

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.122-125

ОСОБЕННОСТИ ВРЕМЕННОГО ХОДА ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МИНИМУМЕ МЕЖДУ 24 И 25 СОЛНЕЧНЫМИ ЦИКЛАМИ

М.С. Калинин, Г.А. Базилевская, М.Б. Крайнев, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский,
Ю.И. Стожков, М.В. Филиппов

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: kalininms@lebedev.ru

Аннотация. В работе проведён анализ данных стратосферных измерений ГКЛ на фазе спада солнечной активности 24-го цикла. Интегральная интенсивность ГКЛ с энергией $T \geq 100$ МэВ сопоставляется с основными солнечными данными, а также с гелиосферными модулирующими факторами – магнитным полем (ГМП), солнечным ветром и углом наклона гелиосферного токового слоя (ГТС). Временной ход интенсивности моделировался с помощью уравнения модуляции ГКЛ, в котором коэффициенты переноса формировались на основе данных по гелиосферным модулирующим факторам, полученным в измерениях около Земли. В области высоких энергий ($T \geq 10$ ГэВ) модельное описание интенсивность ГКЛ сопоставлено с данными мировой сети нейтронных мониторов, в области низких энергий (≈ 200 МэВ) – с данными космического аппарата ACE. Сделан вывод, что основной причиной более медленного роста интенсивности при подходе к минимуму 25-го цикла, по сравнению с ожидаемым, является напряжённость ГМП, более высокая, чем в предыдущем минимуме 24-го цикла.

Введение

В последнее время, в связи с публикацией данных спектрометра ПАМЕЛА, а также данных прибора AMS-02, появились возможность дополнительно использовать их в качестве опорных при анализе наземных и стратосферных измерений КЛ, проводящихся в разных энергетических интервалах и охватывающих к настоящему времени несколько 11 - летних циклов солнечной активности (СА). В области высоких энергий ($T \geq 10$ ГэВ) это данные мировой сети нейтронных мониторов (НМ), в области средних энергий ($T \approx 2-5$ ГэВ) – данные регулярных баллонных измерений в стратосфере (проводятся ФИАН с 1958 г. по настоящее время). С другой стороны, вопросы солнечной модуляции интенсивности ГКЛ остаются актуальными в связи с необходимостью интерпретации данных локальных измерений в гелиосфере и их связью с немодулированным межзвёздным спектром, а также с их прикладными аспектами, а именно, важностью дозы от ГКЛ в долговременных космических полётах и влиянием КЛ на атмосферные процессы.

Предыдущий минимум (2009 г.) отличался в гелиосферных характеристиках от всех предшествующих пониженным значением всех основных гелиосферных характеристик: прежде всего пониженным значением напряжённости среднего ГМП (в 1.5 раза ниже минимума 1996 г.), низким уровнем СА в течение всего солнечного цикла (СЦ), а также пониженной (на $\approx 15\%$) скоростью солнечного ветра (СВ). По этой причине в максимуме СА 24 цикла (2014 г.) интенсивность ГКЛ оставалась наиболее высокой за весь период наблюдений. При неизменности сценария развития 24 цикла на фазе спада активности, в следующем минимуме СА (первая половина 2020 г.) можно было бы ожидать некоторого превышения уровня интенсивности 2009 года как это происходило в предыдущих (положительных по знаку A ГМП) циклах [1,2,3]. Однако по данным стратосферных измерений и данным сети нейтронных мониторов уровень интенсивности остаётся ниже, чем в минимуме 23/24 ($A = -1$). Интенсивность ГКЛ к концу 2019 года не проявляет тенденции к заметному возрастанию. Исключением является область низких энергий. По данным космического аппарата ACE в области $T < 200$ МэВ интенсивность почти достигла уровня предыдущего минимума с $A = -1$ и, возможно, в дальнейшем превысит его.

Такая картина временного хода интенсивности должна найти качественное объяснение в поведении основных модулирующих факторов гелиосферы: скорости СВ, напряжённости ГМП и пространственного распределения поверхности инверсии знака ГМП (токового слоя). Количественное описание поведения интенсивности вблизи минимумов СА может быть получено как решение уравнения модуляции ГКЛ с коэффициентами переноса, определяемыми перечисленными выше модулирующими гелиосферными факторами, временные ряды которых имеются за многие годы.

Анализ данных

Долговременные ряды физических характеристик гелиосферы на орбите Земли даны на сайте (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Из солнечных характеристик, влияющих на распределение интенсивности ГКЛ в гелиосфере нами используется, так называемый, угол наклона поверхности раздела ГМП по знаку,

определяемый по измерениям на фотосфере Солнца (сайт <http://wso.stanford.edu/>). Поскольку при анализе 11 – летних циклов СА мы оперируем усреднёнными за солнечный оборот характеристиками интенсивности (долгопериодические вариации ГКЛ), для анализа использованы 27 – дневные значения указанных выше характеристик гелиосферы.

На рис. 1 показаны все три физические характеристики с 1976 по 2019 год. На верхней панели (а) представлена радиальная компонента ГМП B_r . Начиная с максимума интенсивности ГКЛ 1996 г. ($A = 1$) напряжённость ГМП стала спадать, поэтому величину B_r лучше сравнивать со значениями в предыдущем ($A = -1$) 24 цикле СА за 2003 – 2009 г.г. Сравнение выявляет чуть более быстрое падение величины B_r после 2013 года по сравнению с периодом 2003 – 2009 г.г. Фаза спада СА в предыдущем 23 цикле была сильно затянута по времени. Поэтому в текущем 24 цикле величина B_r к концу 2019 году остаётся на $\approx 10\%$ выше, чем оно было в минимуме предыдущего СЦ. При прочих равных условиях это должно приводить к уменьшению интенсивности по сравнению с предыдущим минимумом 2009 г. Из опыта стратосферных измерений известно, что максимумы интенсивности ГКЛ в циклах с $A = 1$ на несколько процентов выше, чем в циклах с $A = -1$, вследствие специфичности дрейфового механизма модуляции, ответственного за это повышение [4].

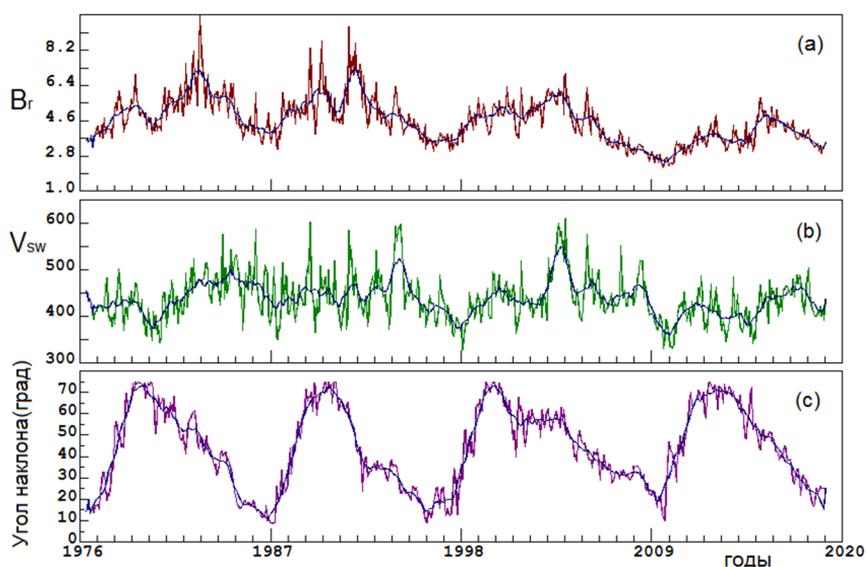


Рисунок 1. Панель (а), светлая линия – 27-дневные значения напряжённости радиальной компонента ГМП (нТ), тёмная кривая – её сглаженные значения. На панелях (b) и (c) аналогично представлены скорость СВ и угол наклона ГМП.

Как видно из рисунка на панели (b), скорость СВ при подходе к солнечному минимуму примерно соответствует её значению в минимуме 1996 года. Уровень интенсивности ГКЛ относительно уровня 1996 года согласуется с этим фактом.

Модельный параметр, основанный на измерениях распределения магнитного поля по знаку на солнечной фотосфере – угол наклона ГТС α показан на панели (c). От величины этого параметра явно зависит скорость дрейфа V_d заряженных частиц в магнитном поле гелиосферы. Из рисунка видно, что после максимума СА начиная с 2014 года величина α линейно падает, и к 2019 году его среднее значение равно $\approx 20^\circ$, т.е. среднему значению в предыдущем минимуме 2009 года. Это значит, что скорость дрейфа по величине при подходе к минимуму 2020 будет несколько ниже, поскольку полная скорость дрейфа $V_d \sim 1/B$.

Другим важным с точки зрения модуляции ГКЛ параметром является величина $\eta = nV^2$, где n – плотность плазмы, V – скорость плазмы СВ. От этой величины зависят размеры гелиосферы как области модуляции: r_{TS} – расстояние до терминальной ударной волны (TS) и r_{HP} – расстояние до гелиопаузы (HP) [5]. Эти величины по-разному зависят от η : $r_{TS}(t) \approx r_{TS}(2004) \sqrt{\eta(t)/\eta(2004)}$, где $r_{TS}(2004) \approx 84$ а.е. – гелиоцентрическое расстояние КА *Вояджер*1 при пересечении TS, а расстояние r_{HP} практически не зависит от η . Величина r_{TS} определяет радиус сферы, внутри которой модуляция эффективна, а за пределами указанной сферической поверхности до HP – менее эффективна, поскольку скорость СВ падает на TS в ≈ 3 раза, её дивергенция мала, а напряжённость ГМП возрастает [6].

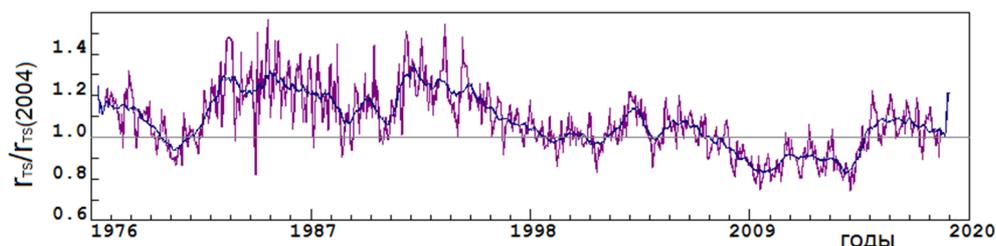


Рисунок 2. Отношение $r_{TS}(t)/r_{TS}(2004)$ – светлая линия. Тёмная линия – сглаженные значения этого отношения.

Из рис. 2 видно, что примерно с 2015 года по 2019 год $r_{TS}(t)$ выросло на $\approx 20\%$ относительно периода 2013-2014 годов (максимума 24 цикла). Если расширение области модуляции будет продолжаться, то это должно привести к понижению интенсивности ГКЛ во внутренней гелиосфере, особенно на орбите Земли. Однако расчёты показывают, что увеличение расстояния r_{TS} на 20% в цикле с $A = 1$, вследствие малости радиальных градиентов в таких циклах, приводит к понижению интенсивности ГКЛ не более, чем на 5% [6].

Таким образом, анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее вероятной причиной пониженного уровня интенсивности к началу 2020 года является более высокая напряжённость ГМП по сравнению с напряжённостью поля в минимуме 2008-2009 годов. Другой, потенциально возможной, причиной может оказаться временная затянутость 24 цикла, аналогичная затянутости предыдущего 23 цикла с $A = -1$. В этом случае начало нового 25 цикла следует отнести к началу 2021 года, и, если напряжённость ГМП к этому времени не потеряет тенденции к падению, то интенсивность ГКЛ в 2021 году превысит аналогичное значение 2009 года.

Уравнение модуляции

Качественный анализ временного поведения интенсивности ГКЛ должен подтверждаться результатами решения краевой задачи для уравнения модуляции Крымского-Паркера [7, 8], в котором коэффициенты переноса определяются на основе рядов измерительных данных по ГМП, СВ и углу наклона ГТС.

Уравнение модуляции ГКЛ имеет вид [9]:

$$\partial n / \partial t - \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla n) + (\mathbf{V} + \mathbf{V}_d) \cdot \nabla n - (\nabla \cdot \mathbf{V} / 3) (\partial n / \partial \ln p) = 0, \quad (1)$$

где $n(r, p, t)$ – дифференциальная плотность числа частиц, связанная с характеристикой ГКЛ – интенсивностью – соотношением $J = p^2 n$, p – импульс частицы, t – время. Коэффициенты переноса в уравнении (1): \mathbf{K} – тензор диффузии; \mathbf{V} – радиальная скорость СВ, \mathbf{V}_d – скорость дрейфа заряженных частиц ГКЛ.

Коэффициенты переноса \mathbf{K} , \mathbf{V}_d и \mathbf{V} в гелиосфере, как области решения уравнения (1), здесь определяются в рамках паркеровской модели гелиосферы. Тензор диффузии \mathbf{K} в расчётах является полностью анизотропным и представляется тремя независимыми компонентами $K_{||}$ – вдоль ГМП и $K_{\perp\theta}$ – в \mathbf{e}_θ – направлении, $K_{\perp r}$ – в направлении $\mathbf{e}_r \sin \chi + \mathbf{e}_\phi \cos \chi$, $\chi = \arccos(B_r / |B|)$. Скорость дрейфа \mathbf{V}_d выражается через дрейфовый коэффициент K_T в виде $\mathbf{V}_d = \nabla \times (f K_T n_B)$, f – функция гелиошироты, $n_B = \mathbf{e}_r \cos \chi - \mathbf{e}_\phi \sin \chi$ – единичный вектор вдоль силовой линии ГМП, $K_T = \text{sign}(qA)(pv/3qB)$, v – скорость частицы, q – заряд частицы, B – величина напряжённости ГМП.

Конкретные аналитические выражения для функций f , \mathbf{V} , $K_{||}$, $K_{\perp\theta}$, $K_{\perp r}$, зависимость компонент тензора \mathbf{K} от жёсткости частиц, а также вид немодулированного спектра на внешней границе гелиосферы описывались в наших работах [3, 10]. Здесь мы отметим лишь, что в основу всех коэффициентов уравнения закладывались среднемесячные значения скорости СВ, напряжённости ГМП на орбите Земли и угол наклона ГТС. Постоянные коэффициенты в компонентах $K_{||}$, $K_{\perp\theta}$, $K_{\perp r}$, в расчётах не менялись от цикла к циклу.

Результаты расчётов

Цель расчёта – описание интегральной интенсивности ГКЛ с энергией $T \geq 100$ МэВ на стратосферной станции Апатиты вблизи минимумов солнечной активности с 1976 года по настоящее время. Экспериментальные данные приводились на границу атмосферы согласно работе [11]. Расчёты проводились с месячной скважностью в шестилетних интервалах вблизи минимумов 21-24 циклов. В области низких энергий $T \approx$ МэВ результаты расчёта сравнивались с измерениями на КА ACE, а в области высоких энергий $T \approx 10$ ГэВ – с данными мировой сети НМ. При обеих энергиях результаты расчётов хорошо согласуются с измерениями (не показаны). Данные по измерениям на ст. Апатиты и результаты расчётов представлены на рис. 3.

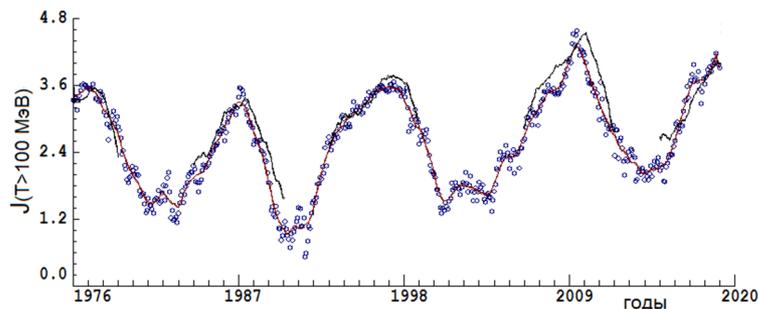


Рисунок 3. Кружки – интегральная интенсивность $T \geq 100$ МэВ по данным измерений на ст. Апатиты. Светлая линия – сглаженные за год измерительные данные. Тёмные сплошные линии – расчёт вблизи минимумов 21-24 циклов СА.

Благодарности. Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (17-02-00584 а, 18-02-00582 а, 19-52-60003 ЮАР-т), а также программы Президиума РАН «Фундаментальные свойства материи и астрофизика», подпрограмма «Физика космических лучей».

Литература

1. Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Makhmutov V.S. et al. Change in the rigidity dependence of the galactic cosmic ray modulation in 2008-2009 // *Adv. Space Res.* 49. 784. 2012.
2. Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A. et al. Time dependence of the proton flux measured by PAMELA during the 2006 July – 2009 December solar minimum // *Astroph. J.* 765:91 (8pp). doi:10.1088/0004-637X/765/2/91. 2013.
3. Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B. et al. Modulation of galactic cosmic rays in solar cycles 22–24: Analysis and physical interpretation // *Geomagn. and Aeron.* V. 57. No.5. 549. 2017.
4. Jokipii J.R., Levy E.H., Hubbard W.B. Effects of particle drift on cosmic-ray transport. I. General properties, application to solar modulation // *Astroph. J.* V. 213. № 3. Pt 1. P. 861–868. 1977.
5. Баранов В.Б., Измоленов В.В. Модельные представления о взаимодействии солнечного ветра со сверхзвуковым потоком межзвёздной среды. Предсказание и интерпретация экспериментальных данных // *Механика жидкости и газа.* №5. с. 19-40. 2006.
6. Krainev M.B., Bazilevskaya G.A., Kalinin M.S. et al. Modeling the time and energy behavior of the GCR intensity in the periods of low activity around the last three solar minima // *ArXiv:1411.7526 [astro-ph.SH]*. 2014. (33rd ICRC, Rio de Janeiro, Brazil, 2013, icrc2013-0305).
7. Krymsky G.F. Diffusion mechanism of diurnal variation of galactic cosmic rays // *Geomagn. and Aeron.*, v. 4. pp. 763–769. 1964.
8. Parker E.N. The passage of energetic charged particles through interplanetary space // *Planet. Space Sci.* 13. 9. 1965.
9. Potgieter M.S., Vos E.E., Boezio M. et al. Modulation of galactic protons in the heliosphere during the unusual solar minimum of 2006 to 2009 // *Solar Phys.* V. 289. №1. P. 391–406. doi:10.1007/s11207-013-0324-6. 2014.
10. Калинин М.С., Базилевская Г.А., Крайнев М.Б. и др. Солнечная модуляция интенсивности галактических электронов и протонов вблизи минимума активности 2009 года // *Изв. РАН, сер. Физ.* т. 83. № 5. с. 610–613. 2019.
11. Стожков Ю.И., Свирижевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы // *Препринт ФИАН.* № 14. М.: Физический. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН. 77с. 2007.