положения бина по энергии. Относительный разброс точек в соседних бинах характеризует ошибки определения фазы. Видно, что большинство фаз сгруппировано возле значений $\varphi_1 \approx 40^\circ$ (штриховая линия 1), $\varphi_1 \approx 120^\circ$ (штриховая линия 2) и $\varphi_1 \approx 300^\circ$ (штриховая линия

3). Первое из них указывает на место пересечения плоскостей Галактики и Сверхгалактики (рис. 5), где по данным работ [23, 26] имеется абсолютный максимум потока ПКИ при $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ. Второе оказалось сконцентрированным около значения $\varphi_1 \approx 120^\circ$. Это направление никак не связано с плоскостью Галактики, откуда, казалось бы, можно ожидать анизотропию потока заряженных частиц ПКИ в рамках диффузационной модели их распространения. Оно указывает на плоскость Сверхгалактики (рис. 5). И, наконец, третье направление с фазой $\varphi_1 \approx 300^\circ$ указывает непосредственно на диск Галактики. Оно совпадает с направлением анизотропии, обнаруженной в [28, 29] при $E_0 \approx (5-20) \cdot 10^{17}$ эВ.

Результаты, представленные на рис. 4, говорят о том, что вектор глобального потока ПКИ в отдельных интервалах энергий существенно меняется. Мы полагаем [14–23], что значительная доля космических лучей с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ имеет внегалактическое происхождение, поэтому она проявляется себя как в Галактике, так и Сверхгалактике. Вероятно, это нашло свое отражение в нерегулярностях спектров на рис. 1–3.

4.1. События с $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ

Чтобы более детально разобраться с результатами, представленными на рис. 4, рассмотрим вначале анизотропию направлений прихода гигантских атмосферных ливней (ГАЛ) с $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ. Для анализа мы взяли все события с зенитными углами $\theta \leq 60^\circ$, направления прихода которых найдены не менее чем по 4 станциям, а их оси оказались внутри периметра установки. Всего таким способом отобрано 559 ливней.

Кроме того, мы использовали 522 события из каталога [35], зарегистрированных установкой SUGAR. Эти ливни относятся в основном к южной полусфере Земли. Вместе с данными Якутской установки они дают достаточно полную картину анизотропии ГАЛ в окружающем нас пространстве. Точность определения направления оси ливней в [35] составляет приблизительно 5° .

Мы исследовали отклонения наблюдаемого числа событий N_1 от ожидаемого среднего $\langle N \rangle = N_2(\Omega_1/\Omega_2)$ в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{\langle N \rangle}$:

$$n_\sigma = \frac{N_1 - \langle N \rangle}{\sigma}, \quad (10)$$

где N_1 и N_2 — количества ливней в телесных углах

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos\theta_1)$$

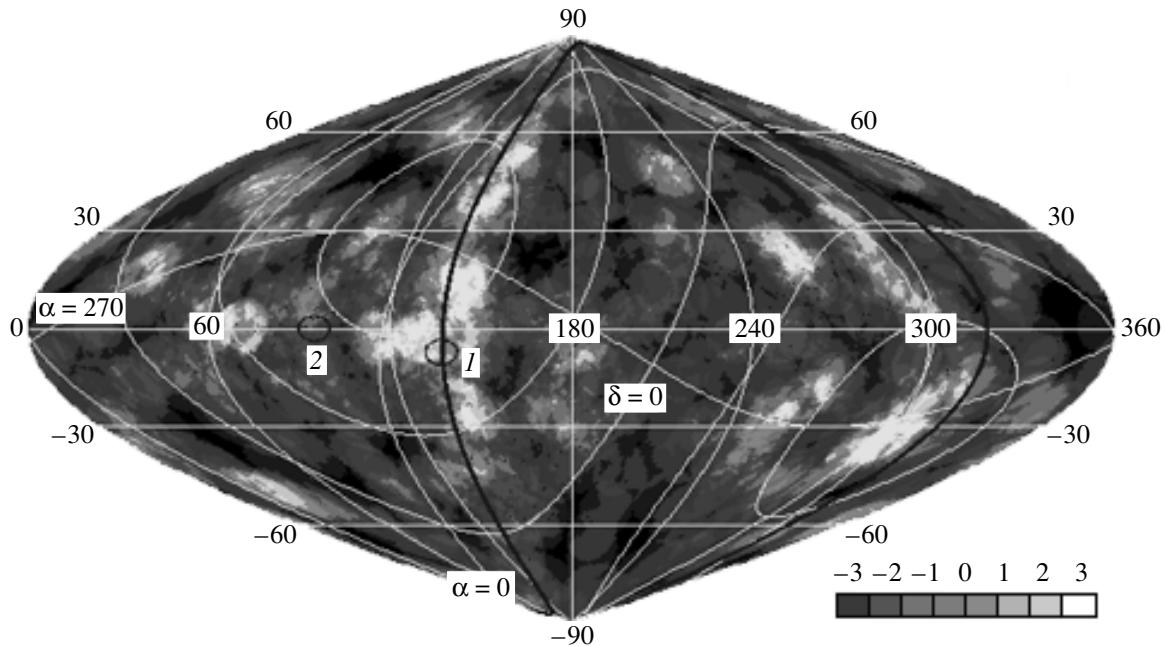


Рис. 5. Отклонения наблюдаемого N_1 числа ливней от ожидаемого среднего $\langle N \rangle$ в единицах $n_\sigma = (N_1 - \langle N \rangle)/\sqrt{\langle N \rangle}$ на развернутой небесной сфере в галактических координатах для ПКИ с $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ и $\theta \leq 60^\circ$ по данным Якутской установки ШАЛ и SUGAR [35]: кружки 1 и 2 — найденный в работе [26] полюс локального избытка ПКИ и выход Местного рукава Галактики, соответственно; темные кривые — плоскости Сверхгалактики и Галактики; тональная шкала — пределы изменений величины n_σ

и

$$\Omega_2 = 2\pi(1 - \cos\theta_2),$$

соответственно ($\theta_1 = 8^\circ$, $\theta_2 = 45^\circ$). Значения n_σ (10) находились при последовательном перемещении площадки $1^\circ \times 1^\circ$ по всей сфере.

На рис. 5 показана карта распределения величин (10) на развернутой небесной сфере в галактических координатах. Для удобства восприятия здесь приведены также экваториальные координаты. Кружками 1 и 2 отмечены найденный в работе [26] полюс локального избытка ПКИ и выход Местного рукава Галактики, соответственно. Пределы изменения n_σ представлены внизу рисунка в виде тональной шкалы. Наиболее темные и светлые области соответствуют отклонению потока ГАЛ от среднего на $|n_\sigma| \geq 3$.

На рис. 5 обращают на себя внимание некоторые интересные и важные результаты. Во-первых, здесь по всей сфере видны многочисленные локальные области с относительно высокими и низкими потоками ГАЛ. Это говорит о том, что анизотропия ГАЛ имеет многополярный характер. Во-вторых, в диске Галактики избыточное излучение почти не наблюдается, если не брать во внимание место пе-

ресечения плоскостей Галактики и Сверхгалактики при $l_G \approx 137.4^\circ$. Даже из центра Галактики, где происходят наиболее активные и мощные процессы преобразований вещества, нет ни малейшего намека на избыточное излучение. Хотя в этой области при $E_0 \approx (5-20) \cdot 10^{17}$ эВ по данным [28, 29] наблюдается значимая анизотропия. Нет избыточного излучения ГАЛ и на выходе Местного рукава Галактики (кружок 2). Это свидетельствует, вероятно, о незначительной роли Галактики в генерации частиц с $E_0 \geq 8 \cdot 10^{18}$ эВ.

Однако совсем иная картина открывается в Сверхгалактике. На рис. 5 в северном полушарии Земли четко видна корреляция направлений прихода ГАЛ с плоскостью Сверхгалактики. Эту связь характеризуют средние величины

$$\langle n_\sigma \rangle = \frac{\sum_{i=1}^k (n_\sigma)_i}{k}. \quad (11)$$

На рис. 6б показаны изменения величины (11) при последовательном перемещении сканирующих телесных углов Ω_1 и Ω_2 вдоль широты $b_{SG} \approx -3^\circ$. Штриховая кривая отражает поведение этого рас-

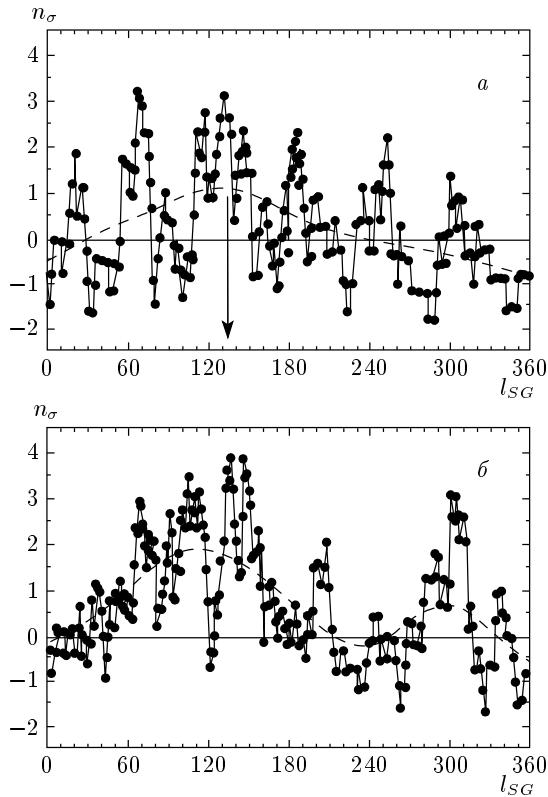


Рис. 6. Изменения величин n_σ , представленных на рис. 5, при сканировании вдоль дисков Галактики (а) и Сверхгалактики (б): штриховые кривые — поведение в среднем при сглаживании по 30 соседним точкам

пределения (зависимость от сверхгалактической долготы) в среднем при сглаживании по 30 соседним точкам. Здесь также виден мощный пик в секторе $\Delta l_{SG} \approx 0^\circ\text{--}210^\circ$, с максимумом при $l_{SG} \approx 120^\circ$. Однако в южном полушарии такой ярко выраженной корреляции нет, за исключением избытка ГАЛ в локальной области неба с координатами $\alpha \approx 0^\circ$ и $\delta \approx -85^\circ$ (рис. 5). Любопытно отметить, что он расположен вблизи плоскости Сверхгалактики, почти в противоположном направлении по отношению к области с самым заметным избытком ГАЛ в северном полушарии. В работе [23] показано, что это может быть не случайным совпадением, а связанным с определенной ориентацией диска Сверхгалактики в пространстве: ребром к направленному потоку внегалактических частиц, генерируемых квазарами.

Для сравнения на рис. 6а показаны также изменения величины (11) вдоль диска Галактики (в полосе широт $|b_G| \leq 8^\circ$). Видно, что максимум усредненно-

го распределения (штриховая кривая) наблюдается при $l_G \approx 137^\circ$, где проходит плоскость Сверхгалактики (см. рис. 5). Его величина ($\approx 1\sigma$) приблизительно в 2 раза меньше аналогичного максимума на рис. 6б при $l_{SG} \approx 120^\circ$, что говорит о преобладающей роли Сверхгалактики в формировании избыточного потока ГАЛ в области пересечения плоскостей Галактики и Сверхгалактики.

4.2. События с $E_0 \approx (5\text{--}12) \cdot 10^{17}$ эВ

Теперь рассмотрим более детально события с $E_0 \approx (5\text{--}12) \cdot 10^{17}$ эВ, привлекающие к себе повышенное внимание с момента появления сообщений [28, 29]. Тем более что в этой области энергий мы наблюдаем аномальные изменения формы спектра на рис. 2а, б и рис. 3.

На рис. 7 показана (аналогичная рис. 5) карта распределения величин (10) в галактических координатах для событий с указанной энергией. Она характеризует распределение локальных потоков ПКИ в обозреваемой Якутской установкой части неба. Эта выборка включает в себя 13407 ливней с $\cos \theta \geq 0.7$, вошедших в спектр на рис. 1. Наиболее светлые и темные участки отражают отклонения n_σ соответственно в большую и меньшую сторону на 3σ числа событий N_1 в сканирующем конусе с

$$\Omega_1 = 2\pi(1 - \cos 8^\circ)$$

от ожидаемого среднего

$$\langle N \rangle = N_2(\Omega_1/\Omega_2)$$

в единицах стандарта $\sigma = \sqrt{\langle N \rangle}$ для числа событий N_2 в опорном телесном угле

$$\Omega_2 = 2\pi(1 - \cos 20^\circ)$$

при последовательном перемещении площадки $1^\circ \times 1^\circ$ по всему исследуемому участку сферы.

На рис. 7 имеются многочисленные локальные экстремумы с повышенными и пониженными потоками космических лучей. Они образуют определенную картину, грубо похожую на многополярную анизотропию рис. 5. В отдельных местах на рис. 7 видны светлые кольца с диаметром приблизительно 30° .

Глобальную анизотропию направлений прихода ПКИ с энергией $E_0 \approx (5\text{--}12) \cdot 10^{17}$ эВ характеризует рис. 8, где показано распределение величин (11) в интервалах углов $\Delta\alpha = 1.5^\circ$. Штриховая кривая отражает поведение в среднем при сглаживании по 70 соседним точкам. Максимум этого распределения

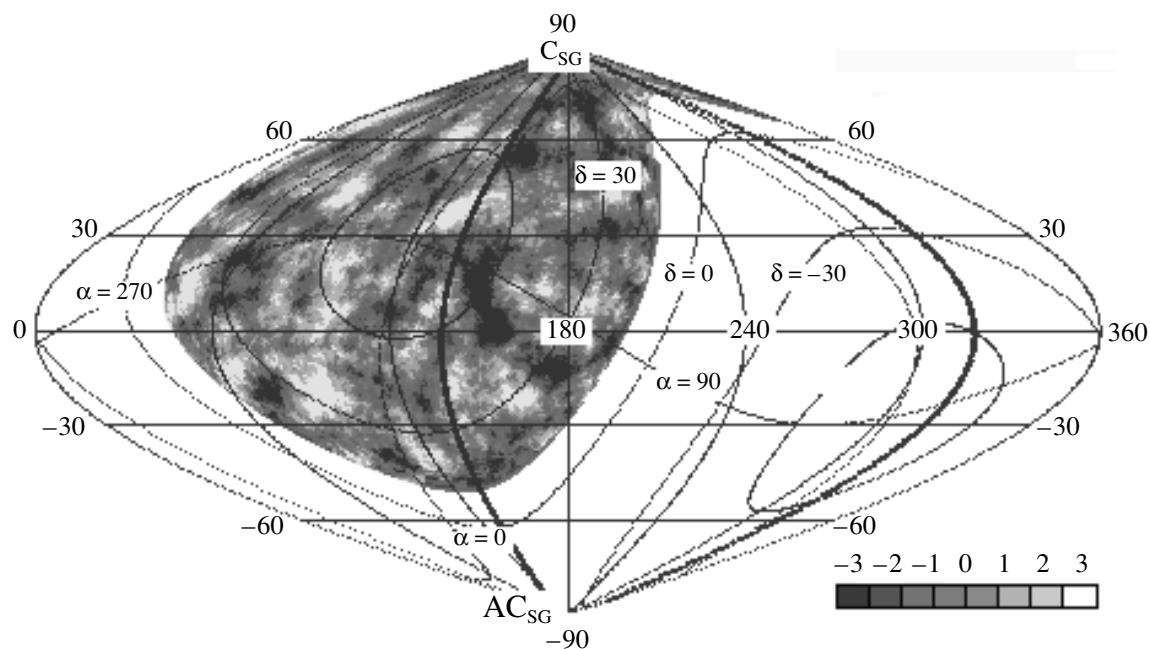


Рис. 7. Отклонения наблюдаемого N_1 числа ливней от ожидаемого среднего $\langle N \rangle$ в единицах $n_\sigma = (N_1 - \langle N \rangle)/\sqrt{\langle N \rangle}$ на развернутой небесной сфере в галактических координатах для ПКИ с $E_0 \approx (5-12) \cdot 10^{17}$ эВ и $\theta \leq 45^\circ$: темная кривая, C_{SG} и AC_{SG} — плоскость, центр и антицентр Сверхгалактики, соответственно; тональная шкала — пределы изменений величины n_σ

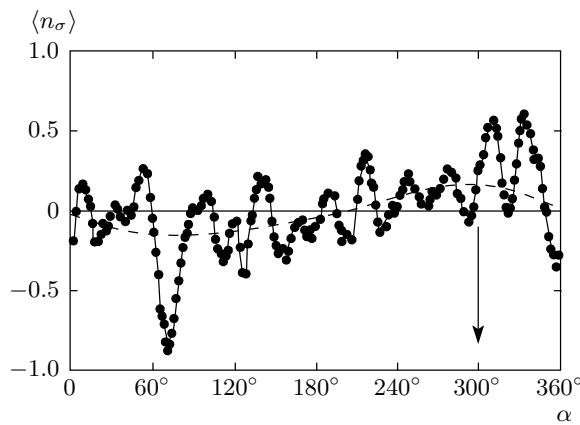


Рис. 8. Распределение величин (11) для выборки событий на рис. 7 в зависимости от прямого восхождения (в интервалах $\Delta\alpha = 1.5^\circ$): штриховая кривая — поведение в среднем при сглаживании по 70 соседним точкам

при $\alpha \approx 300^\circ$ совпадает с результатом гармонического анализа на рис. 4.

На рис. 9 показаны зависимости величин (11) от широты в галактических (темные кружки) и сверхгалактических (светлые кружки) координатах (в ин-

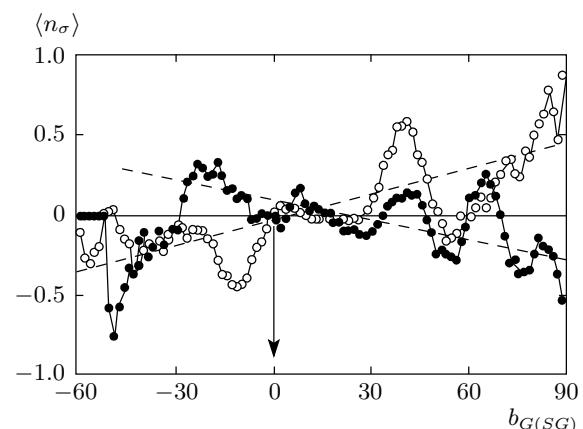


Рис. 9. Распределения величин (11) для выборки событий на рис. 7 в зависимости от широты (в интервалах $\Delta b = 1.5^\circ$) в галактических (\bullet) и сверхгалактических (\circ) координатах: штриховые линии — поведение в среднем

тервалах углов $\Delta b = 1.5^\circ$). Здесь отчетливо виден широтный градиент (штриховые линии) в обеих системах координат. Результаты на рис. 9 (темные кружки) полностью подтверждают северо-южную

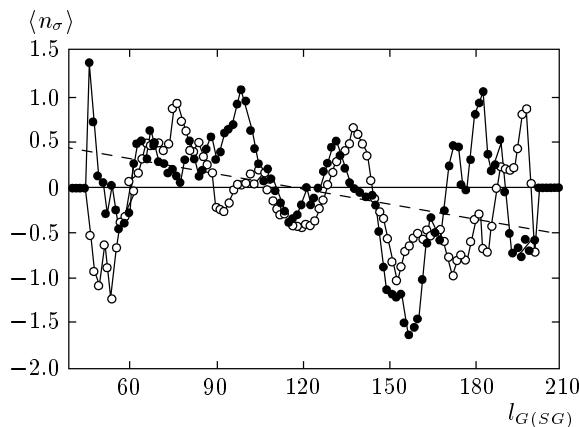


Рис. 10. Зависимости величин (11) от галактической (\bullet) и сверхгалактической (\circ) долготы в интервалах широты $|b_G| \leq 5^\circ$ и $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$ для выборки ливней с $E_0 \approx (5\text{--}12) \cdot 10^{17}$ эВ и $\theta \leq 45^\circ$ (представленной на рис. 3): штриховая линия — поведение в среднем

асимметрию глобального потока частиц, которая имеется в спектре на рис. 2а, б в виде пика при $3 \cdot 10^{17} \leq E_0 \leq 2 \cdot 10^{18}$ эВ. Если иметь в виду, что северный полюс Галактики «смотрит» на центр Сверхгалактики (C_{SG} на рис. 7), то в этом случае нельзя исключить вклад последней в наблюдаемый градиент. Он может выражаться в более сильном поглощении внегалактического ПКИ, проходящего через центральную область Сверхгалактики, по сравнению с другими направлениями.

Распределение на рис. 9 (светлые кружки) согласуется со спектром на рис. 3б. Оно подтверждает наличие определенного дефицита частиц в полосе широт $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$. Северо-южную асимметрию в этих координатах можно интерпретировать как некоторое указание на повышенный поток ПКИ из центральной области Галактики, поскольку северный полюс Сверхгалактики имеет галактические координаты $l_G \approx 47.4^\circ$ и $b_G \approx 3^\circ$.

Роль дисков рассмотренных нами структур окружающего пространства отражена на рис. 10, где показаны изменения величин (11) в зависимости от галактической (темные кружки) и сверхгалактической (светлые кружки) долготы (в интервалах $|b_G| \leq 5^\circ$ и $-8^\circ < b_{SG} < 2^\circ$, представленных в спектрах на рис. 3). Здесь также видны градиенты (штриховая линия), указывающие на повышенные потоки частиц со стороны центра Галактики и антицентра Сверхгалактики.

Обращают на себя внимание локальные пики и провалы на рис. 8–10, чередующиеся приблизительно

через 30° . Мы полагаем, что они возникли не случайно, а отражают упорядоченную каким-то образом структуру распределения источников ПКИ в метагалактическом пространстве. Одними из источников указанных энергий могут быть квазары [18–23]. В работе [23] показано, что квазары образуют определенную структуру с такими же характерными угловыми неоднородностями, приблизительно равными 30° .

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если попытаться обобщить полученные выше результаты, то возможна следующая картина. Мы уже неоднократно сообщали ранее [14–23], что ПКИ с $E_0 \geq 10^{17}$ эВ состоит, вероятно, из двух компонент. Одна из этих компонент имеет внегалактическое происхождение и может генерироваться квазарами [18–23]. Квазары являются одними из самых мощных источников во Вселенной. Они расположены на космологических расстояниях, значительно превосходящих размеры Сверхгалактики, не говоря уже о Галактике. На своем пути к Земле частицы сверхвысоких энергий «просвечивают» эти структуры. Можно предположить, что какая-то их часть вступает в ядерные реакции с газом. Наиболее плотно газ сконцентрирован в дисках Галактики и Сверхгалактики, в областях с угловыми размерами по широте $|b| \approx 5^\circ\text{--}10^\circ$ [36]. Избыточные потоки ПКИ при $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ на рис. 2, 3 и анизотропия на рис. 4–6 обусловлены, вероятно, этим обстоятельством.

В области видимого пересечения плоскостей Галактики и Сверхгалактики (при $\alpha \approx 40.6^\circ$ и $\delta \approx 59.5^\circ$) потоки, вероятно, суммируются и приводят к локальному экстремуму с абсолютным максимумом, обнаруженным в работе [26].

Что касается энергий $(3\text{--}5) \cdot 10^{17} \leq E_0 \leq 2 \cdot 10^{18}$ эВ, то и здесь, по-видимому, имеется заметная доля внегалактического ПКИ. Мы уже говорили об этом раньше [20–23]. Уменьшение интенсивностей на рис. 3б по сравнению с «фоновым» спектром и результаты, представленные на рис. 9, 10 (светлые кружки), можно интерпретировать как поглощение внегалактических частиц, взаимодействующих с веществом Сверхгалактики. Возможно, какую-то схожую роль мишени в этом диапазоне энергий играет Галактика. Не исключено, что обе эти структуры выступают в качестве мишеней для внегалактических частиц сверхвысоких энергий, генерируемых квазарами и другими галактиками с активными ядрами.

Можно предположить, что в ядерных реакциях, протекающих в газе Сверхгалактики и Галактики при $E_0 \leq 2 \cdot 10^{18}$ эВ и $E_0 \geq 5 \cdot 10^{18}$ эВ, рождаются разные частицы. На Землю они приходят в виде космических лучей, образующих ШАЛ с сугубо разными характеристиками. Об этом говорят экспериментальные данные [37–41]. В этих работах мы показали, что при $E_0 \geq (3\text{--}5) \cdot 10^{18}$ эВ экспериментальные данные полностью противоречат существующим теоретическим представлениям о развитии ШАЛ от протонов или ядер любых других химических элементов.

Приведенные выше результаты проливают дополнительный свет на проблему происхождения ПКИ сверхвысоких энергий в целом. Они указывают на важность учета областей неба при сравнении экспериментальных данных между собой. Мы планируем продолжить эти исследования.

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», а также частично поддержана грантом РФФИ № 05-02-17857-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. A. Egorov, N. N. Efimov, V. A. Kolosov et al., in *Proc. 12th ICRC*, Hobart (1971), Vol. 6, p. 2059.
2. А. В. Глушкин, О. С. Диминштейн, Н. Н. Ефимов и др., в сб. *Характеристики широких атмосферных ливней космических лучей сверхвысоких энергий*, Якутск (1976).
3. A. V. Glushkov, V. M. Grigoryev, M. N. Dyakonov et al., in *Proc. 20th ICRC*, Moscow (1987), Vol. 5, p. 494.
4. M. I. Pravdin, M. N. Dyakonov, A. V. Glushkov et al., in *Proc. 26th ICRC*, Salt Lake City (1999), Vol. 3, p. 292.
5. A. V. Glushkov, V. P. Egorova, A. A. Ivanov et al., in *Proc. 28th ICRC*, Tsukuba (2003), Vol. 1, p. 389.
6. Г. Т. Зацепин, В. А. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ 4, 114 (1966).
7. K. Gresen, Phys. Rev. Lett. **16**, 748 (1966).
8. N. Sakaki, M. Chikawa, M. Fukushima et al., in *Proc. 27th ICRC*, Hamburg (2001), Vol. 1, p. 333.
9. T. Abu-Zayyad et al., E-print archives astro-ph/0208301.
10. V. S. Berezinsky, A. Z. Gazizov, and S. I. Grigorieva, E-print archives hep-ph/0204357.
11. D. Marco, P. Blasi, and A. V. Olinto, Astropart. Phys. **20**, 53 (2003).
12. А. В. Глушкин, Письма в ЖЭТФ **78**, 1265 (2003).
13. М. И. Правдин, А. В. Глушкин, В. П. Егорова и др., Изв. РАН, сер. физ. **68**, 1621 (2004).
14. А. В. Глушкин, М. И. Правдин, ЖЭТФ **119**, 1029 (2001).
15. А. В. Глушкин, М. И. Правдин, Письма в АЖ **27**, 577 (2001).
16. А. В. Глушкин, И. Е. Слепцов, Изв. РАН, сер. физ. **65**, 437 (2001).
17. А. В. Глушкин, Письма в ЖЭТФ **73**, 355 (2001).
18. А. В. Глушкин, Изв. РАН, сер. физ. **66**, 1599 (2002).
19. А. В. Глушкин, М. И. Правдин, Письма в АЖ **28**, 341 (2002).
20. А. В. Глушкин, М. И. Правдин, ЯФ **66**, 886 (2003).
21. А. В. Глушкин, Письма в АЖ **29**, 172 (2003).
22. А. В. Глушкин, ЯФ **67**, 983 (2004).
23. А. В. Глушкин, ЯФ **68**, 262 (2005).
24. *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, № 3, World Data Center C2 for Cosmic Rays, Japan (1988).
25. А. В. Глушкин, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **63**, 1557 (2000).
26. A. A. Ivanov, A. D. Krasilnikov, and M. I. Pravdin, in *Proc. 28th ICRC*, Tsukuba (2003), Vol. 1, p. 341.
27. B. N. Afanasiev, M. N. Dyakonow, T. A. Egorov et al., in *Proc. 24th ICRC*, Rome (1995), Vol. 2, p. 756.
28. N. Hayashida, M. Nagano, D. Nishikawa et al., Astropart. Phys. **10**, 303 (1999).
29. J. A. Bellido, B. W. Clay, R. B. Dawson, and M. Johnston-Hollitt, E-print archives astro-ph/0009039.
30. P. L. Biermann, G. M. Tanco, R. Engel, and G. Pugliese, Astrophys. J. **604**, L29 (2004).
31. J. Szabelsky, J. Wdowczyk, and A. W. Wolfendale, Phys. G **12**, 1433 (1986).
32. A. A. Mikhailov, in *Proc. 26th ICRC*, Salt Lake City (1999), Vol. 3, p. 268.
33. А. А. Михайлов, Письма в ЖЭТФ **72**, 233 (2000).

34. J. Linsley, Phys. Rev. Lett. **34**, 1530 (1975).
35. *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, № 2, World Data Center C2 for Cosmic Rays, Japan (1986).
36. *Физика космоса. Маленькая энциклопедия*, под ред. Р. А. Сюняева, Советская Энциклопедия, Москва (1986).
37. A. V. Glushkov, I. T. Makarov, E. S. Nikiforova et al., Astropart. Phys. **4**, 1274 (1995).
38. А. В. Глушков, И. Т. Макаров, М. И. Правдин и др., Письма в ЖЭТФ **71**, 145 (2000).
39. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **63**, 1557 (2000).
40. А. В. Глушков, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов и др., ЯФ **65**, 1346 (2002).
41. А. В. Глушков, Л. Г. Деденко, М. И. Правдин, И. Е. Слепцов, ЖЭТФ **126**, 5 (2004).