

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

М.Б. Крайнев

HELIOSPHERIC LONG-TERM VARIATIONS OF GALACTIC COSMIC RAY INTENSITY

M.B. Krainev

Обсуждаются наблюдаемые проявления и степень понимания долговременных вариаций интенсивности галактических космических лучей в гелиосфере, обусловленных цикличностью как среднеширотной солнечной активности (пятенная компонента интенсивности), так и напряженности и полярности высокоширотных магнитных полей Солнца (магнитная компонента). Особое внимание уделяется соотношению указанных компонент.

We discuss manifestations and degree of understanding heliospheric long-term variations of galactic cosmic ray intensity in the heliosphere due both to the middle-latitude (sunspot) solar activity (the sunspot component of the intensity) and the strength and polarity of high-latitude magnetic field of the Sun (the magnetic component of the intensity). Particular emphasis is given to the ratio of these components.

Введение

По топологии крупномасштабных магнитных полей в развитии солнечной активности выделяются тороидальная (или пятнообразовательная) и полоидальная (иногда называемая высокоширотной) ветви. Под долговременными вариациями интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) в данной статье понимаются вариации с характерными временами больше года, обусловленные этими ветвями активности Солнца и наблюдаемые в гелиосфере примерно в течение последних шестидесяти лет. Исторически сложилось, что вариацию интенсивности ГКЛ, связанную с пятнообразовательным циклом на Солнце, называют 11-летней вариацией, а обусловленную высокоширотной ветвью активности – 22-летней вариацией, или магнитным циклом в интенсивности ГКЛ. Поскольку нас интересует не только временное, но и пространственное и энергетическое поведение интенсивности ГКЛ, будем называть эти вариации соответственно пятненным и магнитным циклами в интенсивности и говорить о пятенной и магнитной компонентах полной интенсивности ГКЛ. Сначала будут кратко рассмотрены принципы образования и основные характеристики гелиосферы, затем основные наблюдаемые закономерности поведения интенсивности ГКЛ и методы и результаты его теоретического описания, причем особое внимание уделим соотношению пятенной и магнитной компонент интенсивности. Существуют монографии по обсуждаемым в статье вопросам (например, [Дорман, 1975; Крымский и др., 1981; Топтыгин, 1983]), однако для правильной расстановки акцентов можно рекомендовать труды международных конференций по физике солнечного ветра и космических лучей. Общие вопросы солнечной и гелиосферной физики достаточно подробно рассмотрены в работе [Зеленый, 2008], поэтому ссылки приводятся на источники данных и лишь небольшое количество работ.

Гелиосфера

На фотосфере Солнца ($r=r_{\text{ph}}$) выделяются пятна, тороидальные образования с сильным, но мелко-масштабным (по сравнению с радиусом Солнца) магнитным полем и слабые, но крупномасштабные

фоновые полоидальные магнитные поля квазидипольного характера. По уровню активности эти ветви развиваются примерно с 11-летним периодом в противофазе друг с другом, а полярность (направление полей) меняется на противоположную в минимумах активности соответствующих ветвей, т. е. с 22-летним периодом. Под солнечным циклом (СЦ) с соответствующим номером обычно понимается пятенный цикл. На фотосфере плотность энергии магнитных полей и плазмы сравнимы, но из-за быстрого спада плотности плазмы с удалением от фотосферы магнитные поля (причем преимущественно крупномасштабные) начинают преобладать. С другой стороны, с удалением от фотосферы образуется и быстро набирает скорость солнечный ветер (СВ). На расстояниях нескольких солнечных радиусов СВ становится радиальным и сверхальфвеновским, так что, начиная с некоторой поверхности источника ($r=r_{\text{ss}}$), магнитные поля в основном распределяются кинематически, т. е. подчиняясь солнечному ветру.

Сверхзвуковой солнечный ветер выдувает окружающую Солнце межзвездную среду, однако из-за уменьшения плотности с удалением от Солнца его давление на некоторых расстояниях приближается к давлению плазмы и магнитных полей Галактики. Ветер сначала становится дозвуковым (на терминальной ударной волне), а затем отделяется от межзвездной среды гелиопаузой и уносится в хвост. Область между поверхностью источника и гелиопаузой называется гелиосферой. Схема геометрии линий тока солнечного и межзвездного ветров и основных поверхностей гелиосферы показана на рис. 1.

Теперь кратко остановимся на количественных характеристиках гелиосферы, важных для интенсивности ГКЛ. Процессы в подложке – шаровом слое $r_{\text{ph}} < r < r_{\text{ss}}$ – очень существенны для формирования распределений как скорости солнечного ветра, так и гелиосферного магнитного поля (ГМП). Поэтому в солнечной обсерватории им. Вилкокса (WSO, США) уже около 40 лет проводится регулярное сканирование магнитного поля фотосферы и в очень простой WSO-модели [Hoeksema, 1984] определяется полярность радиального магнитного поля на поверхности

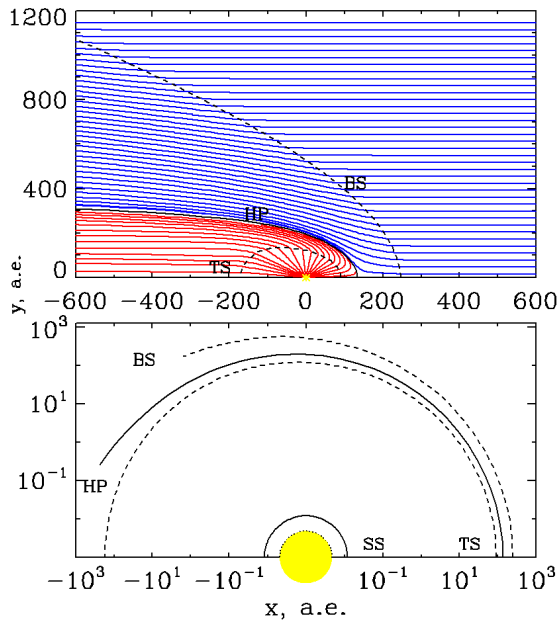


Рис. 1. Структура гелиосферы согласно модели Баранова–Маламы [Baranov, Malama, 1993]. Вверху – линии тока солнечного (красные) и межзвездного (синие) ветров с поверхностями терминальной ударной волны (TS), гелиопаузы (HP) и головной ударной волны (BS). Внизу – изображенные на верхней панели поверхности, а также фотосфера (внутренняя штриховая полуокружность) и поверхность источника (SS) – внутренняя сплошная полуокружность в логарифмическом масштабе по гелиоцентрическим расстояниям.

источника. В гелиосфере, нейтральные линии $B_r=0$ на $r=r_{ss}$ преобразуются кинематически в гелиосферные токовые слои (ГТС). Распределение полярности ГМП бывает трех типов. Большую часть ($\approx 80\%$) времени (фазы низкой и средней пятенной активности Солнца) это дипольный тип, при котором гелиосфера оказывается разделенной на два униполярных «полушария» единственным глобальным (т. е. соединяющим все гелиодолготы) изогнутым ГТС (ГТТС). При этом преимущественную полярность ГМП можно характеризовать величиной A , знак которой соответствует знаку радиальной компоненты ГМП B_r в северном «полушарии» гелиосферы, а изогнутость ГТТС – тилтом α_{qt} (половиной широтного диапазона, занимаемого ГТТС). Примерно 10% времени в период повышенной пятенной активности наряду с ГТТС присутствуют другие ГТС, а еще $\approx 10\%$ времени в эпоху максимума пятенного цикла и инверсии полоидального поля Солнца ГТТС отсутствует. Пользуясь моделью WSO, легко определить квазитилт α_{qt} – половину широтного диапазона, занимаемого всеми ГТС, значения которого публикуются [<http://wso.stanford.edu/>] и который широко используется в исследовании модуляции интенсивности ГКЛ.

Основной массив информации по ГМП и СВ составляют результаты измерений на орбите Земли [<ftp://omniweb.gsfc.nasa.gov/>]. Вертикальными полосами на рис. 2 (а также рис. 3–4) показаны фазы максимумов с номером СЦ над ними. Над верхней панелью указана также полярность ГМП. На верх-

ней панели *a* показан временной ход пятенной активности Солнца [<http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>], а на остальных – временные профили α_{qt} (классический вариант модели WSO) и характеристик ГМП и СВ около Земли. Видно, что в течение последовательных солнечных циклов квазитилт α_{qt} , радиальная компонента B_r и величина ГМП, а также плотность энергии неоднородностей ϵ_{By} , нормальной к среднему полю компоненты ГМП, изменяются в фазе с пятенной активностью Солнца. Кроме того, заметна разница между поведением характеристик в СЦ 21 и 22 (1976–1996 гг.), характерных для второй половины 20-го века, и в СЦ 23 и 24 (1996 – настоящее время). Видно, что при постепенном снижении как пятенной, так и высокоширотной активности Солнца постепенно уменьшалась и гелиосферная активность. Это уменьшение достигло рекордных значений в минимуме 23/24 между СЦ 23 и 24 (в B_r , V_{sw} , $N_{sw}V_{sw}^2$). С начала СЦ 23 возрос индекс спектра магнитных неоднородностей α_{By} , т. е. спектр стал более ламинарным. Сплошной горизонтальной прямой у оси времени на рис. 2–4 отмечен нормальный для второй половины 20-го века период, а штриховой – аномальный.

Однако орбита Земли – специфическое место в гелиосфере (совсем близко к Солнцу и около экватора). Поэтому очень важны для понимания структуры и изменения во времени гелиосферы измерения на космических аппаратах (КА) Pioneer-10, 11 (1972–1996 гг., [McDonald, 1998]), Voyager-1, 2 (с 1977 г. по настоящее время, [Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.]) и Ulysses (1990–

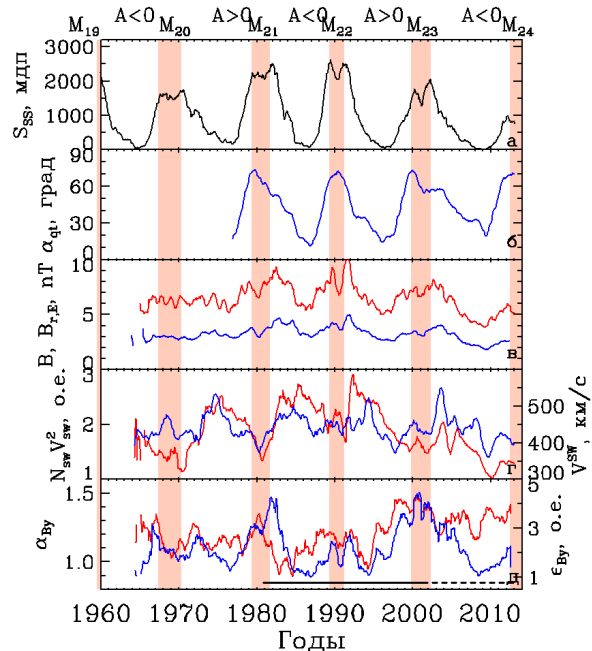


Рис. 2. Временные профили сглаженных с периодом 1 год площади солнечных пятен (*a*) и гелиосферных характеристик на орбите Земли в 1960–2013 гг.; квазитилт (*b*); величина (красная линия) и модуль радиальной компоненты (синяя) ГМП (*c*); динамическое давление (красная) и скорость (синяя) СВ (*d*); индекс спектра неоднородностей (красная) и плотность энергии неоднородностей (синяя) ГМП (*e*).

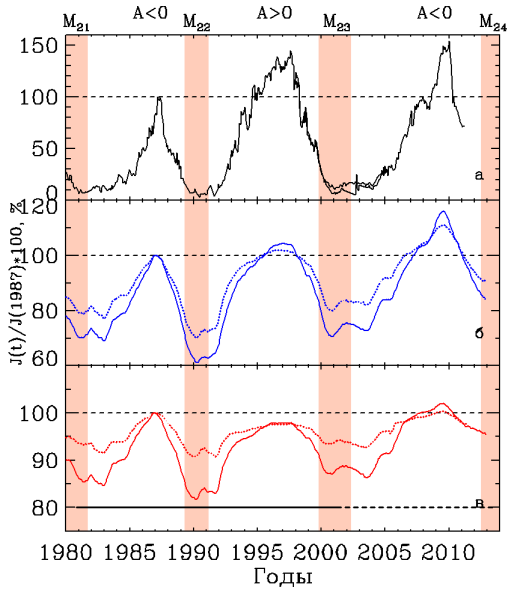


Рис. 3. Временные профили интенсивности ГКЛ разных энергий, нормированной к 1987 г., около Земли в 1980–2013 гг.: интенсивность ядер гелия ($T_n \approx 30\text{--}50$ МэВ/н) по данным КА IMP-8 [McDonald, 1998] и ACE [http://www.srl.caltech.edu/ACE/] (а); скорость счета детектора РБМ в максимуме Пфотцера над Мурманском (сплошная; $R_{\text{eff}} \approx 5$ ГэВ) и Москвой (пунктирная; $R_{\text{eff}} \approx 7$ ГэВ) (б); скорость счета нейтронного монитора Москва (сплошная; $R_{\text{eff}} \approx 15$ ГэВ) и Тцумеб (пунктирная; $R_{\text{eff}} \approx 5$ ГэВ) (в).

2009 г., [http://www.rssd.esa.int/index.php?project=ULYSSES]). Главные для понимания поведения интенсивности ГКЛ результаты этих измерений: наличие терминальной ударной волны на расстояниях 84–94 а. е. (и, возможно, гелиопаузы на 122 а. е. [Webber, McDonald, 2013]) в лобовой части гелиосферы; общее подтверждение паркеровской модели регулярного ГМП

$$B_p(\vec{r}) = B_0(r_0/r)^2(\vec{e}_r - r \sin \theta / V_{\text{sw}} \vec{e}_\phi),$$

постоянное присутствие взаимодействующих разноскоростных потоков СВ в широтной зоне ГТС и лишь высокоскоростного СВ вне этой зоны; независимость радиальной компоненты ГМП от гелиошироты; слияние локальных корональных выбросов массы в глобальные на больших расстояниях.

Тем не менее подчеркну, что в общем гелиосфера как изменяющийся во времени пространственный объект изучена пока недостаточно, особенно на средних и дальних расстояниях от Солнца, которые наиболее интересны для исследования в ней интенсивности ГКЛ. Конечно, это обусловлено прежде всего размерами гелиосферы – чтобы долететь до ее ближайшей наружной границы КА Voyager-1 потребовалось 35 лет!

Наблюдаемое поведение интенсивности ГКЛ

По методу измерения интенсивности ГКЛ весь диапазон энергии T_n частиц, подвергаемых солнечной модуляции ($T_n \leq 50\text{--}100$ ГэВ/н), можно разделить на три поддиапазона. До последнего времени при систематических прямых измерениях дифференциального энергетического спектра на спутниках Земли и КА покрывалась лишь область низких энер-

гий ГКЛ $T_n \leq 0.5$ ГэВ/н. Спутники Земли PAMELA, AMS-2 существенно расширили эту область (до сотен ГэВ/н и выше), однако они работают лишь в последние годы (PAMELA – с 2006 г.). Для высоких энергий ($T_n \geq 10$ ГэВ/н) длинные ряды результатов измерений существуют лишь для нейтронных мониторов ([http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm] с 1953 г.), мюонных телескопов и подземных установок. Для промежуточных энергий (несколько ГэВ) наиболее длинные ряды результатов однородных измерений получены при регулярном баллонном мониторинге ГКЛ (РБМ [Стожков и др., 2007], с 1957 г.). Естественно, двумя последними методами можно получить результаты лишь на орбите Земли.

На рис. 3 показана временная зависимость интенсивности протонов ГКЛ разных энергий, нормированной к 1987 г., на орбите Земли в 1980–2013 гг. Прежде всего видно, что амплитуда долговременных вариаций ГКЛ монотонно возрастает с уменьшением энергии. Во-вторых, заметны разные формы временных профилей интенсивности в периоды с $A > 0$ (более плоская форма) и $A < 0$ (более пикообразная форма). В-третьих, видно, что в «нормальный» период 1980–2000 гг. для ГКЛ низких и средних энергий максимальная интенсивность, достигаемая в периоды $A > 0$, выше, чем при $A < 0$, причем этот эффект усиливается с уменьшением энергии. Для высоких же энергий наблюдается противоположная тенденция – максимальная интенсивность, достигаемая в периоды $A > 0$, ниже, чем при $A < 0$. Таким образом, энергия T_{co} , при которой меняется фаза зависимости амплитуды интенсивности от полярности A , называемая энергией кроссовера, равна 7–10 ГэВ. Две последние наблюдаемые закономерности означают, что в интенсивности ГКЛ, помимо общей противофазности с уровнем тороидальной (или пятенной) ветви активности Солнца, проявляется также зависимость от полярности полоидальной ветви, т. е. магнитный цикл. В необычном минимуме 23/24 указанная энергетическая зависимость фазы магнитного цикла нарушается, и интенсивность ГКЛ в 2009 г. достигает самых высоких значений за все время измерений при всех энергиях, причем с необычно мягким спектром и некоторыми другими особенностями [Svirzhevsky et al., 2009; Bazilevskaya et al., 2012].

Как и для гелиосферных характеристик, для понимания долговременных вариаций интенсивности ГКЛ очень важны измерения в средней и дальней гелиосфере. На рис. 4 показаны временные и радиальные профили интенсивности протонов ГКЛ низкой энергии ($T \approx 00$ МэВ) по данным КА Pioneer-10 [McDonald, 1998] и Voyager-1, 2 [http://voyager.gsfc.nasa.gov/heliopause/heliopause/data.html]. Как и на орбите Земли, заметно изменение интенсивности в противофазе с пятенным циклом на Солнце и изменение формы временного профиля с магнитным циклом. Кроме того, в свободной гелиосфере, т. е. на гелиоцентрических расстояниях $10 < r < 70$ а. е., где слабо влияние на ГКЛ как внутренней, так и внешней границ гелиосферы, для фазы минимума пятенного

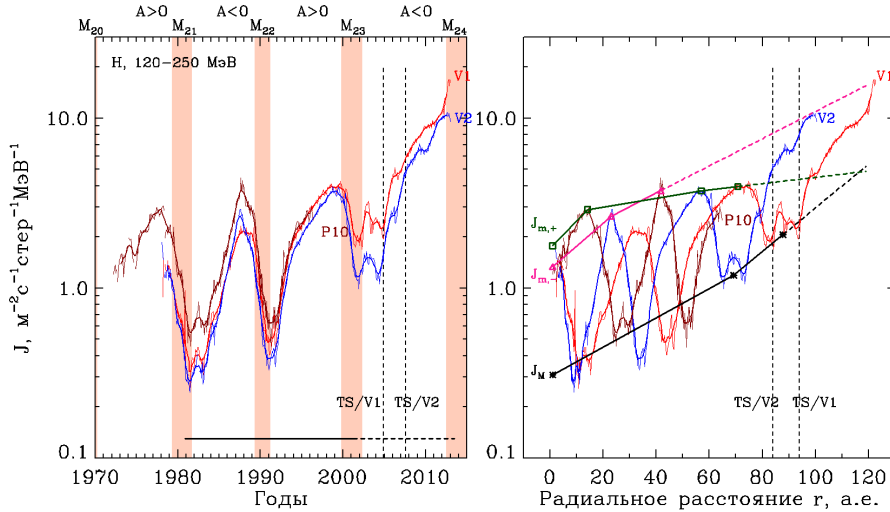


Рис. 4. Временные (левая панель) и радиальные (правая панель) профили интенсивности протонов ГКЛ с энергией $T \approx 200$ МэВ по данным КА Pioneer-10 и Voyager-1, 2. На правой панели показаны также радиальные профили интенсивности в минимумах пятенного цикла с $A > 0$ (зеленые квадраты) и отрезки прямых (полученные экстраполяцией – штриховые линии) и $A < 0$ (розовые треугольники и отрезки прямых) и в максимуме СЦ 23 (черные звездочки и отрезки прямых). Вертикальными штриховыми линиями показаны моменты пересечения и положение терминальной ударной волны по данным Voyager-1, 2.

цикла заметна зависимость радиального градиента интенсивности от полярности ГМП A (еще одно важное проявление магнитного цикла). Основным результатом измерения интенсивности ГКЛ на КА Ulysses является малая величина широтного градиента интенсивности, причем он тоже несколько изменяется с магнитным циклом.

Каков же относительный вклад в интенсивность ГКЛ пятенного и магнитного циклов? Если наблюдаемую интенсивность ГКЛ J^{obs} рассматривать как суперпозицию независимых компонент J_{ss}^{obs} и знакопеременной J_m^{obs} , обусловленных пятенным и магнитным циклами, можно оценить компоненту интенсивности, обусловленную пятенным циклом, как

$$J_{ss}^{obs} = (J_+^{obs} + J_-^{obs}) / 2,$$

а магнитным – как

$$J_m^{obs} = |J_+^{obs} - J_-^{obs}|,$$

где J_+^{obs} и J_-^{obs} – наблюдаемые интенсивности ГКЛ при одном и том же уровне пятенной активности, но в периодах с $A > 0$ и $A < 0$ соответственно. Тогда вклад в интенсивность ГКЛ компоненты магнитного цикла относительно пятенной компоненты $\delta_m^{obs} = J_m^{obs} / J_{ss}^{obs} \cdot 100\%$ составляет на орбите Земли от 3 до 30 % для разных энергий (например, [Stozhkov et al., 2011; Stozhkov et al., 2013]), а в свободной и дальней гелиосфере – 30–50 % [Веббер, Крайнев, 2003]. Другими словами, из данных наблюдений и предположения о независимости вкладов пятенного и магнитного цикла в интенсивность ГКЛ следует, что более мощный пятенный цикл на Солнце в основном и ответственен за амплитуду вариации интенсивности ГКЛ, а магнитный цикл вносит лишь сравнительно небольшие изменения.

Теоретическое описание интенсивности ГКЛ в гелиосфере

В настоящее время интенсивность ГКЛ в гелиосфере $J(\vec{r}, T, t)$ описывается путем решения дифференциальной граничной задачи для функции распределения

$$U(\vec{r}, p, t) = J(\vec{r}, T, t) / p^2,$$

где p , T и t – импульс и кинетическая энергия частиц и время. Эта задача сформулирована в основном в работах [Parker, 1958; Крымский, 1964; Jokipii et al., 1977]. Граничная задача включает транспортное уравнение для U :

$$\begin{aligned} -\partial U / \partial t = -\nabla(K\nabla U) + \vec{V}^{dr} \nabla U + \\ + \vec{V}^{sw} \nabla U - (\nabla \vec{V}^{sw} / 3)p(\partial U / \partial p), \end{aligned} \quad (1)$$

в правой части которого суммируются дивергенции потоков, обусловленных диффузией частиц ГКЛ (первый член), их дрейфом в неоднородном ГМП (второй член), а также их конвекцией и адиабатическим замедлением в расширяющемся солнечном ветре (сумма третьего и четвертого членов). Кроме того, граничная задача включает совокупность граничных (по \vec{r}) и «начальных» (по p) условий:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial r} \Big|_{r=r_{min}}(p, t) = 0, \\ U \Big|_{r=r_{max}}(p, t) = U_{um}(p), \\ U \Big|_{p=p_{max}}(\vec{r}, t) = U_{um}(p_{max}), \end{aligned} \quad (2)$$

где r_{min} и r_{max} – внутренняя и внешняя границы эффективной области модуляции ГКЛ; $p_{max} \approx 100\text{--}200$ ГэВ/с – импульс, выше которого модуляция ГКЛ отсутствует, а

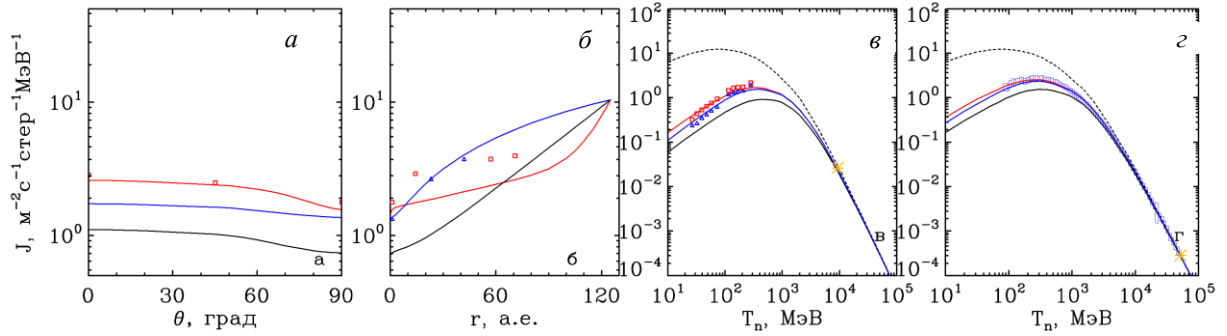


Рис. 5. Пространственное и энергетическое распределение наблюдаемой и расчетной интенсивностей ГКЛ в моменты трех последних минимумов солнечной активности. Панели *a–в* – для минимумов СЦ 21/22 и 22/23: зависимости от полярного угла на $r=1$ а. е. (*a*) и от радиального расстояния на $\theta=90^\circ$ (*б*) интенсивности протонов с $T=200$ МэВ; энергетический спектр на $r=1$ а. е., $\theta=90^\circ$ (*в*). Панель *z* – для минимума СЦ 23/24: энергетический спектр на $r=1$ а. е., $\theta=90^\circ$. Штриховыми кривыми и желтыми звездочками на панелях *в*, *z* показаны предполагаемый немодулированный спектр ГКЛ и точки кроссовера. Красным цветом показаны данные наблюдений (значки) и расчетные кривые для минимумов $A>0$, синим – с $A<0$, а черным – с $A=0$ (см. текст).

$U_{\text{un}}(p)$ – функция распределения немодулированных ГКЛ, т. е. ГКЛ в окружающей гелиосферу области Галактики. В уравнении (1) \vec{V}^{sw} и \vec{V}^{dr} – скорости солнечного ветра и магнитного дрейфа частиц соответственно, а K – их тензор диффузии на неоднородностях ГМП.

Для исследования долговременных вариаций интенсивности ГКЛ в большинстве случаев можно ограничиться решением стационарной краевой задачи ($\partial U/\partial t$). Разработаны методы приближенных решений задачи (1)–(2), в которых либо пренебрегается гелиоширотной зависимостью интенсивности достаточно высокой энергии, либо ищется решение лишь для описания интенсивности ГКЛ высокой энергии в определенной точке гелиосферы (например, с использованием данных нейтронных мониторов [Крымский и др., 2007]). С другой стороны, разрабатывается строгий подход к одновременному описанию эволюции в гелиосфере спектра неоднородностей ГМП и взаимодействующих с ним ГКЛ (подход *ab initio* [Engelbrecht, Burger, 2013]). Если же, как мы в этой работе, интересоваться пониманием в общих чертах поведения интенсивности всех энергий и во всей гелиосфере, приходится решать граничную задачу (1)–(2) численно и пользоваться заведомо упрощенной моделью гелиосферы.

Далее будут описаны результаты расчетов краевой задачи (1)–(2) с простыми моделями коэффициентов уравнения (1), использованными нами в [Kalinin, Krainev, 2013; Kalinin et al., 2013]. Эти модели сохраняют все необычные черты (усиление ГМП по сравнению с паркеровской моделью на высоких широтах и больших расстояниях; зависимость коэффициента параллельной диффузии от полярности ГМП; анизотропия диффузии, перпендикулярной регулярному ГМП), которые в настоящее время считаются необходимыми для описания наблюдаемого поведения интенсивности ГКЛ в гелиосфере (см. обсуждение и ссылки в [Krainev et al., 2013]). Отмечу, что существуют значительно более детализированные

модели для описания наблюдаемого поведения интенсивности ГКЛ (см. обзор [Strauss et al., 2012]).

На рис. 5 показано поведение ([Kalinin et al., 2013]) основных наблюдаемых закономерностей пространственного и энергетического распределения интенсивности ГКЛ в моменты трех последних максимумов этой интенсивности в минимумах 21/22, 22/23 и 23/24. Видно, что при выбранном в работе [Kalinin et al., 2013] наборе постоянных параметров и наблюдаемых гелиосферных характеристиках качественно описываются как наблюдаемое пространственное распределение интенсивности ГКЛ низких энергий в «нормальных» минимумах 21/22 (1987 г.) и 22/23 (1997 г.), так и наблюдаемый энергетический спектр около Земли в трех последних минимумах, включая аномальный минимум 23/24 (2009 г.). Подчеркнем, что при этом основным отличием последнего периода низкой активности (2006–2010 гг.) от двух предыдущих мы считаем, кроме слабого ГМП, значительно меньший эффективный размер области модуляции (90 вместо 125 а. е.) и более слабую жесткостную зависимость коэффициентов диффузии, что соответствует наблюдениям гелиосферных параметров $N_{\text{sw}} V_{\text{sw}}^2$ и $\alpha_B, \epsilon_{\text{By}}$.

Кроме нахождения решения $J_{+/-}(\vec{r}, T, t)$ граничной задачи, отражающей реальную ситуацию в определенной фазе цикла солнечной активности, т. е. при соответствующих этой фазе солнечном ветре и ГМП с полярностью $A>0$ или $A<0$, можно также решить граничную задачу с теми же самыми гелиосферными характеристиками, но при $A=0$, т. е. при отбрасывании в (1) члена, связанного с дрейфом частиц ГКЛ. Как и в [Kalinin, Krainev, 2013; Крайнев, Калинин, 2013], мы полагаем, что последнее решение $J_0(\vec{r}, T, t)$ может рассматриваться для этой фазы как компонент интенсивности $J_{\text{ss}}^{\text{calc}}$, обусловленный пятенным циклом. Поэтому можно рассматривать $J_{\text{m}}^{\text{calc}} = J_{+/-}(\vec{r}, T, t) - J_{\text{ss}}^{\text{calc}}$ как компонент интенсивности ГКЛ, обусловленный солнечным магнитным циклом, с относительным вкладом

$\delta_m^{\text{calc}} = J_m^{\text{calc}} / J_{\text{ss}}^{\text{calc}} \cdot 100\%$. Как следует из рис. 5, расчетная интенсивность ГКЛ при выключенном дрейфе (черные кривые) в 2–3 раза меньше, чем при включенном при обеих полярностях ГМП и практически во всей гелиосфере. В согласии с этим в [Kalinin, Krainev, 2013; Крайнев, Калинин, 2013] показано, что вклад магнитного компонента с уменьшением энергии растет для обеих полярностей во всей гелиосфере, а вблизи Земли для протонов с энергией $T \approx 15$ ГэВ, к которой чувствительны нейтронные мониторы, $\delta_m^{\text{calc}} \approx 25\%$ при $A > 0$ и $\delta_m^{\text{calc}} \approx 20\%$ при $A < 0$, а с энергией $T \approx 200$ МэВ, типичной для измерений на спутниках, $\delta_m^{\text{calc}} \approx 300\%$ для $A > 0$ и $\delta_m^{\text{calc}} \approx 200\%$ для $A < 0$.

Таким образом, результаты расчетов интенсивности ГКЛ в рамках использованных в [Kalinin, Krainev, 2013; Kalinin et al., 2013] моделей противоречат выводу, сделанному в разделе 2 по данным наблюдений интенсивности ГКЛ, что основная часть изменения интенсивности ГКЛ связана с пятненным циклом. Вблизи Земли большая часть вычисленной интенсивности обусловлена магнитным циклом. Это противоречие связано со сделанным в разделе 2 предположением о независимости вкладов пятненного и магнитного цикла в интенсивность ГКЛ. Как видно из транспортного уравнения (1), диффузионный, дрейфовый и конвективный члены связаны одним и тем же градиентом интенсивности, т. е. их действие коррелировано. Детальные расчеты [Krainev et al., 2013] указывают на то, что градиент интенсивности ГКЛ создается в большой степени систематическим и кумулятивным действием дрейфа, а диффузия, хотя и является наиболее мощным процессом, старается нивелировать все градиенты.

Выводы

1. Долговременные вариации интенсивности ГКЛ в гелиосфере – интересный и не очень хорошо изученный объект исследования, тесно связанный с крупномасштабной структурой и изменением во времени гелиосферы, особенно ее областей, удаленных от Солнца. Из-за ее размеров экспериментальное исследование гелиосферы и ГКЛ в ней прямыми методами развивается с характерным временем порядка десятков лет. В этих условиях велика роль теоретических методов и моделирования поведения интенсивности ГКЛ.

2. По данным измерения интенсивности ГКЛ во временном, пространственном и энергетическом распределениях интенсивности ГКЛ проявляются обе ветви активности Солнца: как тороидальная, или пятненная, так и полоидальная, или высокоширотная. Теоретическое описание и моделирование распространения ГКЛ в гелиосфере в основном воспроизводят наблюдаемые закономерности этих распределений, однако модели некоторых гелиосферных и транспортных характеристик, которые при этом используются, довольно необычны.

3. Расчеты интенсивности ГКЛ указывают, что для частиц низкой энергии в средней и внутренней

гелиосфере вклад магнитного цикла (т. е. дрейфа) существенно превосходит вклад пятненного цикла. Это противоречит обычному представлению, что более мощный пятненный цикл в основном и ответственен за вариацию интенсивности ГКЛ, а магнитный цикл вносит лишь сравнительно небольшие изменения. Основная причина большого вклада дрейфа состоит, по-видимому, в том, что он существенно влияет на градиенты интенсивности, от которых зависят почти все механизмы переноса частиц.

Автор благодарит оргкомитет БШФФ-2013 за приглашение и финансовую поддержку. Работа также поддержана грантами РФФИ № 12-02-00215а, 13-02-00585а и Программы «Фундаментальные свойства вещества и астрофизика» Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веббер У.Р., Крайнев М.Б. О радиальной зависимости остаточной, 11-летней и 22-летней вариаций интенсивности галактических космических лучей // Изв. РАН. Сер. физ. 2003. Т. 67, № 10. С. 1435–1438.
- Дорман Л.И. Вариации галактических космических лучей. М.: Изд-во МГУ, 1975. 214 с.
- Плазменная гелиофизика / ред. Л.М. Зеленый. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 670 с.
- Крайнев М.Б., Калинин М.С. О структуре интенсивности галактических космических лучей при ее долговременных вариациях // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77, № 5. С. 574–576.
- Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 1964. Т. 4. С. 977–985.
- Крымский Г.Ф. и др. Космические лучи и солнечный ветер. М.: Наука, 1981. 224 с.
- Крымский Г.Ф., Кривошапкин П.А., Мамрукова В.П., Герасимова С.К. Гелиосферная модуляция интенсивности космических лучей высоких энергий. I. Базовая модель модуляции космических лучей с циклом солнечной активности // ЖЭТФ. 2007. Т. 31. Вып. 2. С. 214–221.
- Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Поток космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007) // Препринт ФИАН № 14. М.: ФИАН, 2007. 77 с.
- Топтыгин И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях. М.: Наука, 1983. 302 с.
- Baranov V., Malama Y. Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium: Numerical solution of self-consistent problem // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. Iss. A9. P. 15157–15163.
- 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. 2012. V. 49. Iss. 4. P. 784–790.
- Engelbrecht N.E., Burger R.A. Cosmic ray modulation: An AB initio approach // Proc. 33th Int. Cosmic Ray Conf, Rio-de-Janeiro, icrc2013-0791.pdf, 2013.
- Hoeksema J.T. Structure and evolution of the large scale solar and heliospheric magnetic fields, PhD Thesis, Stanford University, USA, 1984. 222 p.
- Jokipii J.R., Levy E.H., Hubbard W.B. Effects of particle drift on cosmic-ray transport. I. General properties, application to solar modulation // Astrophys. J. 1977. V. 213. P. 861–868.
- Kalinin M.S., Krainev M.B. the formation of the sunspot and magnetic cycles in the GCR intensity in the heliosphere // J. Phys. Conf. Series. 2013. V. 409. doi:10.1088/1742-6596/409/1/012156.

- Kalinin M.S., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., et al. On the description of the GCR intensity in the last three solar minima // Proc. 33th Int. Cosmic Ray Conf, Rio-de-Janeiro, icrc2013-0297.pdf, 2013.
- Krainev M.B., et al. On the status of the sunspot and magnetic cycles in the galactic cosmic ray intensity // J. Phys. Conf. Series. 2013. V. 409. doi:10/1088/1742-6596/409/1/012016.
- 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 // Proc. 33th Int. Cosmic Ray Conf, Rio-de-Janeiro, icrc2013-0305.pdf, 2013.
- McDonald F.B., Frank B. Cosmic-ray modulation in the heliosphere. A phenomenological study // Space Sci. Rev. 1998. V. 83 P. 33–50.
- Parker E.N. Cosmic-ray modulation by solar wind // Phys. Rev. 1958. V. 110, iss. 6. P. 1445–1449.
- Stozhkov Y. I., Svirzhevsky N. S., Bazilevskaya G. A., et al. Cosmic rays in the stratosphere in 2008–2010 // Astrophys. Space Sci. Trans. 2011. V. 7, N 31. P. 379–382.
- Stozhkov Y.I., et al. // Proc. 33th Int. Cosmic Ray Conf, Rio-de-Janeiro, icrc2013-0094.pdf, 2013.
- Strauss R.D., Potgieter M.S., Ferreira S.E.S. Modeling ground and space based cosmic ray observations // Adv. Space Res. 2012. V. 49. P. 392–407.
- Svirzhevsky N.S., et al. // Proc. 31st Int. Cosmic Ray Conf. Lodz, Poland, 2009.
- 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. V. 40, iss. 9. P. 1665–1668. 2013.
- <http://wso.stanford.edu/>.
- <ftp://omniweb.gsfc.nasa.gov/>.
- <http://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>.
- <http://voyager.gsfc.nasa.gov/heliopause/heliopause/data.html>.
- <http://www.rssd.esa.int/index.php?project=ULYSSES>.
- <http://cr0.izmiran.rssi.ru/common/links.htm>.
- <http://www.srl.caltech.edu/ACE/>.
- <http://icrc2009.uni.lodz.pl/proc/pdf/icrc1105.pdf>.
- <http://voyager.gsfc.nasa.gov/heliopause/heliopause/data.html>.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия