

УДК 523.165

Ю. Л. Колесник, А. И. Ключева, Б. А. Шахов, Ю. И. Федоров

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
ул. Академика Заболотного 27, Киев, 03680
kolesnyk@mao.kiev.ua, shakhov@mao.kiev.ua, fedorov@mao.kiev.ua

Влияние высокоскоростных потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей

Исследовано влияние высокоскоростных рекуррентных потоков солнечного ветра из корональных дыр на интенсивность галактических космических лучей. На основе данных мировой сети нейтронных мониторов было рассмотрено распределение галактических космических лучей для разных фаз солнечного цикла. В рамках неоднородной модели, включающей однородный фон и области высокоскоростных потоков (ВСП), получено решение уравнения переноса и оценено влияние ВСП на пространственное распределение галактических космических лучей. Показано, что теоретические расчеты при разных допущениях относительно транспортного пробега космических лучей за соответствующий период ВСП согласуются с экспериментальными результатами для 2000—2014 гг.

ВПЛИВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПОТОКІВ СОНЯЧНОГО ВІТРУ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ, Колесник Ю. Л., Ключева А. І., Шахов Б. О., Федоров Ю. І.— Досліджено вплив високошвидкісних рекуррентних потоків сонячного вітру із корональних дір на інтенсивність галактичних космічних променів. На основі даних світової мережі нейтронних моніторів було розглянуто розподіл галактичних космічних променів для різних фаз сонячного циклу. В рамках неоднорідної моделі, що включає однорідний фон та області високошвидкісних потоків (ВШП), отримано розв'язок рівняння переносу і оцінено вплив ВШП на просторовий розподіл галактичних космічних променів. Показано, що теоретичні розрахунки при різних припущеннях стосовно транспортного пробігу космічних променів за відповідний період ВШП узгоджуються з експериментальними результатами за 2000—2014 рр.

THE EFFECT OF SOLAR WIND HIGH-SPEED STREAMS ON THE GALACTIC COSMIC RAYS INTENSITY, by Kolesnyk Yu. L., Klyuyeva A. I., Shakhov B. A., Fedorov Yu. I.— The effect of high-speed recurrent solar wind streams from coronal holes on the intensity of the galactic cosmic rays has been investigated. The distribution of galactic cosmic rays for various solar cycle phases was considered on the basis of data of neutron monitor world network. In the framework of inhomogeneous model which includes homogeneous background and regions of high-speed streams, the transport equation solution has been obtained and the effect of high-speed streams on the galactic cosmic ray spatial distribution has been evaluated. It is shown that theoretical calculations is confirmed with experimental results that have been obtained for 2000—2014 years if to apply assumptions regarding the mean free path of cosmic rays in the corresponding period of high-speed streams.

ВВЕДЕНИЕ

В гелиосфере поток галактических космических лучей (ГКЛ) модулируется в результате взаимодействия ГКЛ с неоднородностями межпланетного магнитного поля и ударными волнами в солнечном ветре (СВ) [7, 8, 12, 18, 21, 26, 27, 29, 32, 33]. Поэтому космические лучи (КЛ) являются важным источником информации о космической погоде в гелиосфере [19, 22, 36]. Большое значение в этом аспекте имеют исследования форбуш-эффектов (ФЭ), параметры которых дают непосредственную информацию об особенностях крупномасштабных возмущений в межпланетной среде [1, 4, 23, 24]. Возмущения межпланетной среды бывают двух типов: спорадические, обусловленные корональными выбросами массы (КВМ), и рекуррентные, связанные с истечением высокоскоростных потоков (ВСП) плазмы из корональных дыр (КД) [18, 20, 23, 28, 40, 45, 54, 55, 59]. В работе на большом статистическом материале за 2000—2014 гг. исследуется связь корональных дыр с ВСП солнечного ветра на орбите Земли и особенности модуляции ГКЛ этими потоками. На основе теоретических моделей распространения ГКЛ в гелиосфере, которые учитывают наличие ВСП СВ, предпринята попытка объяснить эти экспериментальные данные.

РЕКУРРЕНТНЫЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПОТОКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ

Исследования ВСП СВ проводились на основе различных подходов и методик [10, 11], в результате чего составлены специальные каталоги [10, 37—39, 41, 42, 58], включающие основные параметры ВСП, такие как дата вхождения Земли в ВСП, длительность жизни потока на орбите Земли, его тип в зависимости от источника (корональная дыра

или спорадическое возмущение), скорость спокойного СВ (скорость до вхождения в поток), максимальная скорость СВ в потоке и производные этих величин.*

Для составления выборки ВСП рекуррентного типа мы объединили данные всех названных каталогов и провели их анализ. В процессе обработки каталогов каждое событие дополнительно подвергалось проверке по трем критериям: 1) обязательное наличие корональной дыры, прохождение которой по диску Солнца могло быть источником ВСП на орбите Земли в указанный в каталоге период; 2) отсутствие в межпланетной среде крупномасштабных возмущений спорадического типа: ударных волн, корональных выбросов массы, магнитных облаков и т. п. в течение всего периода жизни ВСП на орбите Земли и минимум за два дня до и после его регистрации; 3) типичное для рекуррентных ВСП поведение основных параметров: повышенное значение ионной температуры, повышенное значение скорости СВ (> 400 км/с), пониженная концентрация, увеличение напряженности магнитного поля с последующим его понижением. Все события, не соответствующие данным критериям, исключались из дальнейшего анализа.

В результате обработки данных каталогов сформирован список, включающий более 400 ВСП, источниками которых с большой вероятностью являлись корональные дыры. На следующем этапе работы нами рассмотрены особенности модуляции ГКЛ выделенными рекуррентными потоками высокоскоростного СВ.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Интенсивность космических лучей исследовалась на основе данных мировой сети станций КЛ, включающей 14 высокоширотных, 24 среднеширотных и 6 низкоширотных нейтронных мониторов (НМ). Анализ выполнен с применением метода глобальной съемки, позволяющего по данным наземных наблюдений исследовать плотность (изотропную составляющую потока КЛ), векторную анизотропию и спектр ГКЛ за пределами атмосферы и магнитосферы Земли [12, 13, 17, 43].

Метод глобальной съемки представляет собой сферический анализ, в котором используется разложение вариаций КЛ по сферическим гармоникам. В применении к данным НМ метод глобальной съемки объединяет в себе три метода: метод функций связи, траекторных расчетов движения частиц в магнитном поле Земли и метод сферического анализа.

Функции связи позволяют осуществить переход от вариаций КЛ в точке наблюдения к ожидаемым вариациям на границе атмосферы, т. е. позволяют учесть взаимодействие первичных и вторичных частиц

* См. также сайты http://www.spacescience.ro/new1/HSS_Catalogue.html,
http://www.spacescience.ro/new1/Pagini_finale/GS_HSS_Catalogue.htm,
http://www.solen.info/solar/coronal_holes.html

различных энергий с веществом атмосферы. Метод траекторных расчетов частиц позволяет учесть влияние магнитосферы на первичные КЛ через приемные коэффициенты, в которые также включен учет влияния атмосферы, что делает возможным переход от наблюдаемых вариаций вторичной компоненты КЛ к вариациям внеземного происхождения. Метод сферического анализа позволяет выделить существенные для конкретной задачи сферические гармоники, например изотропную и анизотропную вариации интенсивности КЛ за пределами магнитосферы в произвольные интервалы времени [2].

Данные конкретного нейтронного монитора содержат информацию, которая зависит от точки наблюдения и ориентации асимптотического конуса приема данной станции КЛ. В связи с этим форбуш-эффекты на отдельных станциях будут выглядеть по-разному, что существенно усложняет изучение и интерпретацию данных. Метод глобальной съемки имеет существенное преимущество в сравнении с данными отдельных нейтронных мониторов, так как позволяет находить глобальные характеристики КЛ за пределами магнитосферы независимо от положения точки наблюдения на Земле.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ РЕКУРРЕНТНОГО ТИПА

В данной работе изучение модуляции ГКЛ высокоскоростными потоками СВ от КД проводилось с использованием среднечасовых данных вариаций плотности КЛ, полученных методом глобальной съемки. Прохождение ВСП СВ приводит к понижению интенсивности ГКЛ, причем временной профиль их интенсивности в данной точке пространства может иметь прямоугольную или трапециoidalную форму. Для каждого события из сформированной выборки ВСП строился график зависимости интенсивности потока ГКЛ от времени и изучался его профиль.

Несмотря на тщательный отбор рекуррентных ВСП на предыдущем этапе работы, для большей надежности выделения форбуш-эффектов, вызванных прохождением ВСП из корональных дыр, мы применили дополнительные критерии сепарации и при анализе самих форбуш-понижений. Так, если регистрировался предвестник форбуш-понижения, если событие характеризовалось затянутой фазой восстановления или длительной нисходящей фазой, если амплитуда понижения превышала 5 %, мы исключали такие события из дальнейшего рассмотрения, так как зачастую подобные особенности формы профиля ФП свидетельствуют о смешанной или спорадической природе источника модуляции. В результате оказалось, что многие ВСП очень слабо модулируют поток ГКЛ и не вызывают заметных (с амплитудой понижения интенсивности КЛ более 0.5 %) форбуш-понижений.

В итоге было отобрано 86 форбуш-понижений, для которых прослеживалась надежная связь с потоками быстрого солнечного ветра от КД. Приблизительно четвертая часть выбранных ФЭ имела профиль близкий к прямоугольной форме. Были отмечены следующие особенности таких ФЭ: а) величина понижений интенсивности КЛ варьировала в пределах 0.8—2.5 %, в то время как амплитуда форбуш-эффектов от спорадических источников обычно составляет 5—15 %; б) длительность ФЭ (от начала спада до полного восстановления интенсивности) чаще всего составляла 4-5 сут, что соответствует длительности жизни ВСП СВ в окрестностях Земли, а это, в свою очередь, согласуется с временем прохождения корональной дыры через центральный меридиан Солнца [16].

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБЪЯСНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для теоретического объяснения экспериментальных данных используем стационарную модель распространения ГКЛ в гелиосфере. Такая модель была детально рассмотрена в работах [34, 51]. Для нахождения концентрации ГКЛ в околоземном пространстве во время рекуррентного возмущения межпланетной среды эту модель можно использовать следующим образом. Будем считать, что гелиосфера во время выброса ВСП плазмы представляет собой многослойную среду, состоящую из возмущенной и невозмущенной области. Возмущенная область, в которую попадает Земля, будет возникать в результате выброса ВСП плазмы, ограниченной конической боковой поверхностью, искривленной вследствие вращения Солнца. Скорость плазмы внутри данной области характеризуется значением u_s (см. рис. 1). Невозмущенная область — это вся остальная часть гелиосферы, в которой радиальная скорость солнечного ветра равна u_0 . Отметим, что рассеяние частиц в этих областях происходит различным образом и характеризуется коэффициентами диффузии: D_s для возмущенной области и D_0 для невозмущенной. В межзвездной среде скорость солнечного ветра предполагается равной нулю, а рассеяние частиц становится слабым, что соответствует современным данным. Концентрация ГКЛ в межзвездной среде ($r \rightarrow \infty$) была выбрана в следующем виде [9]:

$$N_r(r) = N_\infty (1 - \frac{r_0}{r})^{-(1+\alpha)/2}, \quad (1)$$

где $N(r, p, t) = \int f(r, \mathbf{p}, t) d\mathbf{p}$ — концентрация частиц с данным значением импульса, а интегрирование производится по углам вектора скорости частицы, $p/(m_0 c)$ — нормированный импульс частицы, m_0 — масса покоя частицы, c — скорость света в вакууме, α — спектральный индекс. В работе [34] аналитическим путем было получено распределение ГКЛ в многослойной среде. В частности, для возмущенной области формула для концентрации частиц высоких энергий ($\alpha > 10$), нормированной к спектру (1), будет иметь вид

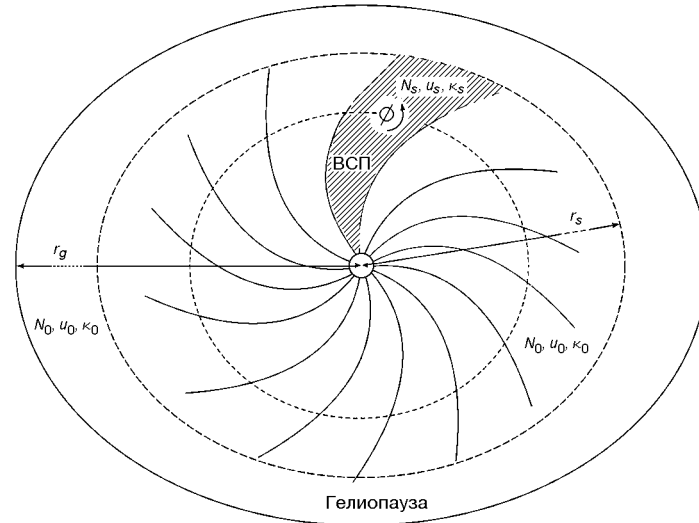


Рис. 1. Модуляция галактических космических лучей в гелиосфере при наличии высокоскоростного потока плазмы

$$N_s(r) = A_1(s) F(2s/3, 2; x_s r/r_s), \quad (2)$$

где $x_s = u_s r_s / v_s$ — параметр модуляции ГКЛ для возмущенной области, r_s — гелиоцентрическое расстояние до границы ВСП СВ, $F(a, b; x)$ — первое линейно независимое решение вырожденного гипергеометрического уравнения, $s = 2$, $A_1(s)$ и другие коэффициенты для его нахождения были определены из выражений

$$A_1(s) = \frac{\{F(2s/3, 2; x_0) [K(2s/3, 2; x_0) 2x_0 (2s/3 - 1, 3; x_0)] (2s/3, 2; x_0) [x_0 F(2s/3 - 1, 3; x_0) - K F(2s/3, 2; x_0)]\}}{[Z F(2s/3, 2; x_s)]},$$

$$K = \frac{x_s r_s / v_0}{F(2s/3, 2; x_s)} [F(2s/3 - 1, 3; x_s) - F(2s/3, 2; x_s)] x_0,$$

$$Z = \frac{[(2s/3, 2; x_0) K 2x_0 (2s/3 - 1, 3; x_0)] T}{[x_0 F(2s/3 - 1, 3; x_0) - K F(2s/3, 2; x_0)]} \quad (3)$$

$$x_0 = \frac{sr_g}{3r_s} \left[1 - \frac{2}{3} s, 2; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right] = x_0 \frac{2sr_g}{3r_s} \left[\frac{2}{3} s - 1, 3; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right],$$

$$T = F \left[\frac{2}{3} s, 2; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right] \left[1 - x_0 \frac{sr_g}{3r_s} \right] = x_0 \frac{sr_g}{3r_s} F \left[\frac{2}{3} s - 1, 3; x_0 \frac{r_g}{r_s} \right].$$

Здесь $x_0 = u_0 r_s / v_0$ — параметр модуляции КЛ для невозмущенной области, r_g — расстояние от Солнца до гелиопаузы, v_0 / v_{in} , v_{in} — коэффициент диффузии в межзвездной среде; $F(a, b; x)$ — второе линейно независимое решение вырожденного гипергеометрического уравнения [3].

Для нахождения концентрации ГКЛ в околоземном пространстве в отсутствие возмущенной межпланетной среды (фоновое значение концентрации ГКЛ) можно использовать более простую модель распространения ГКЛ в гелиосфере и межзвездной среде, которая была детально рассмотрена в работе [35]. Здесь гелиосфера рассматривается как сферически-симметричная среда, которая от межзвездного пространства ограничивается гелиопаузой. В этой области радиальная скорость солнечного ветра характеризуется постоянным значением u_0 , а рассеяние частиц — коэффициентом диффузии D_0 . Рассеяние ГКЛ в межзвездной среде происходит на неподвижных магнитных неоднородностях, является более слабым, чем в гелиосфере, и характеризуется коэффициентом диффузии D_{in} . Спектр ГКЛ на бесконечности также описывается выражением (1). В работе [35] была получена формула для концентрации частиц высоких энергий, нормированной к спектру (1), при модуляции их в гелиосфере:

$$N_0(r) = \frac{F(2s/3, 2; x_g r/r_g)}{1 - \frac{sx_g}{3} F(2s/3, 2; x_g) - \frac{sx_g}{3} F(2s/3 - 1, 3; x_g)}, \quad (4)$$

где $x_g = u_0 r_g / D_0$ — параметр модуляции КЛ для гелиосферы.

Таким образом, форбуш-понижение КЛ может характеризоваться величиной M , которая будет определяться для теоретических вычислений как $M = [(N_0 - N_s)/N_0] 100\%$, а из данных эксперимента — как $M = |I(\%)|$, где $I(\%)$ — изменение интенсивности КЛ, регистрируемой нейтронными мониторами после прохождения ВСП СВ. Из (2) и (4) видно, что при нахождении N_0 и N_s необходимо знать не только значения скорости СВ, которые могут быть получены экспериментальным путем, но и коэффициенты диффузии КЛ как для невозмущенной области (D_0), так и для области ВСП (D_s). Для их нахождения воспользуемся формулой, которая приведена в работе [48]:

$$D_{0,\parallel} = \frac{B_0}{B} \frac{P}{P_0} \frac{a}{1 - (P/P_0)^c} \frac{(P_k/P_0)^c}{(P_k/P_0)^c}, \quad (5)$$

где v/c , т. е. отношение скорости частицы к скорости света, B — напряженность магнитного поля в данной точке пространства, $B_0 = 1$ нТл, P — жесткость частицы, $P_0 = 1$ ГВ, a — индекс, который изменяется со временем, $c = 3.0$, $b = 1.95$. Отметим, что $D_{0,\parallel}$, a , P_k для каждого года имеют свои значения. В частности, значения для a , P_k приведены в работе [48], в то время как $D_{0,\parallel}$ могут быть найдены если использовать значения длин пробега частицы на определенной энергии (100 МэВ), приведенные в работе [48]. Так, для 2006 г. $D_{0,\parallel} = 1.105 \cdot 10^{24} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и для 2009 г. $D_{0,\parallel} = 1.358 \cdot 10^{23} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$.

На рис. 2 показана зависимость длины пробега частицы от ее жесткости для четырех разных случаев до наступления форбуш-пониже-

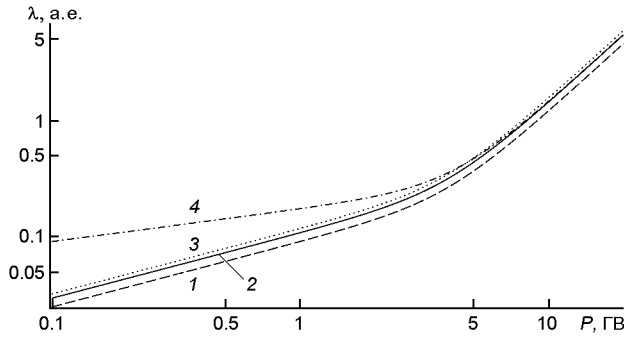


Рис. 2. Зависимость длины пробега частицы от ее жесткости P для разных дат до наступления форбуш-понижения: 1 — 06.08.05, 2 — 05.06.06, 3 — 09.11.06, 4 — 13.11.10

Данные для ВСП потоков

Дата	Экспериментальные значения					Теория		
	u_0 , км/с	u_s , км/с	B_f , нТл	B_s , нТл	M , %	$N_0, 10^{19} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	$N_s, 10^{19} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$	M , %
06.08.2005	370	714	8.1	6.0	2.5	1.8	2.43	1.8
06.05.2006	387	636	6.81	6.05	1.1	2.14	2.41	1.7
09.11.2006	349	633	2.6	4.1	2.4	5.61	3.56	3.0
13.11.2010	340	637	5.2	5.0	1.6	2.18	2.27	2.6

ния. Таким образом, если для каждого ВСП использовать значения магнитного поля в околоземном пространстве как до наступления форбуш-понижения (B_f), так и после (B_s), то для частиц с жесткостью $P = 10$ ГВ можно найти соответствующие коэффициенты диффузии. После этого, задав следующие значения параметров для гелиосферы и межзвездного пространства: $r_g = 100$ а. е., $r_s = 10$ а. е., $\beta = 2.7$, $\alpha = 0.001$, мы получили N_0 , N_s и $M(\%)$ для каждого случая ВСП. Эти данные приведены в таблице.

На рис. 3 показаны интенсивности КЛ, полученные экспериментальным путем во время форбуш-понижений.

Оценить величину вариации интенсивности ГКЛ, обусловленную прохождением высокоскоростного потока солнечного ветра, можно и другим способом. Для этого используем аналитические решения уравнения переноса КЛ, которые были получены в приближении постоянного коэффициента диффузии частиц [5, 15, 30, 50]. Вначале рассмотрим пространственное распределение КЛ в невозмущенной сферически-симметричной гелиосфере, в которой отсутствуют высокоскоростные потоки. Уравнение переноса, описывающее распространение КЛ в гелиосферных магнитных полях, имеет следующий вид [6, 31, 44]:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 D \frac{dN}{dr} \right) - u \frac{dN}{dr} - \frac{2u_1}{3r} p \frac{dN}{dp} = 0. \quad (6)$$

При энергиях частиц больше или порядка 10 ГэВ спектр ГКЛ оказывается степенным: $N \sim p^{-\gamma}$ с показателем спектра $\gamma = 4.7$ [14, 49, 57]. Предположим, что КЛ на границе области модуляции $N_0(p)$ описыва-

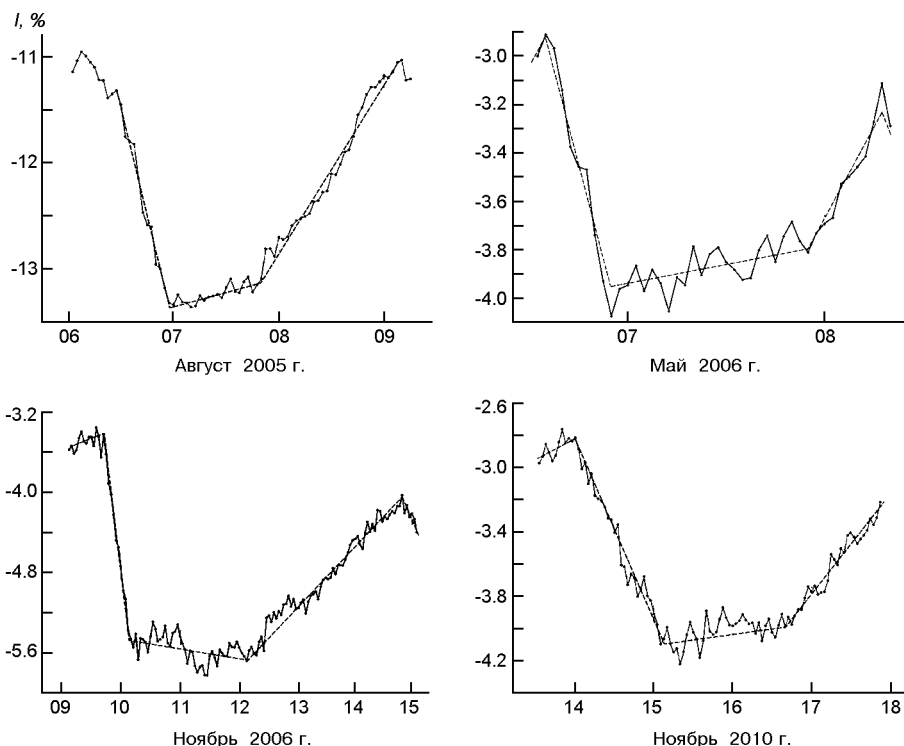


Рис. 3. Зависимость интенсивности КЛ от времени во время форбуш-понижений

ется степенной функцией импульса как при больших, так и при малых энергиях:

$$N_0(\epsilon) = N_1 (1 - \epsilon)^{-1} N_1 (\epsilon - 1), \quad (7)$$

где N_1 — постоянная величина, а $\chi(x)$ — единичная функция Хевисайда. Согласно (7) $N_0(\epsilon) \sim \epsilon^{-4.7}$ при $p > mc$. В случае малых энергий ($\epsilon < 1$) немодулированный спектр ГКЛ также степенной, но с другим показателем степени α_1 . Отметим, что для нерелятивистских КЛ показатель степени $\alpha_1 = 1.5$ согласуется с энергетическим распределением ГКЛ, измеренным космическим аппаратом «Вояджер-1» в 2012 г. [47, 56, 57].

Приведем решение уравнения переноса (6), соответствующее энергетическому распределению КЛ (7), заданному на границе области модуляции (на сфере радиуса r_0) [30]:

$$N(\epsilon, s) = N_1 (1 - \epsilon)^{-1} \frac{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)} \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\alpha_1} \frac{F(s_n, 2; -\alpha_1)}{s^{\alpha_1} (s_n - 1)(s_n - s) F(s_n, 2; -\alpha_1)}$$

$$N_1 (\epsilon - 1) \frac{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}{F(2 - \alpha_1/3, 2; -\alpha_1)}, \quad (8)$$

где r/r_0 — безразмерная координата, $u_1 r_0 / u_0 r_1$ — параметр модуляции КЛ. Величины s_n , которые содержатся во втором слагаемом выражения (8), являются корнями уравнения $F(s, 2; \nu_1) = 0$. Это уравнение имеет только отрицательные корни. Производные по s в знаменателе второго слагаемого формулы (8) берутся в точке s_n . Пространственно-энергетическое распределение частиц высоких энергий ($\nu > 1$) описывается последним слагаемым (8).

Таким образом, спектр КЛ высоких энергий внутри области модуляции оказывается степенным с тем же показателем спектра ν , что и спектр на границе области модуляции (при $\nu = 1$) (7). Спектр нерелятивистских КЛ ($\nu \ll 1$) согласно соотношению (8) приближенно описывается степенной функцией импульса с показателем спектра ν_1 . Следовательно, пространственно-энергетическое распределение КЛ в невозмущенной гелиосфере описывается соотношением (8).

Теперь рассмотрим пространственное распределение ГКЛ при наличии высокоскоростного потока СВ. Предположим, что область модуляции ГКЛ состоит из двух областей. Во внутренней области ($r < r_1$) скорость СВ радиальна и по величине равна u , а рассеивательные свойства межпланетной среды характеризуются коэффициентом диффузии КЛ D_1 .

Таким образом, скорость u высокоскоростного потока, распространяющегося во внутренней области гелиосферы, превышает скорость u_1 невозмущенного СВ во внешней гелиосфере. Диффузия КЛ в невозмущенном СВ описывается коэффициентом диффузии D_2 , а параметр модуляции КЛ во внешней области модуляции имеет вид $\nu_1 = ur_0 / (u_1 r_1)$. При нахождении аналитического решения уравнения переноса удобно использовать преобразование Меллина [6, 15, 30, 34]. В результате можно получить выражения для концентрации частиц высоких энергий как во внутренней области гелиосферы, так и во внешней. Так, для внутренней области концентрация КЛ имеет вид

$$N(r, \nu) = N_1 \frac{G(\nu)}{H(\nu)} F(2\nu/3, 2; \nu_1), \quad (9)$$

где величины $G(\nu)$ и $H(\nu)$ представляют собой функции

$$G(s) = 2^{-3} \nu^{-2} \nu_1^{-1},$$

$$H(s) = \nu_1^{-1} \left(\nu_1^{-4} \nu_2^{-3} \nu_3^{-2} \nu_4^{-1} \right) \left[\nu_5^{-1} \nu_6^{-2} \nu_7^{-3} \nu_8^{-4} \nu_9^{-5} \right] \times$$

$$\nu_1^{-1} F(2s/3, 2; \nu_1); \nu_2^{-2} F(2s/3, 1, 3; \nu_1); \nu_3^{-3} F(2s/3, 2; \nu_1);$$

$$\nu_4^{-4} F(2s/3, 1, 3; \nu_1); \nu_5^{-5} F(2s/3, 2; \nu_1);$$

$$\nu_6^{-1} (2s/3, 2; \nu_1); \nu_7^{-2} (2s/3, 1, 3; \nu_1); \nu_8^{-3} (2s/3, 2; \nu_1),$$

вычисленные в точке $s = \nu$.

Для внешней области концентрация частиц имеет вид

$$N(r, \nu)$$

$$N_1(\rho) = \frac{L(\rho)F(2/3, 2; \rho)}{H(\rho)} M(\rho) (2/3, 2; \rho)$$

$$N_1(\rho) = \frac{L(s_n)F(s_n, 2; \rho)}{(s_n - 1)(s_n) H(s_n)/s} M(s_n) (s_n, 2; \rho)$$

$$N_1(\rho) = \frac{L(\rho)F(2/3, 2; \rho)}{H(\rho)} M(\rho) (2/3, 2; \rho), \quad (10)$$

где величины L и M представляют собой функции: $L(s) = 2^{-1} \rho^{-2} + \rho^{-1} [\rho^{-2} (1 - \rho)]$, $M(s) = \rho^{-1} \rho^{-4} \rho^{-3} [\rho^{-2} (1 - \rho)]$. Концентрация ГКЛ высоких энергий описывается последним слагаемым (10).

Отметим, что концентрации ГКЛ (9) и (10) для частиц с импульсом $p > mc$ представляют собой степенную функцию импульса частицы с показателем степени немодулированного спектра КЛ. Пространственное распределение частиц определяется параметрами модуляции ρ и скачком скорости среды на границе ВСП солнечного ветра. В этом случае параметр модуляции КЛ в этой области равен ur_0/ρ . Во внешней области ($r_1 < r < r_0$, или $\rho < 1$, где $\rho = r_1/r_0$), скорость СВ радиальна и равна u_1 по величине, причем $u_1 = u/\rho$.

На рис. 4 приведена зависимость концентрации от безразмерной гелиоцентрической координаты ρ . Концентрация частиц нормирована на соответствующее значение на границе области модуляции ($r = r_0$) (7). Пунктирная кривая иллюстрирует пространственное распределение концентрации КЛ в невозмущенной гелиосфере. Сплошной кривой представлена зависимость концентрации КЛ $N(\rho)$ (9), (10) от безразмерной координаты ρ . Расчеты проведены при следующих значениях параметров: $\rho_1 = 0.1$, $\rho_2 = 0.18$, $\rho_3 = 1.8$, $\rho_4 = 3$. Отметим, что в пространственной области ρ_1 концентрация частиц в ВСП оказывается меньше, чем концентрация КЛ в невозмущенном СВ. Если ρ_1 , то различия между величинами концентрации КЛ в невозмущенной гелиосфере и СВ, содержащем ВСП, становятся малыми, а пунктирная и сплошная кривая практически сливаются.

Для расчета пространственного распределения ГКЛ в невозмущенной гелиосфере воспользуемся соотношением для концентрации частиц (8). Поскольку средняя энергия детектируемых частиц составляет величину порядка 10 ГэВ, то необходимо учитывать только последнее слагаемое формулы (8). Для оценки значения параметра мо-

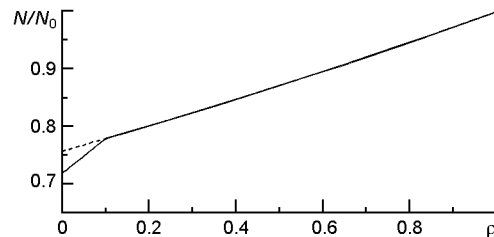


Рис. 4. Зависимость относительной концентрации КЛ от безразмерного гелиоцентрического расстояния

дуляции β_1 (событие от 09.11.2006, см. таблицу), воспользуемся значением пробега частиц $\beta = 3.77$ а. е. при жесткости $R = 10$ ГВ, соответствующего уровню солнечной активности 2006 г., приведенному в работе [48]. При использовании коэффициента диффузии КЛ $\beta/3$ и значения 349 км/с скорости СВ для интересующего нас периода (вне ВСП) для предполагаемого радиуса области модуляции КЛ $r_0 = 100$ а. е. получаем параметр модуляции КЛ в невозмущенной среде: $\beta_1 = 0.093$.

При прохождении ВСП 09.11.2006 г. скорость СВ увеличилась до значения $u = 633$ км/с, следовательно $\beta = 1.814$. Магнитное поле на орбите Земли увеличилось при прохождении ВСП от 2.6 нТл до 4.1 нТл. Для оценки коэффициента диффузии КЛ в ВСП СВ используем формулу (5) следующим образом:

$$\frac{B_1}{B} = \beta_1,$$

где B, B_1 — индукция межпланетного магнитного поля в ВСП и невозмущенном СВ соответственно, β_1 — коэффициент диффузии в невозмущенном СВ. Таким образом, получаем значение параметра модуляции КЛ $\beta_1 = 0.265$, соответствующее ВСП СВ.

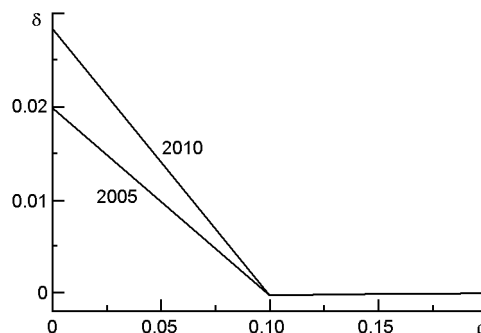
Оценим относительное понижение интенсивности КЛ при прохождении ВСП СВ. Обозначим концентрацию КЛ в данной точке пространства в невозмущенной гелиосфере величиной $g_0(\beta, R)$, а величиной $g(\beta, R)$ — концентрацию КЛ в СВ при наличии в нем ВСП, которая описывается соотношениями (9), (10). Введем следующую функцию, которая описывает относительное изменение концентрации КЛ при прохождении ВСП СВ: $1 - g(\beta, R)/g_0(\beta, R)$. Были использованы следующие значения параметров: $\beta = 4.7$, $\beta_1 = 0.1$, $\beta_1 = 0.093$, $\beta_1 = 0.265$, $\beta = 1.814$. На орбите Земли, т. е. при $\beta = 0.01$ мы получаем $(0.01) = 0.0238$. Таким образом, после прохождения ВСП в 2006 г. понижение интенсивности КЛ с жесткостью $R = 10$ ГВ составило 2.4 %.

Рассмотрим понижение интенсивности ГКЛ, обусловленное прохождением ВСП 2010 г. (событие от 13.11.2010, см. таблицу). Скорость невозмущенного ветра составила $u_1 = 340$ км/с. Используя значение пробега $\beta = 1.93$ а. е. [48], получим параметр модуляции КЛ в невозмущенном СВ: $\beta_1 = 0.233$. Скорость среды в ВСП $u = 637$ км/с, следовательно $\beta = 1.87$. Используя значения индукции межпланетного поля на орбите Земли в невозмущенном СВ и в ВСП, получим параметр модуляции в возмущенном СВ: $\beta_1 = 0.420$. Для ВСП 2010 г. относительное понижение интенсивности частиц жесткости $R = 10$ ГВ составило 2.6 % ($\beta_1 = 0.026$).

В результате аналогичных расчетов для ВСП события от 06.05.2006 (см. таблицу) получено значение $\beta_1 = 0.0173$, т. е. относительное понижение интенсивности ГКЛ составило 1.7 %.

Проводя аналогичные расчеты для ВСП 2005 г. (событие от 06.08.2005), получим: $\beta = 1.93$, $\beta_1 = 0.306$, $\beta_1 = 0.437$.

Рис. 5. Зависимость относительного понижения интенсивности КЛ от гелиоцентрической координаты в 2005 и 2010 гг.



Таким образом, относительное понижение интенсивности ГКЛ, обусловленное прохождением ВСП СВ 2005 г., составляет величину 1.8 % ($\delta = 0.0178$).

На рис. 5 приведена зависимость величины (δ) от гелиоцентрического расстояния для случаев, соответствующих прохождению высокоскоростных потоков СВ 2005 и 2010 гг. Видно, что в области ВСП относительная вариация интенсивности ГКЛ положительна. Следовательно, интенсивность КЛ в высокоскоростном потоке оказывается пониженной относительно интенсивности частиц в невозмущенной гелиосфере. Причем чем дальше от границы ВСП, тем больше величина δ и тем ниже интенсивность ГКЛ. Величина δ изменяет знак на границе ВСП (в точке $\rho = 0.1$). Однако абсолютная величина ($\delta > 0.1$) оказывается небольшой и составляет несколько сотых долей процента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных мировой сети нейтронных мониторов позволил исследовать процесс модуляции ГКЛ высокоскоростными потоками СВ из корональных дыр. Показано, что величина уменьшения интенсивности КЛ при прохождении ВСП определяется следующими характеристиками плазмы: гидродинамической скоростью потока, характерным размером потока, рассеивательными свойствами среды, определяющими транспортный пробег частиц высокой энергии. Исследованы характеристики рекуррентных понижений интенсивности КЛ, обусловленных потоками быстрого СВ от корональных дыр: длительность и амплитуда понижения, форма временного профиля интенсивности ГКЛ. Показано, что амплитуда исследуемых понижений составляет 0.8—2.5 %, а их длительность — 4-5 сут, что согласуется с длительностью существования ВСП СВ в околоземном космическом пространстве.

На основании решения уравнения переноса, описывающего распространение КЛ в гелиосферных магнитных полях, проведена оценка влияния ВСП на пространственное распределение ГКЛ. Расчеты проведены как с учетом влияния рассеивающих свойств межзвездной

среды на модуляцию ГКЛ, так и без учета такого влияния. В одной из рассмотренных задач немодулированный спектр ГКЛ задавался на гелиоцентрическом расстоянии, значительно превышающем размеры гелиосферы, а в другой — на гелиопаузе. Расчеты показали, что оба подхода приводят к близким результатам, если транспортный пробег КЛ в межзвездной среде значительно превышает пробег частиц внутри гелиосферы. Сделаны оценки понижения интенсивности ГКЛ на орбите Земли во время прохождения ВСП и проведено сравнение с наблюдательными данными. Приведенные в таблице результаты показывают соответствие теоретических оценок и данных, полученных на мировой сети нейтронных мониторов.

Авторский коллектив выражает благодарность сотрудникам отдела космических лучей ИЗМИРАН за предоставленные среднечасовые данные вариаций плотности КЛ, обработанные методом глобальной съемки, а также рецензенту за ряд ценных замечаний.

1. *Абунин А. А.* Связь величины форбуш-эффекта с внутренними и внешними параметрами // Баксанская молодежная школа экспериментальной и теоретической физики: Тр. 10-й БМШ ЭТФ.—2010.—Т. 2.—С. 74—81.
2. *Абунин А. А.* Характеристики форбуш-эффектов и их связь с солнечными, межпланетными и геомагнитными возмущениями: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: ИЗМИРАН, 2014.—155 с.—Машинопись.
3. *Бейтман Г. Эрдейи А.* Высшие трансцендентные функции. — М.: Наука, 1965.—294 с.
4. *Белов А. В., Ерошенко Е. А., Оленева В. А., Струминский А. Б., Янке В. Г.* Чем обусловлены и с чем связаны форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ.—2001.—**65**, № 3.—С. 373—376.
5. *Долгинов А. З., Топтыгин И. Н.* Многократное рассеяние частиц в магнитном поле со случайными неоднородностями // ЖЭТФ.—1966.—**51**, вып. 6.— С. 1771—1783.
6. *Долгинов А. З., Топтыгин И. Н.* О диффузии космических лучей в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрномия.—1967.—**7**, № 6.—С. 967—973.
7. *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей. — М.: Гостехтеориздат, 1957.—492 с.
8. *Дорман Л. И.* Вариации космических лучей и исследование космоса. — М.: Изд-во АН СССР, 1963.—1027 с.
9. *Дорман Л. И., Кац М. Е., Шахов Б. А.* О связи между различными формами уравнения диффузии космических лучей // Геомагнетизм и аэрномия.—1976.—**16**, № 5.—С. 919—920.
10. *Ермолаев Ю. И., Николаева Н. С., Лодкина И. Г.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976—2000 гг. // Космич. исслед.—2009.—**47**, № 2.—С. 99—113.
11. *Житник И. А., Жигалкин Р. К., Игнатьев А. П. и др.* // Исследование солнечных образований на основе комплексных наблюдений с Земли и на спутнике КОРОНАС-Ф. IV. Корональные дыры, открытые магнитные трубки и их связь с высокоскоростными потоками солнечного ветра // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—2005.—**101**.— С. 128—145.
12. *Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Кривошапкин П. А. и др.* Космические лучи и солнечный ветер. — Новосибирск: Наука, 1981. — 224с.
13. *Крымский Г. Ф., Кузьмин А. И., Чирков Н. Р. и др.* Распределение космических

- лучей и приемные векторы детекторов. I // Геомагнетизм и аэронавигация.—1966.—**6**, № 8.—С. 991—996.
14. *Топтыгин И. Н.* Космические лучи в межпланетных магнитных полях. — М. Наука, 1983.—302 с.
 15. *Федоров Ю. И.* Модуляция интенсивности галактических космических лучей в турбулентной гелиосфере // Кинематика и физика небес. тел.—2015.—**31**, № 3.—С. 3—22.
 16. *Хундхаузен А.* Расширение короны и солнечный ветер. — М.: Мир, 1976.—302 с.
 17. *Altukhov A. M., Krymsky G. F., Kuzmin A. I.* The method of “global survey” for investigating cosmic ray modulation // Acta Phys.—1970.—Suppl. to Vol. 29 (Muons and Neutrinos, Techniques).—P. 457.—(Proceedings of the 11th International Conference on Cosmic Rays, held in Budapest, 25 August — 4 September, 1969 / Ed. A. Somogyi, Vol. 4).
 18. *Badraddin.* Cosmic ray modulation: effects of high-speed solar wind streams // Astrophys. and Space Sci.—1997.—**246**.—P. 171—191.
 19. *Badraddin.* Transient perturbations and their effects in the heliosphere, the geomagnetosphere and the Earth’s atmosphere: space weather perspective // J. Astrophys. and Astron.—2006.—**27**, N 2.—P. 209—217.
 20. *Badraddin, Yadav R. S., Yadav N. R.* Influence of magnetic clouds on cosmic ray intensity variation // Solar Phys.—1986.—**105**.—P. 413—428.
 21. *Belov A. V.* Large-scale modulation: View from the Earth // Space Sci. Revs.—2000.—**93**.—P. 71—96.
 22. *Belov A. V., Eroshenko E. A.* Cosmic ray observations for space weather // Proc. for the 22nd ISTC Japan Workshop on Space Weather Forecast, Nagoya University.—2002.—P. 129—146.
 23. *Belov A. V.* Forbush effects and their connection with solar, interplanetary and geomagnetic phenomena // Proc. IAU Symp.—2009.—**257**.—P. 439—450.
 24. *Belov A. V., Eroshenko E. A., Oleneva V. A., Yanke V. G.* Relation of the Forbush effects to the interplanetary and geomagnetic parameters // Proc. 27-h ICRC.—2001.—**9**.—P. 3552—3355.
 25. *Boezio G. M., Carlson P., Francke T., et al.* The cosmic ray proton and helium spectra between 0.4 GV and 200 GV // Astrophys. J.—1999.—**518**.—P. 457—472.
 26. *Cane H. V.* Cosmic ray decreases and magnetic clouds // J. Geophys. Res.—1993.—**98A**, N 3.—P. 3509—3512.
 27. *Cane H. V., Richardson I. G., von Rosenvinge T. T.* Cosmic ray decreases: 1964—1994 // J. Geophys. Res.—1996.—**101**.—P. 21561—21572.
 28. *Cane H. V.* Coronal mass ejections and Forbush decreases // Space Sci. Rev.—2000.—**93**.—P. 55—77.
 29. *Cane H. V., Richardson I. G., von Rosenvinge T. T.* Cosmic ray decreases and particle acceleration in 1978—1982 and associated solar wind structures // J. Geophys. Res.—1993.—**98**.—P. 13295—13302.
 30. *Dorman L. I., Katz M. E., Fedorov Yu. I., Shakhov B. A.* Variation of cosmic ray energy in interplanetary space // Astrophys. and Space Sci.—1983.—**94**.—P. 43—95.
 31. *Gleeson L. J., Axford W. I.* Solar modulation of galactic cosmic rays // Astrophys. J.—1968.—**154**.—P. 1011—1026.
 32. *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Forbush decreases: origin and development in the interplanetary space // Nuovo cim. C.—1979.—**2**.—P. 1—52.
 33. *Iucci N., Parisi M., Storini M., Villoresi G.* Interplanetary disturbances during Forbush decreases // Nuovo cim. C.—1984.—**7**.—P. 467—488.

34. *Kolesnik Yu. L., Shakhov B. A.* The effect of the heliopause and a standing termination shock on the propagation of galactic cosmic rays in heliosphere stationary model // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2012.—**28**, N 6.—P. 261—269.
35. *Kolesnyk Yu. L., Shakhov B. A.* Galactic cosmic ray distribution in the simplest model of termination shock near the boundary of heliosphere // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2009.—**25**, N 4.—P. 213—219.
36. *Kudela K., Storini M., Hofer M. Y., Belov A. V.* Cosmic rays in relation to space weather // *Space Sci. Revs.*—2000.—**93**.—P. 153.
37. *Lindblad B. A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind // *Solar Phys.*—1981.—**74**.—P. 197—206.
38. *Lindblad B. A., Lundstedt H.* A catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind 1975-78 // *Solar Phys.*—1983.—**88**.—P. 377—382.
39. *Lindblad B. A., Lundstedt H., Larsson B.* A third catalogue of high-speed plasma streams in the solar wind — Data for 1978—1982 // *Solar Phys.*—1989.—**120**.—P. 145—152.
40. *Lockwood J. A.* Forbush decreases in the cosmic radiation // *Space Sci. Revs.*—1971.—**12**.—P. 658—715.—doi:10. 1007/BF00173346.
41. *Mavromichalaki H., Vassilaki A.* Fast plasma streams recorded near the Earth during 1985—1996 // *Solar Phys.*—1998.—**183**.—P. 181—200.
42. *Mavromichalaki H., Vassilaki A., Marmatsouri E.* A catalogue of high-speed solar-wind streams: further evidence of their relationship to Ap-index // *Solar Phys.*—1988.—**115**.—P. 345—365.
43. *Mori S.* Theoretical calculation of the cosmic-ray solar diurnal variation. II-Meson Component // *Nuovo cimento. B.*—1968.—**58**, N 1.—P. 58—70.
44. *Parker E. N.* The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planet. and Space Sci.*—1965.—**13**, N 1.—P. 9.
45. *Parker G. D.* Solar wind disturbances and recurrent modulation of galactic cosmic rays // *J. Geophys. Res.*—1976.—**81**.—P. 3825.
46. *Potgieter M. S.* Solar modulation of cosmic rays // *Liv. Rev. Solar Phys.*—2013.—**10**.—P. 3—66.
47. *Potgieter M. S.* A very local interstellar spectrum for galactic electrons, protons and helium // *Braz. J. Phys.*—2014.—**44**.—P. 581.
48. *Potgieter M. S., Vos E. E., Boezio M., De Simone N., Di Felice V., Formato V.* Modulation of galactic protons in the heliosphere during the unusual solar minimum of 2006 to 2009 // *Solar Phys.*—2013.—**289**, N 1.—P. 391—406.
49. *Ptuskin V. S., Volk H. J., Zirakashvili V. N., Breitschwerdt D.* Transport of relativistic nucleus in a galactic wind driven by cosmic rays // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**321**, N 2.—P. 434—443.
50. *Shakhov B. A., Kolesnik Yu. L.* Heliospheric propagation of galactic cosmic rays depending on the scattering characteristics of the turbulent interplanetary magnetic field // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies.*—2008.—**24**, N 6.—P. 280—292.
51. *Shakhov B. A., Kolesnyk Yu. L.* Effect of the heliopause and the termination shock on the galactic cosmic rays distribution in stationary model of heliosphere // *J. Phys.: Conf. Ser.*—2013.—**409**, N 1.
52. *Simpson J. A.* Cosmic-radiation intensity-time variations and their origin. III. The origin of 27-day variations // *Phys. Rev.*—1954.—**94**.—P. 426—440.
53. *Urch I. H., Gleeson L. J.* Galactic cosmic ray modulation from 1965—1970 // *Astrophys. and Space Sci.*—1972.—N 17.—P. 426—446.

54. *Venkatesan D., Shukla A. K., Agrawal S. P.* Cosmic ray intensity variations and two types of high speed solar streams // *Solar Phys.*—1982.—**81**.—P. 375—381.
55. *Vershell H. J., Mendall R. B., Korff S. A., Roelof E. C.* Two classes of cosmic ray decrease // *Geophys. Res.*—1975.—**80**.—P. 1189—1201.
56. *Webber W. R., Hiegbie P. R., McDonald F. B.* The unfolding of the spectra of low energy galactic cosmic ray H and He nuclei as the Voyager 1 spacecraft exits the region of heliospheric modulation // *arXiv — astro-ph:1308.1895-2013*.
57. *Webber W. R., McDonald F. B.* Recent Voyager 1 data indicate that on 25 August 2012 at a distance of 121.7 AU from the Sun, sudden and unprecedented intensity changes were observed in anomalous and galactic cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.*—2013.—**40**.—P. 1665—1668.
58. *Xystouris G., Sigala E., Mavromichalaki H.* A complete catalogue of high-speed solar wind streams during solar cycle 23 // *Solar Phys.*—2014.—**289**, N 3.—P. 995.
59. *Yadav R. S., Sharma N. K., Badruddin.* Effect of two types of solar wind streams on the intensity variations of cosmic rays // *Solar Phys.*—1994.—**151**.—P. 393.

Статья поступила в редакцию 23.01.16