

# Космические лучи с энергиями $E_0 \geq 10^{19}$ эВ и крупномасштабная структура Вселенной

А. В. Глушков<sup>1)</sup>

Институт космофизических исследований и астрономии Якутского научного центра СО РАН  
677891 Якутск, Россия

Поступила в редакцию 1 марта 2001 г.

Приведены результаты анализа направлений прихода космических лучей с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ в сверхгалактических координатах. Показано, что из плоскости Сверхгалактики и прилегающих к ней симметрично областей под углами  $\pm b_{SG} \approx 6.5^\circ$  идут повышенные потоки частиц. В этих областях наблюдаются относительно высокие концентрации скоплений галактик и квазаров, которые имеют определенное отношение к крупномасштабной структуре Вселенной.

PACS: 96.40.-z, 98.70.-f

1. Поиск источников первичного космического излучения (ПКИ), образующего широкие атмосферные ливни (ШАЛ) с энергиями  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ, является одной из наиболее трудных задач исследования происхождения ПКИ с предельно высокими энергиями. Это связано с очень низким их потоком. Накопленные мировые данные [1–5] содержат  $\approx 2500$  таких событий. В глобальном масштабе они не противоречат изотропному распределению, хотя и указывают на некоторую корреляцию в направлениях прихода с плоскостью Галактики (см., например, [6–9]).

В работе [10] было показано, что космические лучи с  $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$  эВ имеют также положительную корреляцию с плоскостью Местного сверхскопления галактик (Сверхгалактика). Это в какой-то мере подтвердила группа AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) [5], но статистически значимого результата она не получила. Сильная корреляция ПКИ с плоскостью Сверхгалактики при  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ обнаружена в [9, 11], где были рассмотрены данные, полученные на Якутской установке ШАЛ.

В этой работе приведены экспериментальные результаты, которые открывают новые возможности ПКИ предельно высоких энергий в изучении структуры Вселенной.

2. **Исследуемые характеристики и обсуждения.** Ниже рассмотрены ШАЛ с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ и зенитными углами  $\theta \leq 60^\circ$ , зарегистрированные на Якутской установке за 1874–2000 гг. Эти события отбираются наибольшим числом детекторов с эффективностью  $\sim 100\%$  и дают минимальные ошибки при нахождении основных параметров ШАЛ (направления и координат оси,  $E_0$  и др.). Кроме

того, первичные частицы с такими энергиями менее всего подвержены влиянию магнитных полей, а направления их прихода в первую очередь могут указывать на источники.

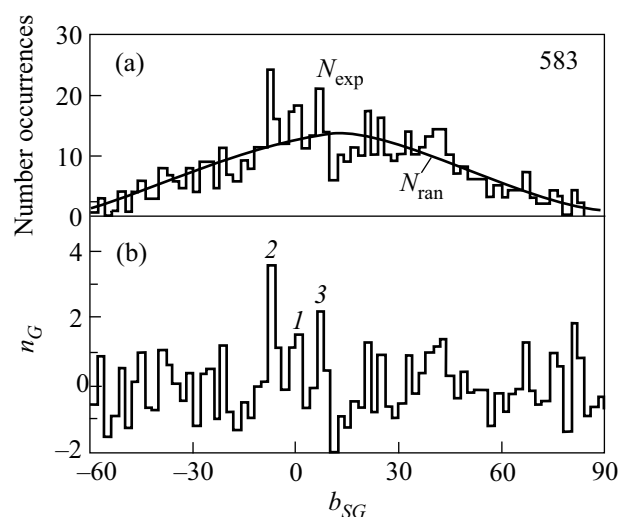


Рис.1. Распределения 583 ливней с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ и зенитными углами  $\theta \leq 60^\circ$ , зарегистрированных на Якутской установке ШАЛ, в зависимости от широты их прихода в сверхгалактических координатах (с шагом  $\Delta b_{SG} = 2^\circ$ ): (а)  $N_{\text{exp}}$  – эксперимент;  $N_{\text{ran}}$  – ожидаемое распределение для изотропного потока; (б) – отклонения  $n_\sigma = (N_{\text{exp}} - N_{\text{ran}}) / \sqrt{N_{\text{ran}}}$ ; 1–3 – пики вблизи плоскости Сверхгалактики

На рис.1а гистограммой изображено наблюдаемое ( $N_{\text{exp}}$ ) и линией – ожидаемое ( $N_{\text{ran}}$ ) распределения направлений прихода 583 ливней с указанными выше энергиями в сверхгалактических координатах (северный полюс Сверхгалактики в экваториальных ко-

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

ординатах:  $\alpha = 286.2^\circ$ ,  $\delta = 14.1^\circ$ ) в зависимости от широты их прихода  $b_{SG}$  (с шагом  $\Delta b_{SG} = 2^\circ$ ). Внизу (рис.1b) показаны отклонения числа измеренных событий от ожидаемого в единицах стандарта  $\sigma = \sqrt{N_{\text{ran}}}$ :  $n_\sigma = (N_{\text{exp}} - N_{\text{ran}})/\sigma$ . Это представление, на наш взгляд, более удобно, так как оно выравнивает статистику в разных интервалах  $\Delta b_{SG}$  и отражает картину в целом.

Значения  $N_{\text{ran}}$  находились из розыгрыша случайно распределенных по небесной сфере событий. Делалось это следующим образом. Для каждого ливня путем замены у него реально измеренного времени прихода и азимута (в горизонтальной системе координат установки) на случайные, находилось по 500 направлений в сверхгалактических координатах. Полученные таким образом распределения случайных событий нормировались затем по абсолютной величине на реальные.

На рис.1 видно, что из диска Сверхгалактики ( $|\Delta b_{SG}| \leq 2^\circ$ ) и из симметрично прилегающих к нему областей под углами  $\pm b_{SG} \approx 6 - 7^\circ$  (пики 2 и 3) наблюдаются повышенные потоки ПКИ. Они особенно заметны на фоне симметрично расположенных рядом с ними провалов при  $|b_{SG}| = 12 - 20^\circ$  на  $\approx -1\sigma$ .

Остановимся более подробно на этих деталях распределения, оставив пока в стороне другие. На наш взгляд пики 1–3 носят не случайный характер. На это указывает распределение на рис.2 из 44 и 50 ливней с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ соответственно из [1] и частного сообщения Нагано<sup>2)</sup>, а также 47 ливней с  $E_0 \geq 4 \cdot 10^{19}$  эВ из [5]. Ожидаемое распределение  $N_{\text{ran}}$  находилось описанным выше способом, но путем замены реально измеренного прямого восхождения на случайное его значение в интервале  $0 - 360^\circ$ . Эти ливни зарегистрированы на установках Volcano Ranch [1] и AGASA<sup>2)</sup> [5], схожих с Якутской установкой по типу детекторов (сцинтилляционные счетчики), методикам отбора и обработки ШАЛ.

На рис.2 также наблюдаются отмеченные выше пики 1–3, хотя событий здесь в 4 раза меньше. Пики лишь сдвинуты влево относительно “0” на  $\approx -2^\circ$ . Этот сдвиг может иметь случайный характер. Расположение пиков относительно друг друга остается таким же, как на рис.1. В какой-то мере совпадают и другие детали рассмотренных распределений.

Наблюдения и теория показывают (см., например, [12]) наличие во Вселенной больших пустот размером 100–130 Мпс, разделенных сравнительно тонкими (20–30 Мпс) слоями. В этих слоях концентрируется до 60–80% галактик, которые имеют тенденцию

собираться в вытянутые и сплюснутые сверхскопления. Одним из них является рассматриваемая нами Сверхгалактика (с диаметром 50–60 Мпс). Многие сверхскопления, по-видимому, смыкаются друг с другом, образуя единую ячеистую структуру Вселенной [12].

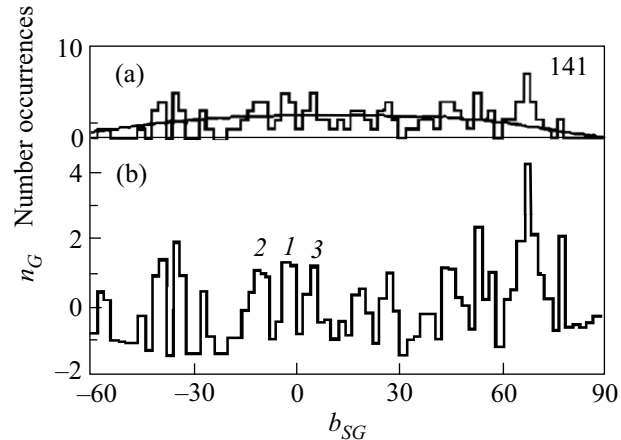


Рис.2. Распределения 141 ливня с  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ в зависимости от широты их прихода в сверхгалактических координатах по данным установок Volcano Ranch [1] и AGASA<sup>2)</sup> [5]. Обозначения аналогичны рис.1

В [9] было высказано предположение, основанное на анализе корреляций направлений прихода космических лучей с  $E_0 \geq 10^{18}$  эВ с плоскостями Галактики и Сверхгалактики, что частицы с рассматриваемыми здесь энергиями имеют, в основном, внегалактическое происхождение и являются электрически нейтральными. Представленные на рис.1 и 2 результаты подтверждают это. Они, по-видимому, отражают в какой-то мере распределение источников ПКИ в упорядоченной структуре Вселенной.

“Расщепление” направлений прихода ПКИ на пики 1–3 можно интерпретировать как подтверждение адиабатической (“блинной”) теории Зельдовича [13], в которой геометрия метагалактических структур характеризуется наличием плоских гигантских образований, разделенных большими ( $\sim 10^5$  Мпс) объемами, почти свободными от галактик.

Рассмотрим некоторые объекты Вселенной, которые могут пролить дополнительный свет на природу пиков 1–3. На рис.3 (GAL) показано распределение по широте в сверхгалактических координатах 49 сверхскоплений (локализованных в области галактических широт  $b_G > 30^\circ$ ) с расстояниями до них 100–500 Мпс [14]. Эта выборка дополнена 52, случайно выбранными скоплениями и яркими галактиками на расстояниях  $\geq 10$  Мпс [15, 16]. На этом рисунке также

<sup>2)</sup>М. Nagano, Private communication, Kofu, 1990.

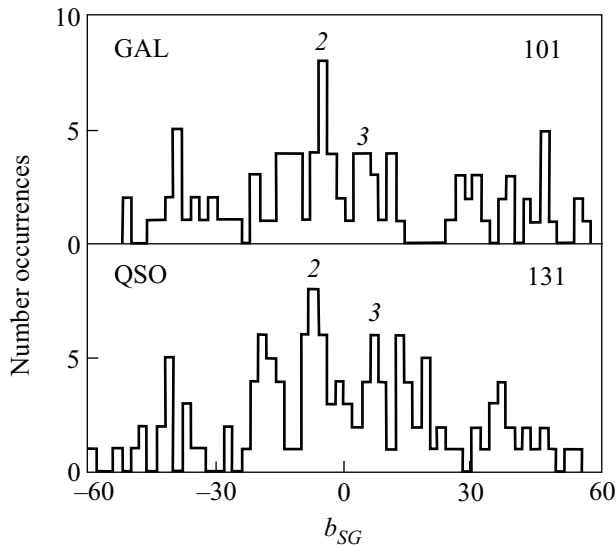


Рис.3. Распределения по широте в сверхгалактических координатах 49 сверхскоплений [14] и 52 скоплений и ярких галактик [15, 16] (GAL), а также 131 квазара (QSO) с красными смещениями  $z \leq 0.2$  [17]. Пики 2 и 3 – см. рис.1

видны пики 2 и 3, расположенные вблизи плоскости Сверхгалактики. Их местоположения примерно совпадают с аналогичными пиками на рис.1 и рис.2 (хотя может быть, они находятся на  $\approx 1.5^\circ$  ближе к плоскости Сверхгалактики). Заметим, что пик 2 включает центральную часть сверхскопления Дева, а пик 3 – сверхскопление Волосы Вероники, имеющих несколько скоплений галактик на разных удалениях от наблюдателя (вплоть до  $\sim 1000$  Мпс) [12].

На рис.3 (QSO) показано распределение в тех же координатах 131 квазара [17] с красными смещениями  $z \leq 0.2$  (находящихся на расстояниях  $\leq 800$  Мпс, при  $H = 75$  км/с · Мпс). Здесь отчетливо видны пики 2 и 3, расположенные там же, где и на рис.1. Это можно интерпретировать, как указание на то, что одними из возможных источников ПКК рассматриваемых энергий могут быть квазары. Отсутствие пика 1 на этом рисунке, возможно, связано с поглощением излучения от квазаров в оптическом диапазоне длин волн более плотным веществом в плоскости Сверхгалактики. Для космических лучей сверхвысоких энергий структура Вселенной более прозрачна.

Рассмотренные выше данные подтверждают наличие во Вселенной каким-то образом упорядоченной структуры вещества в космологическом масштабе. Существует мнение [18], что эта структура может быть типа “трехмерной шахматной доски”. Пики 2 и 3 указывают на то, что, на угловом расстоянии  $\approx 6-7^\circ$  от плоскости Сверхгалактики (по обе стороны

от нее) имеются заметные концентрации скоплений галактик и квазаров, в которых, возможно, генерируются космические лучи предельно высоких энергий.

Оценим поперечные размеры структур (которые могут иметь отношение к пикам 2 и 3) из соотношения  $D \approx 2r \operatorname{tg}(6.5^\circ)$  для квазаров. Согласно [19], в использованной нами выборке квазаров с  $z \leq 0.2$  имеется пик их распределения при  $\langle z \rangle = 0.14$ . Отсюда находим  $r = c(z)/H = 560$  Мпс ( $c$  – скорость света,  $H = 75$  км/с · Мпс). Искомая величина  $D \approx 127$  Мпс согласуется с указанными выше размерами пустот в ячеистой структуре Вселенной [12].

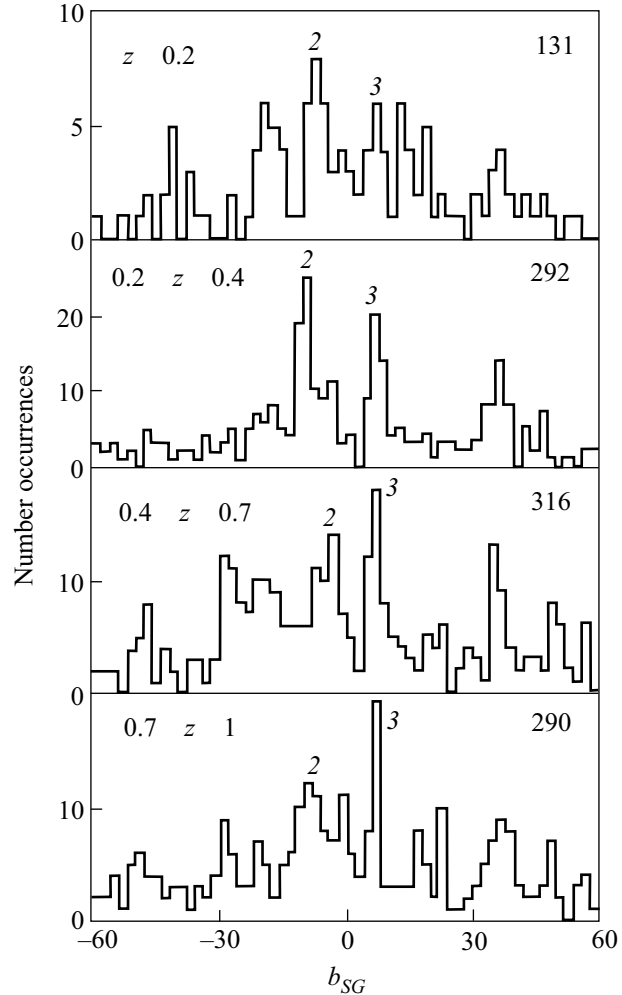


Рис.4. Распределения по широте в сверхгалактических координатах квазаров [17] с разными красными смещениями  $z$  (цифры справа – количества объектов). Пики 2 и 3 – см. рис.1

Заметим, что пики 2 и 3 на рис.3 (QSO) наблюдаются при разных красных смещениях квазаров (рис.4). Это говорит, по-видимому, о глобальном масштабе выделенных вблизи плоскости Сверхгалактики направлений во Вселенной. Кроме того, на рис.4

имеются еще пики, которые, скорее всего, связаны с какими-то другими фрагментами крупномасштабной структуры Вселенной.

3. Если подытожить сказанное выше, то возникает следующая картина. ПКИ с энергиями  $E_0 \geq 10^{19}$  эВ по данным Якутской установки ШАЛ и [1, 5], а также сообщение Нагано<sup>2)</sup> подтверждают установленную ранее в [9, 11] корреляцию направления их прихода с плоскостью Сверхгалактики. В этой работе обнаружена более “тонкая” структура распределения ПКИ предельно высоких энергий (пики 1–3).

Пики 2 и 3, прилегающие к плоскости Сверхгалактики под углами  $\pm b_{SG} \approx 6-7^\circ$ , наблюдаются также в скоплениях галактик и квазаров. Совпадающие между собой пики имеются на распределениях и в других местах. Обращает на себя внимание один из них – при  $b_{SG} \approx 66-68^\circ$ . Это говорит о не случайном характере их появления.

Отмеченные выше особенности космических лучей предельно высоких энергий требуют дальнейшего, более глубокого исследования. Оно будет продолжено. Но уже сейчас можно сказать, что основная масса источников частиц таких энергий, скорее всего, находится вне Галактики. Их расположение в пространстве, по-видимому, связано с крупномасштабной структурой Вселенной.

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

---

1. J. Linsley, *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, Wold Data Center C2 for Cosmic Rays Institute of Physical and Chemical Research, №1, Tokyo, 1980.

2. G. Cunningham, D.M. Edge, D. England et al., *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, Wold Data Center C2 for Cosmic Rays Institute of Physical and Chemical Research, №1, Tokyo, 1980.
3. M. M. Winn et al., *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, Wold Data Center C2 for Cosmic Rays Institute of Physical and Chemical Research, №2, Tokyo, 1986.
4. N.N. Efimov, T. A. Egorov, D. D. Krasilnikov et al., *Catalogue of Highest Energy Cosmic Rays*, Wold Data Center C2 for Cosmic Rays Institute of Physical and Chemical Research, №3, Tokyo, 1988.
5. M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda et al., *The Astrophysical J.* **522**, 225 (1999).
6. J. Szabelsky, J. Wdowczyk, and A. W. Wolfendale, *J. Phys. G.* **12**, 1433 (1986).
7. B.N. Afanasiev, M.N. Dyakonov, T. A. Egorov et al., *Proc. 24-th ICRC* **2**, 756 (1995).
8. A. A. Mikhailov, *Proc. 26th ICRC* **3**, 268 (1999).
9. А. В. Глушков, М. И. Правдин, *ЖЭТФ* **119** (2001) (в печати).
10. T. Stanev et al., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 3056 (1995).
11. А. В. Глушков, И. Е. Слепцов, *Изв. РАН, сер. физ.* **65**, 437 (2001).
12. Б. А. Воронцов-Вельяминов и др., *Крупномасштабная структура Вселенной*, М.: Мир, 1981.
13. Я. Б. Зельдович, *Письма в АЖ* **8**, 195 (1982).
14. В. С. Лебедев, И. А. Лебедева, *Письма в АЖ* **14**, 18 (1988).
15. В. К. Абалакин, *Астрономический календарь. Постоянная часть*, М.: Наука, 1981.
16. M. V. Zombeck, *Handbook of Space Astronomy and Astrophysics*, Cambridge University Press, 1982.
17. A. Hewitt and G. Burbidge, *The Astrophysical Journal Supplement Series.* **63**, 1 (1987).
18. J. Einasto et al., *Nature* **385**, 139 (1997).
19. М. Ф. Ходячих, *АЖ* **73**, 11 (1996).