

ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВНУТРЕННЕЙ ГЕЛИОСФЕРЕ В ЭПОХИ МИНИМУМОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М. Б. Крайнев

Рассматривается поведение интенсивности космических лучей галактического происхождения во внутренней гелиосфере ($r \leq 10$ а. е.) в эпохи минимума солнечных циклов 20–24. Обсуждаются особенности характеристики космических лучей в последнем аномально длительном и глубоком минимуме солнечного цикла 24 (2007 – 2010 гг.).

Ключевые слова: Солнце, гелиосфера, минимум цикла солнечной активности, галактические космические лучи, аномальные космические лучи, минимум солнечного цикла 24.

В минимуме цикла солнечной активности (точнее, активности её тороидальной или пятенной ветви, см. [1]) интенсивность космических лучей (КЛ), приходящих в гелиосферу из Галактики, достигает наибольших значений. Регулярные наблюдения за интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ) на орбите Земли в последние 50 лет позволили установить многие закономерности их поведения. Особенно интересным и необычным это поведение было в последнем минимуме солнечного цикла (СЦ) 24 (2007–2010 гг., см. [2–10]). Однако при большом внимании к временному ходу интенсивности в отдельных диапазонах энергии общие закономерности энергетического спектра галактических частиц не сформулированы. Кроме того, остаётся неясным, как в общую картину укладываются данные стратосферных наблюдений, проводимых ФИАН с 1957 г. (я буду называть этот эксперимент регулярным баллонным мониторингом (РБМ) космических лучей; см. [11, 12] и ссылки в них). Этим вопросам и посвящена данная статья.

Галактические и аномальные космические лучи. На рис. 1 показаны энергетические спектры водорода и гелия в периоды минимумов СЦ 21–23 как во внутренней, так и в дальней гелиосфере. Видно, что в районе орбиты Земли интенсивность протонов при

ФИАН, 119991, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: mkrainev46@mail.ru.

$T \leq 100$ МэВ приблизительно пропорциональна кинетической энергии, что является признаком ГКЛ [15], а на больших расстояниях от Солнца появляется большой горб при низких энергиях. В спектре гелия этот горб наблюдается уже у Земли. Кроме гелия, во внутренней гелиосфере аналогично ведут себя энергетические спектры азота, кислорода и некоторых других элементов (в основном, инертных газов). Эти особенности энергетического спектра и химического состава являются признаком аномальных космических лучей (АКЛ) [16–18]. Показано, что АКЛ представляют собой ионы с зарядом +1, т. е. это однократно ионизованные атомы [19]. При энергиях $T > 100$ МэВ/н остаются только полностью ободранные ядра ГКЛ. На рис. 1 также показано, к каким диапазонам энергии чувствительны данные эксперимента РБМ по скоростям счёта детекторов РБМ в максимуме высотных кривых на высоких (Мурманск) и средних (Москва) широтах и дифференциальные данные РБМ – разность между этими скоростями счёта. В дальнейшем, как обычно, высоколатитные интегральные данные РБМ мы относим к эффективной магнитной жесткости $R_{\text{eff}}^{Mu} \approx 6.5$ ГВ, а среднеширотные – к $R_{\text{eff}}^{Mo} \approx 7.5$ ГВ. Эффективная жесткость дифференциальных данных РБМ находится в диапазоне $R_{\text{eff}}^{MuMo} \approx 0.6 - 2.4$ ГВ и ниже мы постараемся её уточнить. Таким образом, в первом приближении весь диапазон энергии можно разделить на три интервала: 1) низкие энергии ($T_n = 10 - 100$ МэВ/н), где измерения проводятся только на космических аппаратах (КА) и где присутствуют как ядра ГКЛ, так и ионы АКЛ; 2) средние энергии ($T_n = 100 - 1000$ МэВ/н), где измерения возможны только на КА и дифференциальным методом РБМ и присутствуют только ядра ГКЛ и 3) высокие энергии ($T_n > 1000$ МэВ/н), где измерения проводятся только РБМ и нейтронными мониторами и присутствуют только ядра ГКЛ.

Временной ход интенсивности КЛ. На рис. 2 показаны временные профили интенсивности КЛ разных энергий во внутренней гелиосфере в 1960–2011 гг. Видно, что для КЛ всех энергий наблюдается выраженный магнитный цикл, т. е. зависимость от полярности крупномасштабного гелиосферного магнитного поля A , равного знаку радиальной компоненты поля в северном полушарии. Этот цикл наблюдается как в форме профиля (платообразный при $qA > 0$ и пикообразный при $qA < 0$, где q – заряд КЛ), так и в максимальной интенсивности: в минимумах СЦ 21–23 при самых высоких энергиях (данные нейтронных мониторов $R_{\text{eff}}^{NM} \approx 10 - 12$ ГВ) максимальная интенсивность при $qA < 0$ выше, чем при $qA > 0$, а при более низких энергиях ($R_{\text{eff}}^{Mo} \approx 7.5$ ГВ и ниже) – наоборот. Следовательно, жёсткость, при которой спектры в минимумах СЦ с $qA < 0$ и $qA > 0$ пересекаются при высоких энергиях, т. н. кроссовер (crossover), $R_{co}^{\text{high}} \approx 8 - 9$ ГВ.

Других кроссоверов (при средних энергиях [22]) наш анализ не обнаружил. В отмеченную закономерность чередования максимальной интенсивности в зависимости от знака qA укладывается и поведение электронов с $q < 0$. Конечно, последний минимум СЦ 24 представляет собой исключение из сформулированной зависимости: практически на всех энергиях, кроме самых высоких, максимальная интенсивность значительно выше, чем когда-либо раньше. Отметим, что для минимумов СЦ 22 и 23 существовавшая в то время сеть КА и приборы на них позволяют хорошо исследовать закономерности магнитного цикла, что мы используем в дальнейшем. В минимуме СЦ 24 временные профили интенсивности основных элементов ГКЛ средних энергий (Н и Не) известны хуже. Кроме того, временные профили ядер и электронов высоких энергий на КА Ulysses (прибор KET [20]) часто очень нерегулярны (как на верхней панели рис. 2), а максимальная интенсивность высокоэнергичных электронов (нижняя панель рис. 2) — явно завышена (см. ниже).

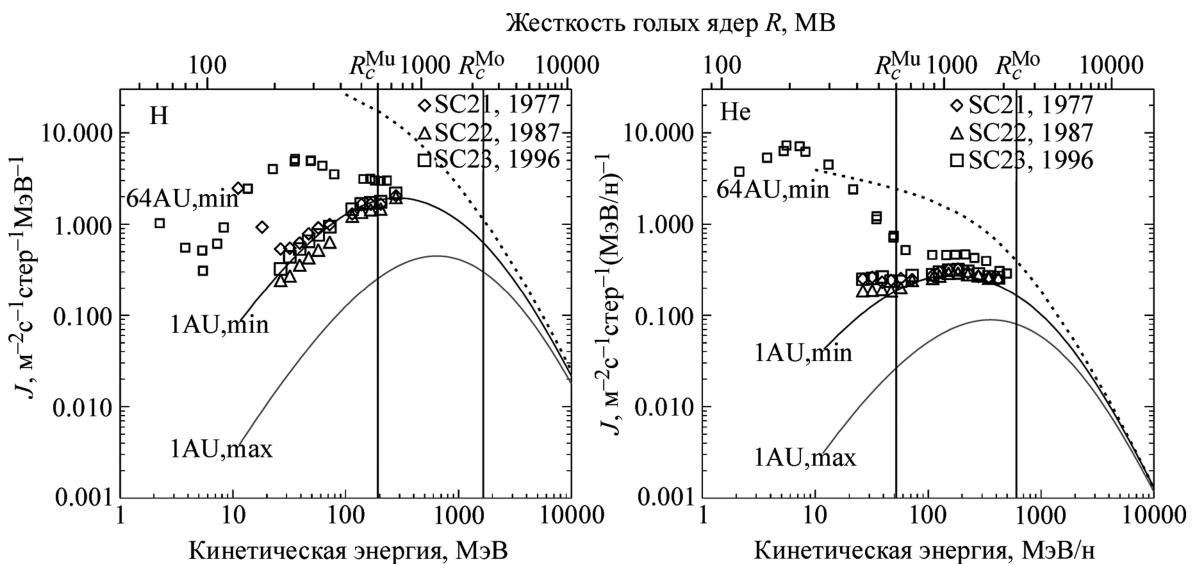


Рис. 1: Энергетические спектры ядер водорода (левая панель) и ионов, и ядер гелия (правая панель) в периоды минимумов СЦ 21–23 во внутренней и дальней гелиосфере [13]. Пунктиром показан возможный немодулированный спектр ГКЛ, а тонкими сплошными линиями — спектр ГКЛ в районе Земли согласно [14]. Вертикальные линии и верхняя горизонтальная шкала показывают жесткость геомагнитного обрезания для пунктов Мурманск и Москва эксперимента РБМ.

Энергетический спектр КЛ. Конечно, наибольший интерес представляет энергетический спектр наиболее распространенных элементов КЛ — водорода и гелия. Однако

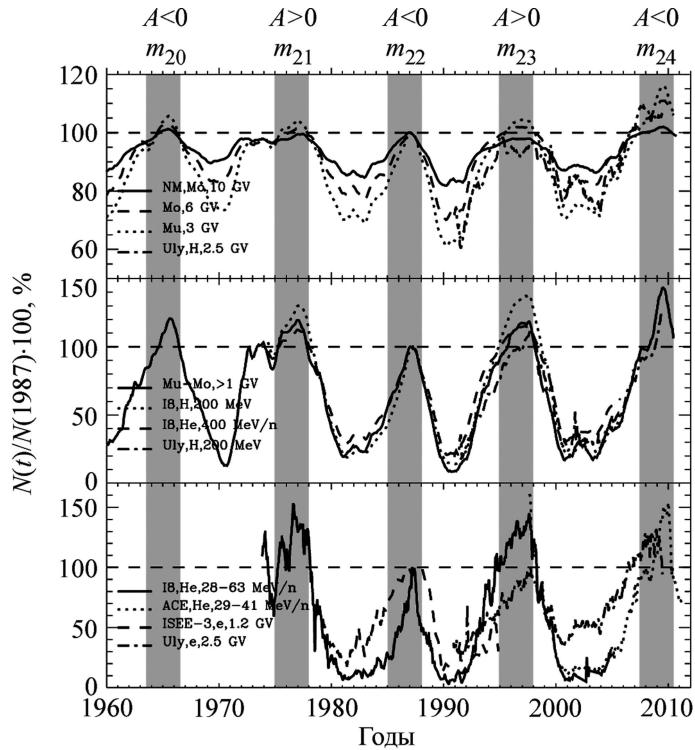


Рис. 2: Временные профили интенсивности КЛ разных энергий во внутренней гелиосфере. Показаны среднемесячные данные, сглаженные с периодом 1 год (кроме данных КА ISEE-3 и Ulysses). Затемнённые полосы показывают 3-летние периоды максимальной интенсивности ГКЛ, а над ними указаны знак полярности регулярного гелиосферного магнитного поля и какому солнечному циклу этот период минимума активности предшествует. Верхняя панель: высокие энергии – скорость счёта по данным РБМ ($N_{\max}^{Mu, Mo}$), нейтронного монитора (Москва) и протонов высокой энергии (КА Ulysses [20]). Средняя панель: средние энергии – скорости счёта протонов и ядер гелия по данным КА IMP-8 [13] и Ulysses и дифференциальные данные РБМ. Нижняя панель: Низкие энергии – скорости счёта протонов и гелия по данным КА IMP-8 и ACE [21]. На этой же панели показаны профили интенсивности электронов высокой энергии по данным КА ISEE-3 [23] и Ulysses.

после выхода из строя КА IMP-8 (последние данные – за 2005 г.) для этих ядер спектральные данные в диапазоне средних энергий практически отсутствуют. Исключение представляют данные КЕТ/Ulysses, но и для них переход от скорости счёта к интенсивности затруднителен (см. [20]). Поэтому ограничимся рассмотрением спектров менее распространённых элементов. На рис. 3 сравниваются для минимумов СЦ 23 и 24 спек-

тры ядер ГКЛ (C и Fe) и элементов с существенной аномальной компонентой при низких энергиях (O и N). На рис. 4 показана энергетическая зависимость относительной разности Δ_{23}^{24} в интенсивности указанных элементов в минимумах СЦ 23 и 24. Видно, что для элементов без АКЛ как при низких, так и при средних энергиях (до $T_n \approx 500$ МэВ/н) интенсивность в минимуме СЦ 24 существенно превышает интенсивность в минимуме СЦ 23, причём относительная разница в интенсивностях ($\Delta_{23}^{24} \approx 20 - 30\%$) слабо зависит от энергии (т. е. спектры для СЦ 23 и 24 примерно параллельны) и только на краю исследованного диапазона (Fe, 450 МэВ/н) наблюдается некоторое уменьшение этой разницы (до $\Delta_{23}^{24} \approx 17\%$). Напротив, для элементов с АКЛ при низких энергиях, где аномальная компонента становится основной, интенсивность в минимуме СЦ 24 существенно ниже, чем в минимуме СЦ 23 ($\Delta_{23}^{24} \approx -20\%$), а при средних энергиях, где присутствуют только ГКЛ, ситуация такая же, что и для других ядер ГКЛ.

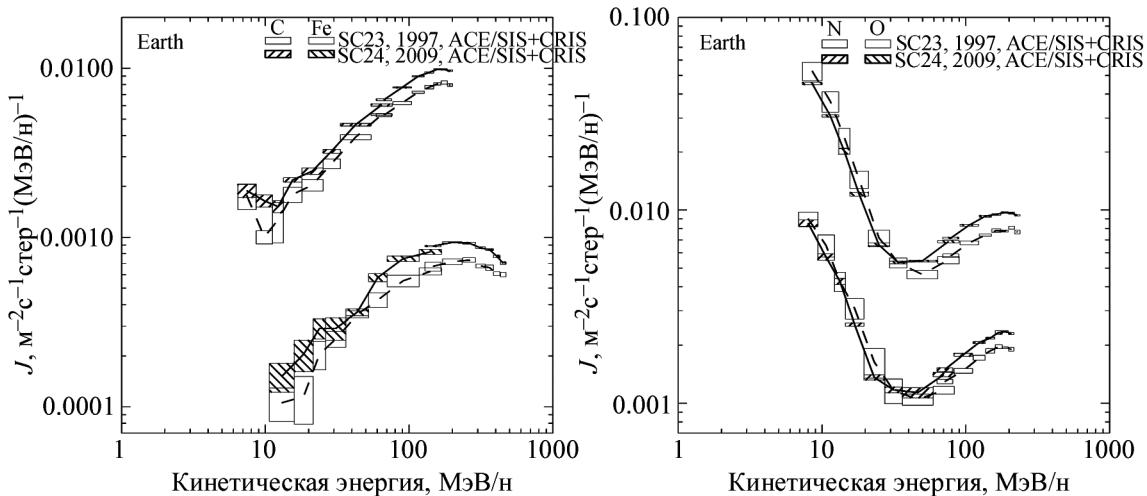


Рис. 3: Энергетический спектр углерода и железа (левая панель) и азота и кислорода (правая панель) в минимумах СЦ 23–24 по данным КА ACE [21]. Полыми прямоугольниками показана интенсивность в минимуме СЦ 23 (усреднение за 08 – 12.1997), а заштрихованными — в минимуме СЦ 24 (усреднение за 07 – 12.2009). Ширина прямоугольников равна ширине диапазона, а полувысота — среднеквадратичному отклонению интенсивности за период усреднения.

Распространив показанную на рис. 4 энергетическую зависимость относительной разности в интенсивности некоторых элементов в минимумах СЦ 23 и 24 на основные элементы КЛ и учтя разницу интенсивностей в минимумах СЦ 23 и 22, можно скомпоновать (рис. 5) энергетические зависимости отношений ρ_{22}^{24} и ρ_{23}^{24} (или, обобщённо,

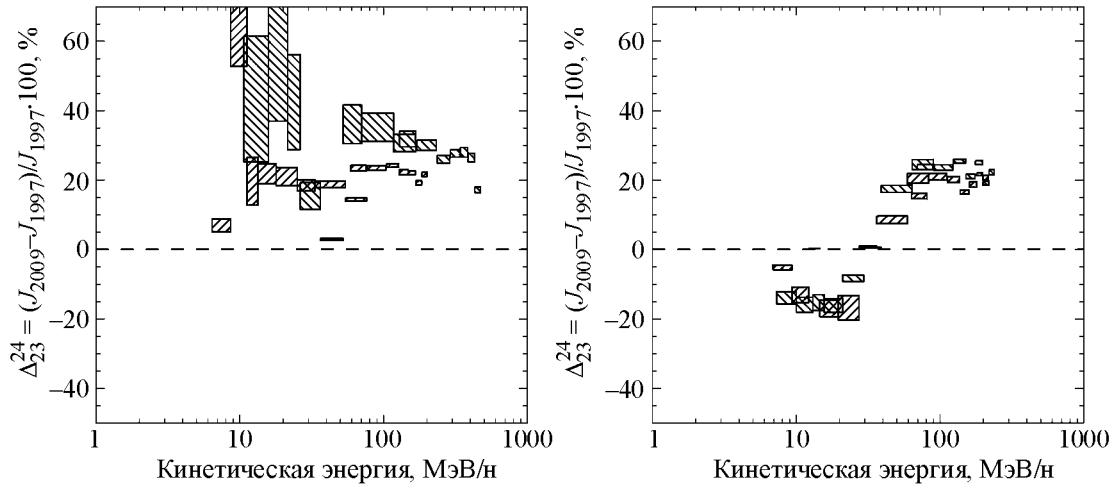


Рис. 4: Энергетическая зависимость относительной разности интенсивностей углерода и железа (левая панель), и азота и кислорода (правая панель) в минимуме СЦ 24 по сравнению с СЦ 23 для спектров, показанных на рис. 3.

$\rho_{22/23}^{24}$) интенсивности элементов в минимуме СЦ 24 к интенсивности в минимумах СЦ 22 и 23, соответственно. Для ГКЛ достаточно высоких энергий обе эти зависимости можно аппроксимировать выражением

$$\rho_{22/23}^{24} = \frac{A_{22/23}}{(R_{\text{eff}} + 2)^{\gamma_{22/23}}} + C_{22/23}, \quad (1)$$

где $A_{22} = 1.385$, $\gamma_{22} = 0.61$, $C_{22} = 0.805$, $A_{23} = 1.385$, $\gamma_{23} = 0.10$, $C_{23} = 0.025$. Рассмотрим сначала разницу между минимумами СЦ 24 и 23, когда гелиосферное магнитное поле имело разную полярность ($A < 0$ и $A > 0$, соответственно). Для элементов без АКЛ видно, что до энергий, соответствующих максимуму спектра и даже несколько выше, отношение ρ_{23}^{24} слабо зависит от энергии и равно $\rho_{23}^{24} \approx 1.25$, а при более высоких энергиях оно уменьшается, причём при $R_{\text{eff}} > 2$ ГВ — довольно быстро ($\gamma_{23} = 0.1$). Для элементов с АКЛ отношение ρ_{23}^{24} при средних и высоких энергиях, по-видимому, ведёт себя так же, как описано для ядер ГКЛ, а при низких, когда становится всё больше аномальной компоненты, становится меньше единицы и достигает $\rho_{23}^{24} \approx 0.85$.

Теперь рассмотрим разницу между минимумами СЦ 24 и 22, когда гелиосферное магнитное поле имело одну и ту же полярность $A < 0$. Для элементов без АКЛ видно, что до энергий, соответствующих максимуму спектра и даже несколько выше, отношение ρ_{22}^{24} так же, как при сравнении СЦ 24 и 23, слабо зависит от энергии, но оно уже значительно больше, ($\rho_{22}^{24} \approx 1.50$), а при более высоких энергиях оно уменьшается,

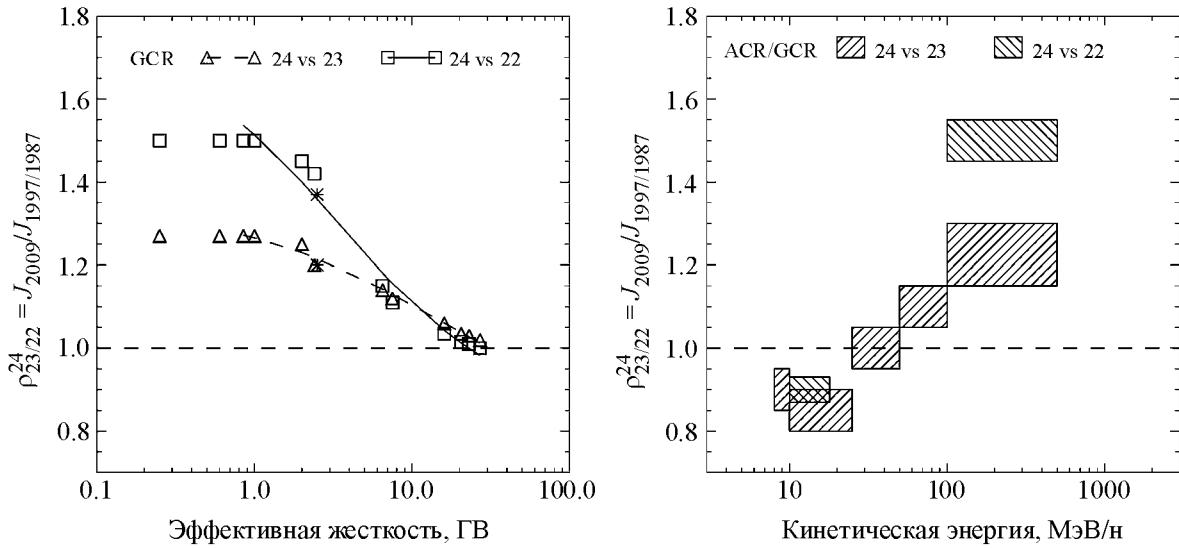


Рис. 5: Энергетическая зависимость отношения интенсивностей ГКЛ и КЛ, содержащих при низких энергиях аномальную компоненту, в минимуме СЦ 24 к интенсивности в минимумах СЦ 22 и 23. Левая панель: зависимость отношения средних значений интенсивностей от эффективной жёсткости частиц ГКЛ. Сплошной линией показана аппроксимация выражением (1) отношения интенсивностей в минимумах СЦ 24 и СЦ 22, а штриховой — в минимумах СЦ 24 и СЦ 23. Звёздочками на аппроксимирующих кривых показаны отношения дифференциальных данных РБМ. Правая панель: зависимость отношения интенсивностей от кинетической энергии частиц, содержащих АКЛ и ГКЛ.

причём значительно быстрее, чем при сравнении СЦ 24 и 23 ($\gamma_{23} = 0.61$). Пересечение отношений ρ_{22}^{24} и ρ_{23}^{24} происходит при $R_{\text{eff}} \approx 10$ ГВ, что близко к R_{co}^{high} . Что касается аномальной компоненты, то я не располагаю непрерывным рядом интенсивности АКЛ, позволяющим установить отношение ρ_{22}^{23} , необходимое для нахождения ρ_{22}^{24} по известному ρ_{23}^{24} . Тем не менее такой ряд для кислорода (О 10–18 МэВ/н) по данным IMP-8 имеется, и на правой панели рис. 5 ρ_{22}^{24} при $T_n = 10 - 18$ МэВ/н показано согласно [7].

Наконец, из левой панели рис. 5 можно сделать определённые выводы об эффективных жесткостях данных эксперимента РБМ. При аппроксимации жесткостных зависимостей отношений $\rho_{22/23}^{24}$ выражением (1) для недифференциальных данных РБМ использованы эффективные жесткости $R_{\text{eff}}^{Mu} = 6.5$ ГВ и $R_{\text{eff}}^{Mo} = 7.5$ ГВ, принятые в [6], но дифференциальные данные РБМ при аппроксимации не учитываются. Видно, что недифференциальные данные РБМ неплохо ложатся на общие кривые. Если теперь

поставить на аппроксимирующих кривых точки, соответствующие дифференциальным данным РБМ, то эффективная жёсткость этих данных $R_{\text{eff}}^{MuMo} \approx 2.4 \text{ ГВ}$.

Выводы.

1. Во внутренней гелиосфере в минимумах “нормальных” СЦ 21–23 интенсивность ГКЛ изменяется во времени с хорошо выраженным 22-летним (или магнитным) циклом с одним кроссовером в области высоких энергий.

2. В аномальном минимуме СЦ 24 ($A < 0$; 2007–2010 гг.) максимальная интенсивность ГКЛ была значительно выше, чем в предыдущие минимумы СЦ, независимо от полярности гелиосферного магнитного поля в эти минимумы, а максимальная интенсивность АКЛ — значительно ниже, чем в предыдущий минимум СЦ 23 ($A > 0$; 1997–1998 гг.), и, возможно, ниже, чем в “нормальном” СЦ 22 ($A < 0$; 1987 г.).

3. Относительная разность между максимальной интенсивностью ГКЛ в минимуме СЦ 24 и максимальной интенсивностью в два предыдущих минимума плавно меняется с энергией. В области низких и средних энергий ($T_n < 500 \text{ МэВ}$) эта относительная разность практически постоянна, а при больших энергиях — быстро уменьшается, причём значительно быстрее при сравнении минимума СЦ 24 с СЦ 22 (т. е. при одной и той же полярности гелиосферного магнитного поля), чем с СЦ 23.

4. Как недифференциальные, так и дифференциальные данные эксперимента РБМ неплохо соответствуют общим закономерностям зависимости от жёсткости отношения интенсивности ГКЛ в минимуме СЦ 24 к интенсивностям в минимумах СЦ 22 и 23, если эффективная жёсткость дифференциальных данных эксперимента РБМ $R_{\text{eff}}^{MuMo} \approx 2.4 \text{ ГВ}$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] М. Б. Крайнев, Краткие сообщения по физике ФИАН **39**(4), 3 (2012).
- [2] N. S. Svirzhevsky et al., Proc. 31 Internat. Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc1105.pdf> (2009).
- [3] M. B. Krainev, M. S. Kalinin, Proc. 31 Internat. Cosmic Ray Conference, Lodz, Poland, <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc1043.pdf> (2009).
- [4] B. Heber et al., Astrophys. J. **699**, 1956 (2009).
- [5] А. К. Свиржевская и др., Труды научной сессии МИФИ–2010, МИФИ, Москва 4, 95 (2010).

- [6] H. Moraal and P. H. Stoker, Journ. Geophys. Res. **115**, A12109 doi:10.1029/2010JA015413 (2010).
- [7] F. B. McDonald, W. R. Webber, and D. V. Reames, Geophys. Res. Lett. **37**, L18101 doi:10.1029/2010GL044218 (2010).
- [8] R. A. Mewaldt et al., Astrophys. J. **723**, L1 (2010).
- [9] Г. А. Базилевская и др., Известия РАН, сер. физ. **75**(6), 782 (2011).
- [10] М. Б. Крайнев, М. С. Калинин, Известия РАН, сер. физ. **75**(6), 786 (2011).
- [11] G. A. Bazilevskaya, A. K. Svirzhevskaya, Space Science Reviews **85**, 431 (1998).
- [12] Ю. И. Стожков и др., Препринт ФИАН № 14 (Москва, 2007).
- [13] F. B. McDonald, in Cosmic Rays in the Heliosphere, (eds.) L. A. Fisk et al., Space Science series of ISSI, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht–Boston–London, 33–50 (1998).
- [14] Space environment (natural and artificial) – Galactic cosmic ray model, International standard ISO 15390:2004(E), ISO, New Jork, 6p. (2004).
- [15] J. R. Jokipii, Review of Geophysics and Space Physics **9**, 27 (1971).
- [16] M. Garcia–Munoz, G. M. Mason, and J. A. Simpson, Astrophys. J. **182**, L81 (1973).
- [17] F. B. McDonald, B. J. Teegarden, J. H. Trainor, and W. R. Webber, The Astrophysical Journal **187**, L105 (1974).
- [18] L. A. Fisk, B. Kozlovsky, R. Ramaty, The Astrophysical Journal **190**, L35 (1974).
- [19] N. L. Grigorov et al., Proc. 21 Internat. Cosmic Ray Conference, Adelaide, Australia, **6**, 176 (1990).
- [20] <http://helio.esa.int/ulysses/ftp/data/cospin/ket/>.
- [21] http://www.srl.caltech.edu/ACE/CRIS_SIS/.
- [22] J. P. L. Reinecke et al., Proc. 25 Internat. Cosmic Ray Conference, Durban, South Africa, **2**, 49 (1997).
- [23] J. M. Clem et al., Astrophys. J. **464**, 507 (1996).

Поступила в редакцию 30 июня 2011 г.