

О ФОРМИРОВАНИИ ПЯТЕННОГО И МАГНИТНОГО ЦИКЛОВ В ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МИНИМУМАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М. Б. Крайнев, М. С. Калинин

Обсуждаются вопросы определения и разделения вариаций в интенсивности галактических космических лучей, обусловленных пятнообразовательной активностью и полярностью высокоширотных магнитных полей Солнца. На основе решения краевой задачи формулируются некоторые закономерности формирования интенсивности в минимумах солнечного цикла.

Ключевые слова: Солнце, гелиосфера, галактические космические лучи, цикл пятнообразовательной активности, магнитный цикл, минимум солнечного цикла.

Обычно в поведении интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) выделяют 11-летний и 22-летний циклы, однако мы будем называть 11-летний цикл “пятенным”, поскольку он ассоциируется с изменением числа или площади солнечных пятен, а 22-летний – “магнитным” или “полярным”, т.к. он определяется изменением полярности крупномасштабных высокоширотных магнитных полей. Это связано с тем, что интенсивность ГКЛ изменяется как во времени, так и в пространстве и с энергией, а термины “11-летний” и “22-летний” относятся только к временному поведению. Термины же “пятенный” и “магнитный” говорят о причинах вариации по любым переменным, а мы в данной статье как раз и будем обсуждать формирование не временного поведения интенсивности ГКЛ, а пространственного и энергетического распределений интенсивности ГКЛ в фазе минимума пятенного цикла.

Пятенный и магнитный циклы по данным наблюдений. Как показано на рис. 1, в гелиосфере с развитием пятенного цикла изменяются, кроме характеристик активных областей, напряжённость регулярных гелиосферных магнитных полей (ГМП), а также поле скоростей, плотность, температура и некоторые другие параметры солнечного ветра, напряжённость нерегулярных ГМП (не показаны на рис. 1), т.е. все характеристики,

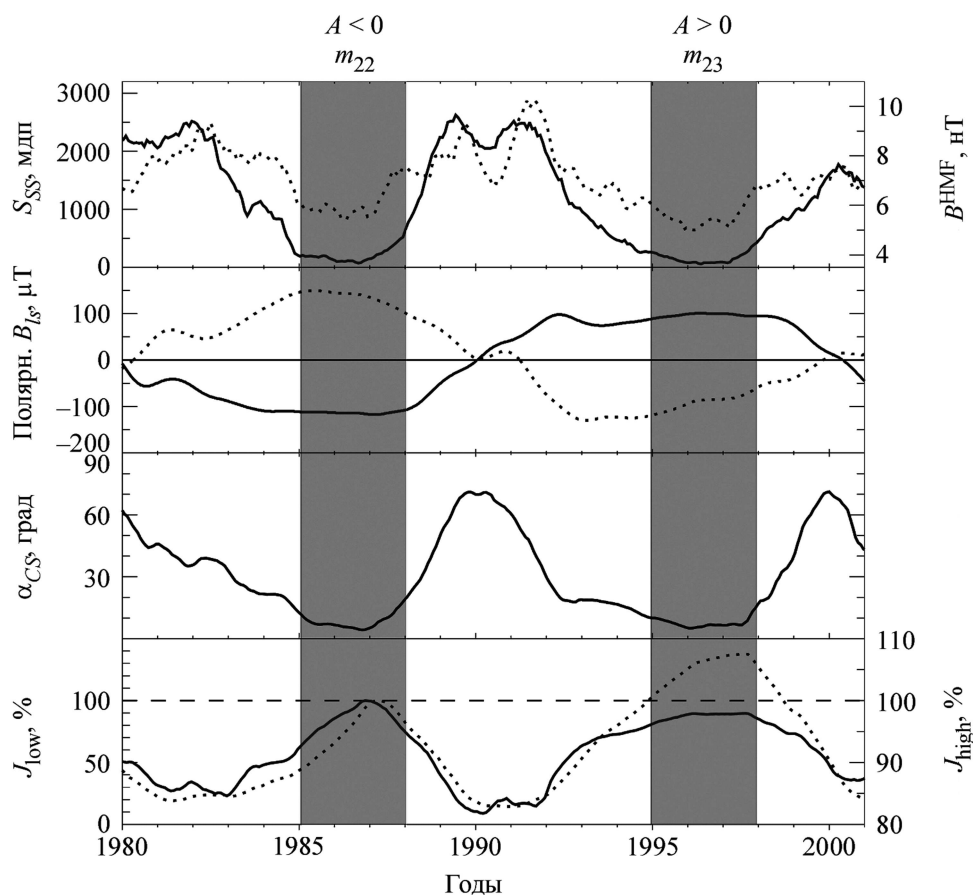


Рис. 1: Пятенный и магнитный циклы на Солнце, в характеристиках гелиосферы и в интенсивности ГКЛ. Вертикальные затемнённые полосы отмечают периоды минимума пятенного цикла, а выше их указано, какой цикл начинается в этот период и какова преимущественная полярность гелиосферного магнитного поля. Верхняя панель: Площадь солнечных пятен (сплошная линия, [10]) и напряжённость магнитного поля около Земли (пунктир, [11]). Вторая панель: Проекция вдоль луча зрения напряжённости магнитного поля Солнца в северной (сплошная кривая) и южной (пунктир) полярных шапках фотосферы Солнца [12]. Третья панель: Полуширина широтной зоны секторной структуры гелиосферных магнитных полей [12]. Нижняя панель: Интенсивность ГКЛ, нормированная на 100% в 1987 г., для частиц низких энергий ($T \approx 200$ МэВ по данным космического аппарата IMP-8, пунктир [5]) и высоких энергий ($T \approx 10$ ГэВ, станция Москва сети нейтронных мониторов, сплошная линия).

определяющие энергетику солнечного ветра. Поэтому пятенный цикл можно было бы также назвать “энергетическим”. Кроме того, с пятенным циклом меняется полуши-

рина зоны секторной структуры регулярных магнитных полей (т. н. “тилт”). Заметна пятенная вариация и в интенсивности ГКЛ в гелиосфере, по крайней мере, в первом приближении интенсивность изменяется в противофазе с пятнообразовательным циклом на Солнце и в гелиосферных характеристиках. С магнитным циклом изменяется, кроме преимущественной полярности ГМП ($A = \text{sign}(B_r^{\text{reg},N})$, где $B_r^{\text{reg},N}$ – радиальная компонента регулярного магнитного поля в северном полушарии), насколько мы знаем, лишь интенсивность ГКЛ как в глубине, так и в средней и дальней низкоширотной гелиосфере. Магнитный цикл в интенсивности ГКЛ в районе орбиты Земли выражается в разной форме временных профилей интенсивности (платообразной при $A > 0$ и остроугольной при $A < 0$) и в чередовании повышенной и пониженной интенсивности в последовательных минимумах солнечной активности, а в средней и дальней гелиосфере – в существенно разных градиентах интенсивности в последовательных минимумах. По данным наблюдений можно дать первое из двух определений пятенного и магнитного циклов в интенсивности ГКЛ, предполагающее, что пятенный цикл как более энергоёмкая вариация в характеристиках гелиосферы вызывает и более сильную вариацию в интенсивности ГКЛ, а изменение преимущественной полярности магнитных полей – небольшую вариацию магнитного цикла в интенсивности. Тогда, совместив моменты минимума площади пятен последовательных циклов, можно определить пятенную вариацию как среднюю между наблюдаемыми интенсивностями при положительной и отрицательной полярностях ГМП $J_{ss}^{\text{obs}} = (J_+ + J_-)/2$, а магнитную вариацию – как половину вариации между двумя наблюдаемыми интенсивностями $J_m^{\text{obs}} = (J_+ - J_-)/2$. Относительный вклад магнитного цикла можно тогда оценить как $\delta_m^{\text{obs}} = J_m/J_{ss} \cdot 100\%$. Тогда получается, что по измерениям в районе орбиты Земли относительный вклад магнитного цикла в интенсивность ГКЛ составляет от 3 до 30% от пятенного, причём амплитуда и фаза зависят от знака заряда и энергии частицы (для протонов магнитный цикл меняет знак при жёсткости “crossover” $R_{co}^{\text{obs}} \approx 7$ ГВ), а на больших расстояниях $\delta_m^{\text{obs}} = 30 - 50\%$ [8, 9].

Очевидны недостатки такого определения пятенного и магнитного циклов в интенсивности ГКЛ: 1) невозможно указать, каким был данный пятенный цикл (для определения надо привлечь данные ещё и предыдущего или следующего циклов, которые могут быть и аномальными (как, например, минимум СЦ 24, см. [1]); 2) наблюдениями интенсивности космических лучей охвачена лишь очень малая часть гелиосферы и не весь энергетический диапазон; и самое главное – 3) такое определение пятенного цикла в интенсивности основывается на сильном предположении, и совсем не обяза-

тельно сильная вариация интенсивности ГКЛ вызывается именно пятенным циклом в гелиосферных параметрах, а прямая оценка вклада последнего ненаблюдаема, так как в природе невозможно отключить полярность ГМП. Однако при теоретическом расчёте интенсивности можно отключить преимущественную полярность ГМП и рассчитать интенсивность во всех точках гелиосферы и при всех энергиях. Надо лишь иметь надёжную теорию.

Теоретическое описание интенсивности ГКЛ. На настоящий момент основные данные наблюдений интенсивности ГКЛ описываются известной дифференциальной краевой задачей, сформулированной, в основном, Паркером, Крымским, Джокиши [6, 4, 2]:

$$-\frac{\partial U}{\partial t} = \underbrace{-\nabla(K\nabla U)}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\vec{V}^{sw}\nabla U - \frac{\nabla\vec{V}^{sw}}{3}p\frac{\partial U}{\partial p}}_{\text{convection+adiab.loss}} + \underbrace{\vec{V}^{dr}\nabla U}_{\text{drift}} = 0, \quad (1)$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial r}\right|_{r=r_{\min}} = 0, \quad U|_{r=r_{\max}} = U_{um}(p), \quad \left.\frac{\partial U}{\partial \vartheta}\right|_{\vartheta=0,\pi} = 0, \quad (2)$$

$$U|_{p=p_{\max}} = U_{um}(p_{\max}). \quad (3)$$

Краевая задача для функции распределения ГКЛ $U(\vec{r}, p, t) = J(\vec{r}, T, t)/p^2$ (где p и T — импульс и кинетическая энергия частиц, соответственно) состоит из транспортного уравнения (1), граничных условий (2) и “начального” условия (3) — отсутствия модуляции при достаточно больших энергиях (порядка $p_{\max}c \approx 100$ ГэВ). Здесь U_{um} — интенсивность ГКЛ в отсутствие Солнца, r_{\min} и r_{\max} — внутренний и внешний размер области модуляции. Для стационарного случая транспортное уравнение предполагает баланс дивергенций пространственных (диффузионных, конвективных и дрейфовых) потоков и дивергенции потока по импульсам в пространстве импульсов — из-за адиабатического уменьшения энергии в расширяющемся солнечном ветре.

Коэффициенты транспортного уравнения — модели поля скорости солнечного ветра \vec{V}^{sw} , регулярного магнитного поля \vec{B}^{reg} и поля скорости дрейфа заряженных частиц в неоднородном магнитном поле \vec{V}^{dr} , также их диффузии при рассеяниях на неоднородностях магнитного поля (с тензором диффузии K , содержащим коэффициенты диффузии K_{\parallel} вдоль регулярного поля и $K_{\perp r}$, $K_{\perp \vartheta}$ — поперёк поля в радиальном и широтном направлениях, соответственно). Из них от полярности регулярного магнитного поля A зависят лишь \vec{V}^{dr} и K_{\parallel} (из-за спиральности регулярных и нерегулярных магнитных

полей (см. обсуждение этого и многих других вопросов поведения коэффициентов уравнения (1) в [7]). Таким образом, кроме краевой задачи, описывающей реальную картину в определённой фазе солнечного цикла (т. е. с соответствующими этой фазе интенсивностью ГКЛ $J_{+/-}(\vec{r}, T, t)$, и характеристиками солнечного ветра, магнитных полей с определённой преимущественной полярностью, дрейфа, диффузии, зависящих от этой полярности), можно дополнительно решить задачу с теми же характеристиками, но без преимущественной полярности магнитных полей (т. е. при $A = 0$). Согласно предлагаемому нами новому определению, решение этой задачи $J_0(\vec{r}, T, t)$ и будет представлять для данной фазы цикла интенсивность “пятенного” цикла J_{ss}^{calc} , в реальности ненаблюдаемую. Тогда под интенсивностью магнитного цикла можно понимать разность между решением краевой задачи, описывающей реальную картину $J_{+/-}(\vec{r}, T, t)$, и интенсивностью пятенного цикла $J_m^{calc} = J_{+/-}(\vec{r}, T, t) - J_{ss}^{calc}$, и соответствующую относительную интенсивность $\delta_m^{calc} = J_m^{calc} / J_{ss}^{calc} \cdot 100\%$.

Итак, если нас интересует формирование обеих составляющих интенсивности ГКЛ, пятенной и магнитной, для фазы минимума солнечного цикла, надо сначала решить две краевые задачи (1–3) с $A = +1, -1$: подобрав соответствующие параметры, описать наблюдаемое поведение интенсивности в последовательных минимумах СЦ; решить ещё задачу с подобранными коэффициентами и с $A = 0$, а затем по решениям всех трёх задач сформировать пятенную и магнитную составляющие интенсивности и исследовать, как их распределение во всей гелиосфере изменяется с энергией. На трёх панелях рис. 2 показаны широтный, радиальный и энергетический профили как расчётной, так и наблюдаемой интенсивности для минимумов с $A > 0$ (СЦ 23, 1997 г.) и с $A < 0$ (СЦ 22, 1987 г.). Видно, что результаты расчёта соответствуют основным наблюдаемым закономерностям в распределении ГКЛ (значительно больший радиальный градиент в средней гелиосфере и меньший широтный градиент во внутренней при $A = -1$, чем при $A = +1$; систематическое превышение при низких энергиях интенсивности при $A = +1$ над интенсивностью при $A = -1$ и противоположная ситуация при высоких энергиях $R_{co}^{calc} \approx 6$ ГВ), хотя в деталях расхождение с наблюдениями есть. Это описание достигается при следующих основных параметрах моделей: $K_{\perp r} = 0.004K_{\parallel}$, $K_{\perp \theta} = 0.15K_{\parallel}$, а $K_{\parallel} = 4$ при $A > 0$ и $K_{\parallel} = 20$ при $A < 0$ (в единицах 10^{21} см²/сек). Остальные параметры близки к использованным нами в [3]. Отметим, что пока мы не стараемся достигнуть идеального описания данных (т. к. использованная модель слишком упрощённая), но посмотрим, как формируется расчётная интенсивность во всей гелиосфере и при всех энергиях при выбранных параметрах. Мы полагаем, что уточнение набора параметров

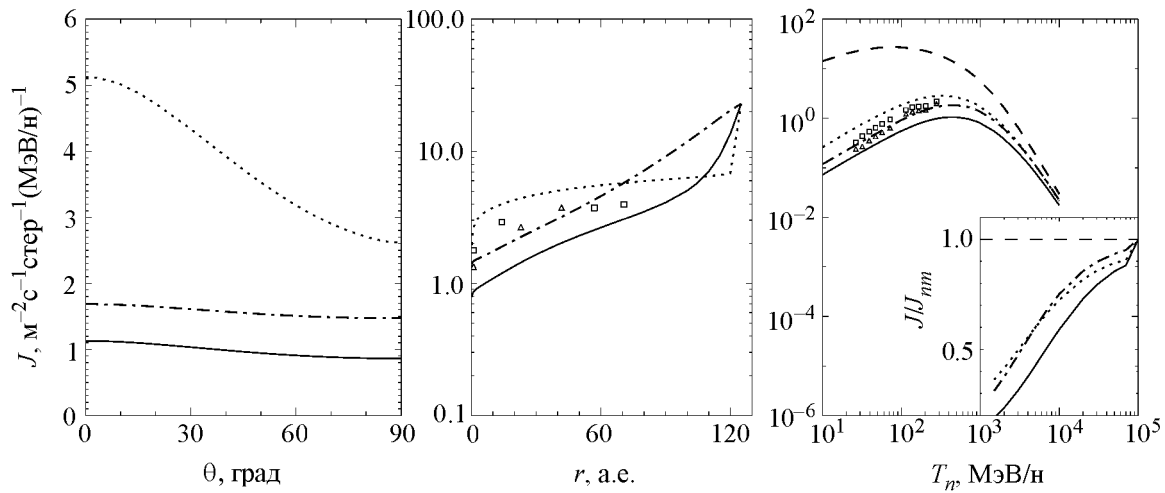


Рис. 2: Наблюдаемые и расчётные распределения интенсивности протонов ГКЛ в минимумах пятенного цикла с $A > 0$ (расчёт — пунктирные линии, квадраты — данные наблюдений [5]), $A < 0$ (расчёт — штрихпунктирные линии, треугольники — данные наблюдений [5]) и $A = 0$ (расчёт — сплошные линии). Левая панель: Зависимость интенсивности от полярного угла при $r = 1$ а.е. и $T = 200$ МэВ. Средняя панель: Зависимость интенсивности от гелиоцентрического расстояния при $\vartheta = 90$ град и $T = 200$ МэВ. Правая панель: Энергетический спектр при $r = 1$ а.е. и $\vartheta = 90$ град. Штриховая линия — немодулированный спектр. Для $T > 1$ ГэВ, чтобы подчеркнуть разницу между расчётной интенсивностью при разных значениях A , на вкладке показано отношение расчётной и немодулированной интенсивностей.

может изменить количественные характеристики, но не качественные закономерности, формулируемые ниже.

Некоторые закономерности формирования пятенной и магнитной составляющих интенсивности ГКЛ в минимумах СЦ. На рис. 3 и 4 показано распределение $\delta_m^{\text{calc}}(r, \vartheta)$ в минимумах с $A > 0$ и $A < 0$, соответственно, для высокой энергии ($T \approx 10$ ГэВ), примерно соответствующей эффективной энергии ГКЛ, регистрируемых нейтронными мониторами, и для низкой энергии ($T \approx 0.1$ ГэВ), соответствующей ГКЛ, регистрируемых на космических аппаратах. При самых высоких энергиях ($T \leq 100$ ГэВ, не показано) интенсивность при $A > 0$ на доли процента ниже, а при $A < 0$ — выше, чем при $A = 0$. Однако уже при энергиях ГКЛ, регистрируемых в нейтронных мониторах, вклад магнитного цикла относительно пятенного в глубине гелиосферы положителен и значителен как при $A < 0$ ($\delta_m^{\text{calc}} \approx 26\%$ около Земли), так и при $A > 0$ ($\delta_m^{\text{calc}} \approx 22\%$). При

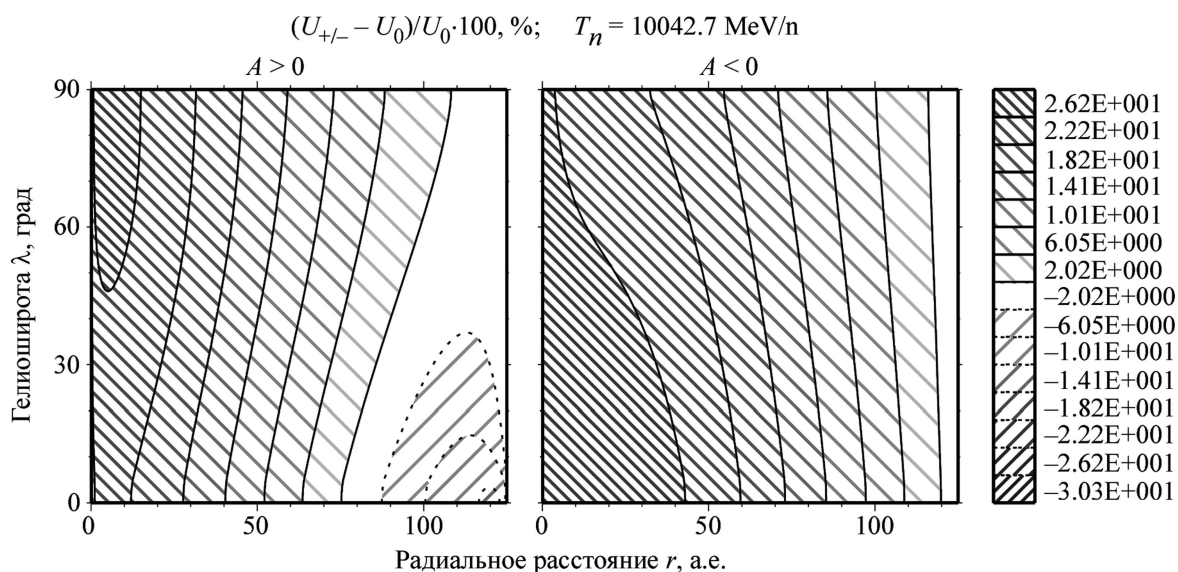


Рис. 3: Распределение в гелиосфере в минимумах пятенного цикла с $A > 0$ (левая квадратная панель) и $A < 0$ (правая квадратная панель) вклада магнитного цикла в интенсивности ГКЛ относительного пятенного для энергии протонов ГКЛ $T \approx 10 \text{ ГэВ}$. Соответствие между типом штриховки и величиной и знаком δ_m^{calc} указано на узкой панели справа.

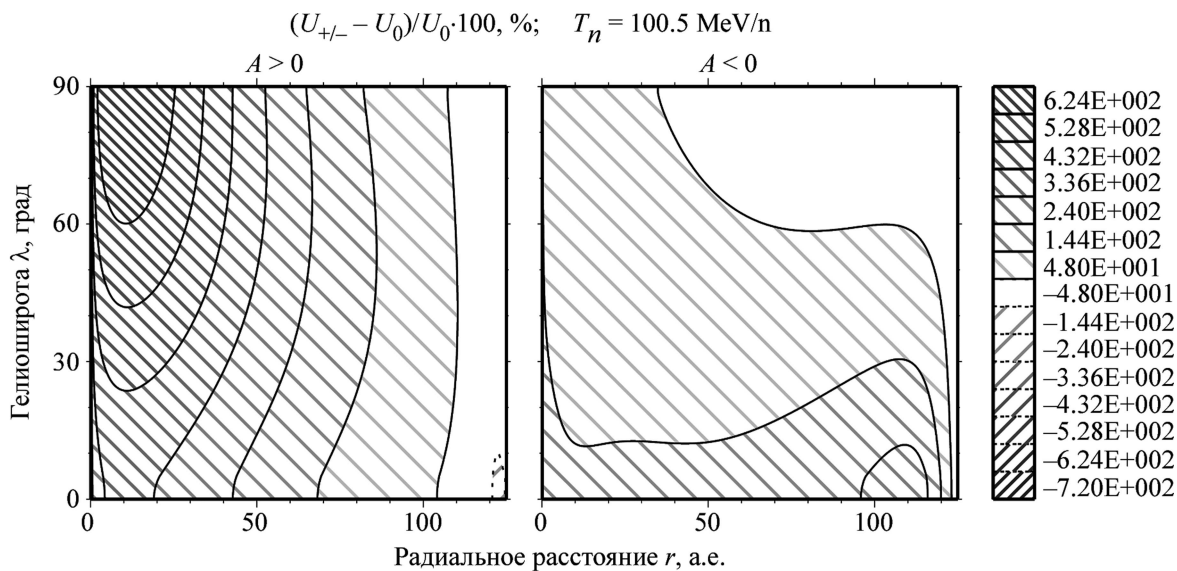


Рис. 4: То же, что на рис. 3, но для $T \approx 0.1 \text{ ГэВ}$.

энергиях же ГКЛ, регистрируемых на космических аппаратах, вклад магнитного цикла положителен и уже превалирует (при $A < 0$ $\delta_m^{\text{calc}} \approx 150\%$, а при $A > 0$ $\delta_m^{\text{calc}} \approx 240\%$).

Эта тенденция сохраняется и при более низких энергиях. Отметим, что на периферии гелиосферы вклад магнитного цикла относительно пятенного значительно меньше, чем в глубине, и при $A > 0$ он остаётся отрицательным до самых низких энергий.

Таким образом, в периоды минимума солнечного цикла при понижении энергии частиц и углублении в гелиосферу вклад магнитной составляющей относительно пятенной быстро становится положительным и существенно возрастает при обоих знаках преимущественной полярности ГМП, так что в районе орбиты Земли для частиц ГКЛ, регистрируемых нейтронными мониторами он составляет $\approx 25\%$, а для частиц, регистрируемых на космических аппаратах, $-100 \div 200\%$ при $T \approx 0.1$ ГэВ и ещё больше при более низких энергиях. Это означает, что сделанное выше предположение (лежащее в основе определения пятенного и магнитного цикла в интенсивности ГКЛ), что пятенный цикл как более энергоёмкая вариация в характеристиках гелиосферы вызывает и более мощную вариацию в интенсивности ГКЛ, противоречит результатам расчётов. Например, в минимуме солнечного цикла для частиц, регистрируемых на космических аппаратах, от половины до двух третей наблюдаемой интенсивности обусловлено вкладом магнитного дрейфа. Значит, и очевидная противофазность интенсивности ГКЛ, и площади солнечных пятен, т. е. рост интенсивности при понижении солнечной активности, в большой степени является результатом дрейфовых, а не диффузионных процессов. Что касается понимания указанного поведения ГКЛ, необходимо учесть, что при формировании пятенного цикла распределение интенсивности и её пространственных градиентов является результатом баланса лишь дивергенции широтного и радиального диффузионных потоков (эффекты конвекции и потерь энергии относительно невелики) для средних и высоких энергий. Включение же магнитного дрейфа существенно изменяет закономерности распределения интенсивности и градиентов, причём эти эффекты различны в разных областях гелиосферы и в глубине гелиосферы накапливаются с уменьшением энергии частиц.

Выводы.

1. Если понимать под магнитным циклом в интенсивности ГКЛ разницу между полной интенсивностью и интенсивностью, формируемой лишь пятенной активностью (принципиально ненаблюдаемой, но которую можно рассчитать), то согласно нашим расчётам магнитный цикл – одна из наиболее сильных долговременных вариаций, а в периоды минимума солнечного цикла для ГКЛ низких энергий в глубине гелиосферы – наиболее мощная.

2. Очевидная противофазность интенсивности ГКЛ и площади солнечных пятен в большой степени является результатом дрейфовых, а не диффузионных процессов.

3. Энергетическое и пространственное распределение магнитной волны в минимумах СЦ довольно сложное и для понимания его закономерностей необходимо исследовать баланс отдельных членов в уравнении модуляции и детальное поведение градиентов интенсивности.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Г. А. Базилевская и др., Изв. РАН, сер. физ. **75**(6), 849 (2011).
- [2] J. R. Jokipii, E. N. Levy, W. V. Hubbard, *Astrophysical Journal* **213**, 861 (1977).
- [3] М. Б. Крайнев, М. С. Калинин, Изв. РАН, сер. физ. **75**(6), 853 (2011).
- [4] Г. Ф. Крымский, *Геомагнетизм и аэрономия* **4**, 977 (1964).
- [5] F. V. McDonald, in *Cosmic Rays in the Heliosphere*, (eds.) L. A. Fisk et al., (Space Science series of ISSI, Kluwer Academic Publishers, Amsterdam, 1998), p. 33.
- [6] E. N. Parker, *Phys. Rev.* **110**, 1445 (1958).
- [7] M. S. Potgieter et al., *Space Sci. Rev.* **97**, 295 (2001).
- [8] Y. I. Stozhkov et al., *Astrophys. Space Sci. Transactions* **7**, 379 (2011).
- [9] У. Р. Веббер, М. Б. Крайнев, Изв. РАН, сер. физ., **67**(10), 1435 (2003).
- [10] <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>
- [11] ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft_data/omni
- [12] <http://wso.stanford.edu>

Поступила в редакцию 29 февраля 2012 г.