

---

---

## ПЯТЬДЕСЯТ ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ В ПЕРИОДЫ ИНВЕРСИИ ГЕЛИОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

### I. НАБЛЮДАЕМЫЕ ЭФФЕКТЫ

## FIFTY YEARS OF STUDYING THE GCR INTENSITY DURING INVERSION OF HELIOSPHERIC MAGNETIC FIELDS.

### I. OBSERVATIONS

**М.Б. Крайнев**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия, mkrainev46@mail.ru

**Г.А. Базилевская**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия, gbaz@rambler.ru

**М.С. Калинин**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия, kalininms@lebedev.ru

**В.В. Михайлов**

Московский инженерно-физический институт,  
Москва, Россия, vvmikhajlov@gmail.com

**А.К. Свиржевская**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия, svirzhevskayaak@lebedev.ru

**Н.С. Свиржевский**

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Москва, Россия, svirzhevskyns@lebedev.ru

**M.B. Krainev**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Moscow, Russia, mkrainev46@mail.ru

**G.A. Bazilevskaya**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Moscow, Russia, gbaz@rambler.ru

**M.S. Kalinin**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Moscow, Russia, kalininms@lebedev.ru

**V.V. Mikhailov**

Moscow Engineering-Physics Institute,  
Moscow, Russia, vvmikhajlov@gmail.com

**A.K. Svirzhevskaya**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Moscow, Russia, svirzhevskayaak@lebedev.ru

**N.S. Svirzhevsky**

Lebedev Physical Institute RAS,  
Moscow, Russia, svirzhevskyns@lebedev.ru

---

---

**Аннотация.** Впервые эффекты 22-летней цикличности солнечных магнитных полей в интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ) были замечены группой ФИАН в 1973 г. и интерпретированы как проявления инверсии высокоширотного магнитного поля Солнца в свойствах гелиосферных магнитных полей. С тех пор эти эффекты исследуются уже в течение пятидесяти лет.

Для периодов средней и низкой пятенной активности ситуация с гелиосферным магнитным полем (ГМП) понятна: гелиосфера состоит из двух униполярных «полушарий», разделенных волнистым глобальным гелиосферным токовым слоем и характеризующихся общей полярностью  $A$  (единичная величина со знаком радиальной компоненты поля в северном полушарии). Однако нет единого мнения, в чем заключается инверсия ГМП и какие явления в ГКЛ с ней связаны.

В статье кратко формулируются общие представления о 22-летней цикличности в характеристиках Солнца, гелиосферы и ГКЛ и обсуждаются наблюдаемые эффекты в интенсивности ГКЛ, связываемые нами с инверсией ГМП. Модели этого явления, а также результаты расчетов интенсивности ГКЛ, использующих эти модели, будут обсуждаться в следующей статье.

**Ключевые слова:** гелиосфера, гелиосферные магнитные поля (ГМП), инверсия ГМП, галактические космические лучи (ГКЛ), модуляция ГКЛ, долгосрочные вариации интенсивности ГКЛ, 22-летняя

**Abstract.** The effects of the 22-year variation of solar magnetic fields in the galactic cosmic ray (GCR) intensity were first observed and interpreted as manifestations of inversion of the high-latitude solar magnetic field in properties of heliospheric magnetic fields by the Lebedev Physical Institute team in 1973. Since then, these effects have been studied already for 50 years.

The situation with the heliospheric magnetic field is clear for periods of medium and low sunspot activity — the heliosphere consists of two unipolar “hemispheres” separated by a wavy global heliospheric current sheet and characterized by a general polarity  $A$  (unit quantity with the sign of the radial component of the heliospheric magnetic field in the northern hemisphere). Yet there is no consensus on what the inversion of the heliospheric magnetic field is and which effects in the GCR intensity are connected with this phenomenon.

In this article, we briefly formulate general concepts of the 22-year variation in characteristics of the Sun, heliosphere, and GCR intensity and discuss the observed effects in the GCR intensity, which we attribute to the heliospheric magnetic field reversal. Models for this phenomenon and the results of GCR intensity calculations with these models will be discussed in the next article.

**Keywords:** heliosphere, heliospheric magnetic fields (HMF), inversion of HMF, galactic cosmic rays (GCR), GCR modulation, long-term GCR variations, 22-year GCR intensity variation, GCR during HMF inversion.

вариация интенсивности ГКЛ, ГКЛ в периоды инверсии ГМП.

---

---

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГКЛ — галактические космические лучи.

ГМП — гелиосферное магнитное поле.

ГТС — гелиосферный токовый слой.

КО — кэррингтоновский оборот.

СМП — солнечные магнитные поля.

СЦ — солнечный цикл. Так для краткости обозначается солнечный цикл в тороидальной компоненте СМП (число, площадь и др. характеристики пятен, активных областей, вспышек, корональных выбросов масс и т. д.). Синонимы — 11-летний солнечный цикл, пятенный солнечный цикл.

ЭГ — энергетический гистерезис в интенсивности ГКЛ.

РБМ — регулярный баллонный мониторинг космических лучей — эксперимент, проводимый с 1957 г. Физическим институтом РАН (ФИАН) им. П.Н. Лебедева.

НМ — нейтронные мониторы космических лучей.

PAMELA — A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics — детектор космических лучей на борту спутника Ресурс ДК1.

AMS-02 — Alpha Magnetic Spectrometer — детектор космических лучей на борту Международной космической станции.

---

---

## ВВЕДЕНИЕ

О солнечных магнитных полях и их изменении с 22-летним периодом известно уже более ста лет, начиная с обнаружения их в биполярных группах пятен [Hale, 1908] и полярных областях [Hale, 1913] и наблюдения изменения полярности ведущего и ведомого пятен в пятнах нового цикла [Hale et al., 1919]. Для того чтобы было понятнее, о чем идет речь в статье, на рис. 1 приведены данные наблюдений солнечных и гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ с 1955 г.

По представлениям динамо-теории на Солнце сосуществуют две ветви солнечных магнитных полей (СМП) с существенно разными свойствами [Charbonneau, 2010]. В первом приближении с активными областями и связанными с ними явлениями (пятна, вспышки, корональные выбросы массы и т. д.) связаны тороидальные магнитные поля высокой напряженности  $B_{\text{тор}}$ , а количественными индексами по 150-летним наблюдениям являются площадь  $S_{\text{ss}}$  и положение групп солнечных пятен (панели *a*, *б*). Более слабая по напряженности  $B_{\text{пол}}$  полоидальная ветвь СМП связана, в первую очередь, с полярными (высокоширотными) квазирадialными полями, противоположными по направлению на северном и южном полюсах, и с корональными дырами, а количественными индексами являются число полярных факелов, наблюдаемых больше ста лет [Sheeley, 2008], а также компонента вдоль луча зрения высокоширотных СМП, наблюдаемая систематически с 1976 г. (панель *в*). Активность двух ветвей СМП развивается в противофазе. Тороидальные поля достигают максимума, естественно, в период максимума солнечного цикла (СЦ) и изменяют полярность вскоре после минимума этого цикла. Полоид-

дальная ветвь максимальна в минимуме СЦ и изменяет полярность в максимуме. Таким образом, хотя напряженность СМП каждой из ветвей изменяется с ~11-летним периодом, в их полярности наблюдается ~22-летний цикл.

Однако модуляция галактических космических лучей (ГКЛ), интересующая нас, происходит в гелиосфере (внешний слой солнечной атмосферы  $r_{\text{in}}^{\text{HS}} \leq r \leq r_{\text{out}}^{\text{HS}}$ , где  $r_{\text{in}}^{\text{HS}} \approx 10r_{\odot}$  и  $r_{\text{out}}^{\text{HS}} \geq 100 \text{ a.e.}$ ) и обусловлена воздействием на заряженные частицы солнечного ветра и гелиосферных магнитных полей (ГМП, панель *г*). В течение большей части СЦ в отношении направления регулярного ГМП к Солнцу, ( $B_r < 0$ ) или от Солнца ( $B_r > 0$ ) гелиосфера состоит из двух униполярных «полушарий» противоположной направленности, разделенных волнистым глобальным гелиосферным токовым слоем (ГТС) со степенью изогнутости  $\alpha_{\text{гт}}$  (панель *г*). На рис. 1, *a*, *г* видно, что и напряженность ГМП, и степень изогнутости ГТС коррелируют с тороидальной ветвью СМП. Описанная выше простая картина двухполушарной гелиосферы нарушается в периоды максимума СЦ.

ГКЛ, характеризующиеся изотропной интенсивностью  $J$  и небольшой анизотропией  $\delta J/J$ , проникают в гелиосферу из окружающей Солнце области Галактики, подвергаются воздействию солнечного ветра и ГМП, и их характеристики существенно изменяются (или модулируются). Видно (панель *д*), что интенсивность ГКЛ достигает максимума в эпохи минимума СЦ и наоборот, т. е. в первом приближении антикоррелирует с пятенным циклом СМП. Представление о солнечном пятенном цикле как единственной причине долговременной вариации интенсивности ГКЛ доминировало в первые десятилетия исследования ее модуляции. Однако уже в период

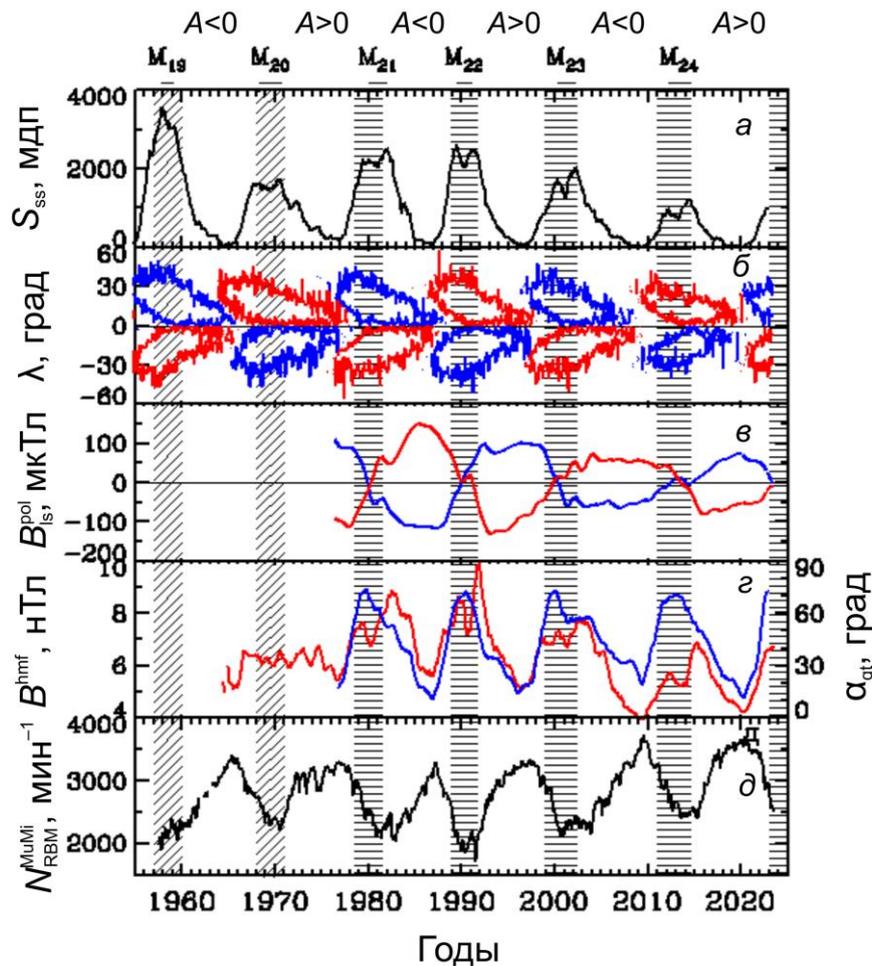


Рис. 1. Долговременные вариации солнечных и гелиосферных магнитных полей и интенсивности ГКЛ в 1955–2023 гг. Периоды максимума пятенной активности (интервал времени между двумя пиками Гневывшева [Gnevyshev, 1967; Storini et al., 2003]) и общая полярность ГМП  $A$  показаны над верхней панелью, а заштрихованные полосы отмечают периоды инверсии ГМП. Горизонтальной штриховкой показаны периоды для СЦ 21–24 в соответствии с [Крайнев, 2019] и период инверсии ГМП в СЦ 25, начавшийся в кэррингтоновском обороте (КО) 2265 в конце 2022 г. [http://wso.stanford.edu], а наклонной — наблюдавшиеся при отдельных измерениях СМП, но до начала его регулярного сканирования. Солнечные и гелиосферные характеристики (кроме широтных границ групп пятен) сглажены с периодом ~1 год. Панели  $a, б$  — площадь групп солнечных пятен и широтные границы групп пятен с  $B_{\phi} > 0$  (синие линии) и  $B_{\phi} < 0$  (красные линии) [https://solarscience.msfc.nasa.gov; ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/forecasts/SRS]. Панель  $в$  — компонента СМП вдоль луча зрения с Земли в северной (синяя линия) и южной (красная линия) полярных областях фотосферы Солнца [http://wso.stanford.edu]. Панель  $г$  — модуль радиальной компоненты ГМП на орбите Земли (красная линия) [ftp://omniweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low\_res\_omni] и степень изогнутости ГТС  $\alpha_{\text{ГТ}}$  (синяя линия) [http://wso.stanford.edu]. Панель  $д$  — среднемесячная скорость счета счетчика Гейгера—Мюллера в максимуме Регенера—Фотцера по данным эксперимента РБМ в Мурманской области и Антарктиде [https://sites.lebedev.ru/en/DNS\_FIAN]

формирования представления о гелиосфере как наружном протяженном слое атмосферы Солнца, отражающем процессы, происходящие на его поверхности, предполагалась возможность существования 22-летних эффектов в характеристиках ГКЛ.

Впервые эти эффекты в анизотропии ГКЛ были замечены С. Форбушем в 1967–1969 гг. по изменению времени максимума суточной волны в данных ионизационных камер [Forbush, 1969]. Влияние переменности общего магнитного поля Солнца (так тогда называли МП в полярных областях фотосферы) на интенсивность ГКЛ впервые было замечено группой ФИАН в 1973 г. [Charakhchyan et al., 1973] и интерпретировано как эффект инверсии этого поля в свойствах ГМП. С тех пор проявления 22-летней

цикличности ГМП в интенсивности ГКЛ исследуются уже в течение пятидесяти лет, причем в основном обращается внимание на явления в периоды низкой активности Солнца и соответственно двухполушарного распределения полярности ГМП. Отметим, что под интенсивностью в этой статье понимается ее изотропная часть, а под анизотропией — характеристика отклонения строго понимаемой интенсивности от изотропии (в простейшем случае — вектор).

Однако для периодов высокой пятенной активности Солнца и инверсии ГМП не существует единого мнения о том, какие эффекты в интенсивности ГКЛ обусловлены этой инверсией, хотя за время регулярного мониторинга ГКЛ разных энергий ин-

версия ГМП происходила уже семь раз. Более того, в большинстве работ о поведении ГКЛ в эти периоды (см., например, [Aslam et al., 2023]) отдельные эффекты в интенсивности ГКЛ, характерные для разных периодов инверсии ГМП, обычно не выделяются. Поэтому обсуждение таких эффектов, систематически (начиная с [Charakhchyan et al., 1973; Svirzhevskaya et al., 1975]) выделяемых для разных периодов инверсии ГМП в работах группы ФИАН, может быть полезно.

Хотя в статье анализируется поведение интенсивности ГКЛ в периоды инверсии ГМП, для обсуждения этого поведения с современных позиций надо сформулировать общую картину 22-летней цикличности в характеристиках гелиосферы и интенсивности ГКЛ. Поэтому сначала кратко формулируются общие факты и представления о вариации с 22-летним периодом СМП и ГМП, а также интенсивности ГКЛ (раздел 1). Затем обсуждаются наблюдаемые эффекты в интенсивности ГКЛ, связываемые нами с инверсией ГМП (раздел 2). Обсуждение полученных результатов содержится в разделе 3. Вопросы моделирования гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ в периоды инверсии ГМП будут рассмотрены в следующей статье.

## 1. ОБЩИЕ ФАКТЫ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О 22-ЛЕТНИХ ВАРИАЦИЯХ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Характерные размеры тороидальных СМП (например, расстояние между ведущим и ведомым пятнами)  $L_{\text{тор}}$  малы по сравнению с радиусом Солнца  $r_{\odot}$ ,  $L_{\text{тор}} \ll r_{\odot}$ , в то время как характерный размер полоидальных СМП (примерно диаметр фотосферы)  $L_{\text{пол}} \approx r_{\odot}$ . Благодаря слою  $r_{\odot} \leq r \leq r_{\text{in}}^{\text{HS}}$  между фотосферой и гелиосферой, в котором основным энергетическим фактором является магнитное поле, при проникновении СМП в гелиосферу, где основу энергетического баланса составляет кинетическая энергия солнечного ветра, большое преимущество получают более крупномасштабные полоидальные СМП [Schatten et al., 1969; Altschuler, Newkirk, 1969]. При этом на них существенное влияние оказывают мощные тороидальные поля, возможно, из-за нагрева короны и связанной с этим системы горизонтальных токов [Zhao, Hoeksema, 1994].

В результате, хотя напряженность ГМП коррелирует с характеристиками тороидального СМП, топологически именно полоидальные СМП образуют ГМП в виде двух униполярных полушарий противоположной полярности, разделенных волнистым глобальным ГТС. Такое представление, относящееся к периоду вне инверсии полоидального СМП, сложилось уже к середине 1970-х гг. [Shulz, 1973] и характеризуется общей полярностью ГМП  $A$  (единичная величина со знаком радиальной компоненты ГМП  $B_r$  в северном полушарии гелиосферы) и степенью изогнутости ГТС (квазитилт  $\alpha_{\text{qt}}$  — половина широтного диапазона, занимаемого ГТС). Отметим,

что мы разделяем наблюдаемую характеристику (квазитилт  $\alpha_{\text{qt}}$ ), определяемую для каждого КО по результатам сканирования СМП в обсерватории Вилкокса (Wilcox Solar Observatory, WSO), и тилт (наклон токового слоя)  $\alpha_t$  — параметр модели так называемого наклонного токового слоя [Jokipii, Thomas, 1981], предполагающей, что токовый слой на фиксированном расстоянии лежит в плоскости, наклоненной к экватору на угол  $\alpha_t$ . Инверсия ГМП, т. е. изменение знака его полярности  $A$ , происходит в период максимума СЦ и связана, по-видимому, с замещением на Солнце старых полей новыми из-за дрейфа к полюсам остатков тороидальных полей [Charbonneau, 2010]. При недостаточной изученности гелиосферы для количественного представления о ГМП во всей гелиосфере очень важны данные WSO [<http://wso.stanford.edu>], основанные на ежедневном сканировании фотосферных СМП. Качественные представления о ГМП в периоды его инверсии будут изложены ниже. На рис. 1 горизонтальной штриховкой для СЦ 21–24 по регулярным измерениям WSO и по нашей модели (см. ниже) показаны периоды инверсии, сведенные в таблицу в [Крайнев, 2019], а для текущего СЦ 25 — период инверсии ГМП, начавшийся в конце 2022 г. (КО 2265). Наклонной штриховкой показаны периоды инверсии ГМП в СЦ 19–20 по измерениям высокоширотных СМП [Babcock, 1959; Howard, 1974; Sheeley, 1976], когда регулярное сканирование и обработка СМП в WSO (с 1976 г.) еще не начались.

В 1970–1980-х гг. в основном сложились представления о механизмах воздействия на ГКЛ упорядоченного распределения ГМП в периоды вне его инверсии: 1) дрейф частиц в неоднородном магнитном поле ([Jokipii et al., 1977]; эффекты зависят от знака  $qA$  (будем обозначать такую зависимость как  $\sim qA$ ), где  $q$  — заряд частиц); 2) диффузия частиц с учетом спиральности регулярного ГМП ([Bieber et al., 1987]; эффекты  $\sim A$ ); возможно, 3) пересоединение между ГМП и галактическим полем ([Schatten, Wilcox, 1969; Nagashima, 1977; Ahluwalia, 1979]; эффекты  $\sim A$ ) и 4) проявление разности электрического потенциала между гелиосферой и межзвездным пространством ([Krainev, 1979; Jokipii, Levy, 1979]; эффекты  $\sim qA$ ). Тогда же были обнаружены соответствующие наблюдаемые эффекты в интенсивности ГКЛ [Jokipii, Thomas, 1981]: чередование пикообразных и платообразных временных профилей интенсивности ядер ГКЛ соответственно в периоды  $A < 0$  и  $A > 0$  (см. рис. 1, д).

В результате теоретического описания поведения ГКЛ сложилось мнение [Potgieter, 2013] о магнитном дрейфе как важном механизме модуляции ГКЛ в периоды вблизи минимумов СЦ, когда степень изогнутости ГТС невелика (квазитилт  $\alpha_{\text{qt}} < 30^\circ$ ). При этом оставшаяся часть СЦ ( $\alpha_{\text{qt}} > 30^\circ$ , примерно половина или большая часть СЦ в зависимости от модели  $\alpha_{\text{qt}}$ ) мы относим к периоду, когда для ГКЛ может быть важна инверсия ГМП. Отметим, что еще в первой работе [Jokipii, Thomas, 1981], в которой в результате расчета был получен и подтвержден

наблюдениями эффект чередования пикообразных и платообразных временных профилей интенсивности ГКЛ в зависимости от общей полярности ГМП и знака заряда частиц, авторы ограничились выводом периодом времени, когда  $\alpha_c < 30^\circ$ , так как в периоды ближе к максимуму СЦ, по их выражению, вся структура магнитного поля меняет знак и нельзя ожидать простой упорядоченной структуры, свойственной периодам приближающегося солнечного минимума. Таким образом, периоды, когда можно ожидать влияние на интенсивность ГКЛ инверсии ГМП, включают: 1) короткий период (меньше года) быстрого спада интенсивности до начала инверсии ГМП; 2) саму инверсию ГМП, когда происходит переход от общей полярности ГМП  $A < 0$  к  $A > 0$  или наоборот (эти типы инверсии можно также обозначать как инверсии с  $dA/dt > 0$  или  $dA/dt < 0$ ); 3) начальный период роста интенсивности после инверсии ГМП (~2 года). Поскольку процесс инверсии ГМП не может оказать влияние на интенсивность ГКЛ до своего начала, поведение ГКЛ в первый из этих периодов рассматриваться не будет.

Что касается структуры инверсии ГМП, наши качественные представления о ней сложились примерно десять лет назад [Kraïnev, Kalinin, 2014; Kraïnev et al., 2015; Крайнев, 2019] как о состоящей из трех фаз. В течение большей части СЦ ГМП до инверсии разделено на два униполярных полушария противоположной полярности с общей полярностью  $A_1$ , разделенных единственным и глобальным (т. е. соединяющим все долготы) ГТС. В первой фазе инверсии (мы называем ее прединверсией) кроме этого глобального ГТС в униполярных полушариях появляются дополнительные островки ГМП противоположной полярности, т. е. нарушается единственность, но сохраняется глобальность ГТС. После фазы прединверсии следует фаза собственно инверсии ГМП, когда нарушается глобальность ГТС, т. е. в некоторые обороты Солнца отсутствуют ГТС, соединяющие все долготы. Наконец, в третьей фазе инверсии ГМП (постинверсии) восстанавливается глобальность ГТС, соответствующая новой общей полярности  $A_2 = -A_1$ , противоположной исходной, но единственности ГТС еще нет. После завершения всей инверсии устанавливается ГМП с двумя униполярными разделенными единственным глобальным ГТС полушариями противоположной полярности с общей полярностью  $A_2$ . Отметим, что форма ГТС определяется по моделям WSO [<http://wso.stanford.edu>] как форма нейтральных линий радиального магнитного поля на поверхности источника ГМП. Считается, что вытягивание этой структуры в гелиосферу радиальным солнечным ветром с учетом вращения Солнца дает неплохое приближение к наблюдаемой форме ГТС [Burton et al., 1994; Smith, 2001, 2011]. Временные границы трех фаз инверсии ГМП для четырех последних циклов (СЦ 21–24), приведенные в таблице в работе [Крайнев, 2019], а также начало инверсии ГМП для СЦ 25), показанное на рис. 1, определены по классическому варианту модели WSO и незначительно изменяются для другого (радиального) варианта. Как отмечалось во введении, количественное моде-

лирование гелиосферных характеристик и интенсивности ГКЛ в периоды инверсии ГМП будет рассмотрено в следующей статье.

## 2. НАБЛЮДАЕМЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ В ПЕРИОДЫ ИНВЕРСИИ ГМП

К началу 1970-х гг. систематический мониторинг интенсивности ГКЛ (в основном протонов довольно большой кинетической энергии  $T \geq 1$  ГэВ) на поверхности и в атмосфере Земли проводился уже более 30 лет: ионизационные камеры с 1936 г. [Forbush, 1939]; отдельные нейтронные мониторы (НМ) с 1952 г. [Simpson, 1985, 2000]; мировая сеть НМ [<http://www.nmdb.eu>] и регулярный баллонный мониторинг (РБМ) [[https://sites.lebedev.ru/en/DNS\\_FIAN](https://sites.lebedev.ru/en/DNS_FIAN)] с 1957 г. Прямые измерения вне Земли ГКЛ других типов (ядра, электроны и т. д.) и протонов меньших энергий начались в 1960-х гг., но до середины 2000-х гг. мониторинг их интенсивностей в широком диапазоне энергий носил эпизодический характер [Evenson et al., 1983; Garcia-Munoz et al., 1986].

По результатам мониторинга Форбушем уже в 1954 г. была установлена общая антикорреляция интенсивности ядерной компоненты ГКЛ с СЦ [Forbush, 1954]. Первые два десятилетия анализ данных состоял в сопоставлении временного хода интенсивности ГКЛ с поведением различных характеристик СЦ и с эпизодическими наблюдениями на КА. В эти же годы были разработаны общие представления о гелиосфере [Parker, 1963], созданы основы теории модуляции ГКЛ [Parker, 1958; Крымский, 1964; Parker, 1965], проведены оценки коэффициентов транспортного уравнения по результатам измерений гелиосферных характеристик.

Хотя, как уже указывалось во введении, в 1950-е и 1960-е гг. долговременные вариации интенсивности ГКЛ связывались в основном с 11-летним СЦ, о 22-летней цикличности обеих ветвей СМП уже давно было известно по прямым измерениям сильных магнитных полей пятен и слабых полей в полярных областях. Поэтому при анализе данных по характеристикам ГКЛ возможность проявления 22-летней цикличности СМП в этих данных должна была учитываться.

Первым таким проявлением была 22-летняя волна в анизотропии ГКЛ, обнаруженная Форбушем при анализе данных ионизационных камер по времени максимума суточной волны [Forbush, 1969]. Историю обнаружения 22-летней цикличности СМП в интенсивности ГКЛ изложим более подробно. Кроме того, поскольку при этом использовались данные эксперимента РБМ, отметим, что в рамках этого эксперимента, проводимого с 1957 г. ФИАН, поднимаемый на шаре зонд передает на приемный пункт импульс при прохождении каждой частицы ионизирующей компоненты первичных и вторичных космических лучей через детектор (счетчик Гейгера — Мюллера). Такие измерения проводятся регулярно в нескольких пунктах Земли (в настоящее время три раза в неделю в Мурманской и Московской областях и в обсерватории Мирный в Антарктиде). Ниже при обсужде-

нии наблюдаемых эффектов в интенсивности ГКЛ мы будем использовать среднемесячные значения объединенной скорости счета детектора РБМ  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}$  по данным Мурманска и Мирного в максимуме зависимости скорости счета от количества вещества над прибором (максимум Регенера—Пфотцера). Скорость счета  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}$  коррелирует с интенсивностью протонов с кинетической энергией  $T > 0.1$  ГэВ [Стожков и др., 2007], эффективная энергия  $T_{\text{eff}}^{\text{MuMi}} \approx 3\text{--}5$  ГэВ. Более подробно эксперимент РБМ описан в работах [Bazilevskaya, Svirzhevskaya, 1998; Stozhkov et al., 2009] и на сайте [https://sites.lebedev.ru/en/DNS\_FIAN]. В дальнейшем скорость счета  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}$  будем называть просто скоростью счета РБМ, а среднемесячную скорость счета нейтронного монитора Москва  $N_{\text{NM}}^{\text{Mo}}$  — данными НМ (эффективная энергия  $T_{\text{eff}}^{\text{NM}} \approx 10$  ГэВ).

При сопоставлении временных профилей характеристик СЦ и интенсивности ГКЛ по данным эксперимента РБМ и нейтронных мониторов за 1957–1968 гг. [Стожков, Чарахчян, 1969; Stozhkov, Charakhchyan, 1970] было замечено, что временной профиль скорости счета детекторов  $N(t)$  хорошо аппроксимируется выражениями

$$N(t) = N_0 \exp(-C\psi(t)), \quad (1)$$

$$\psi = \eta^{0.8} \lambda^{-1.2}, \quad (2)$$

где  $\psi$  — модулирующий фактор;  $\eta$ ,  $\lambda$  — среднее за месяц число групп солнечных пятен на диске и средний модуль гелиошироты этих групп пятен [https://solarscience.msfc.nasa.gov];  $N_0$ ,  $C$  — константы, зависящие от энергии регистрируемых частиц, причем  $N_0$  имеет смысл немодулированной солнечной активностью скорости счета при  $\psi=0$ . На рис. 2 сравнивается поведение скорости счета  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}$  и  $N$  при константах  $N_0$  и  $C$ , определенных из линейной регрессии  $\ln N_{\text{max}}^{\text{MuMi}}(t)$  и  $\psi(t)$  за период между инверсиями ГМП в СЦ 19 и 20 (1960–1968 гг.). Видна хорошая аппроксимация поведения данных РБМ выражениями (1), (2) (коэффициент корреляции  $\rho=0.91 \pm 0.02$  при длине рядов  $N=87$ ).

Однако после максимума СЦ 20 с 1971 г. наблюдаемая скорость счета РБМ резко пошла вверх, в то время как скорость счета, ожидаемая по поведению фактора  $\psi$ , возростала примерно с такой же скоростью, как в начале 1960-х гг. В работе [Charakhchyan et al., 1973] этот факт был сопоставлен с данными по инверсии высокоширотных СМП в СЦ 19 в 1957–1958 гг. [Vabsock, 1959] и с ожидаемой инверсией примерно каждые 11 лет [Vabsock, 1961]. Это связано с предполагаемой инверсией в СЦ 20 из-за ослабления солнечного магнитного диполя, а значит, по аналогии с земным диполем, и жесткости обрезания ГМП. Теперь же, когда стало ясно, что в гелиосфере понятие жесткости обрезания неприменимо, указанный эффект расхождения наблюдаемой интенсивности

ГКЛ в начале 1970-х гг. с ожидаемой по аппроксимации наблюдений за 1960-е гг. мы связываем с разной формой временного профиля интенсивности ГКЛ для периодов с  $A < 0$  и  $A > 0$  и переходом от цикла с медленным восстановлением интенсивности протонов после максимума СЦ ( $qA < 0$  для протонов в 1960-х гг.) к циклу с быстрым ростом ( $qA > 0$  для протонов в 1970-х гг.). Поэтому первым эффектом в поведении интенсивности ГКЛ, связанным с инверсией ГМП, мы считаем существенную разницу в скорости восстановления интенсивности после максимумов с инверсией ГМП с  $dA/dt < 0$  и  $dA/dt > 0$ . Отметим, что впервые на 22-летнюю периодичность в скорости восстановления интенсивности после максимумов СЦ обращено внимание в работе [Ahluwalia, 1979].

Поведение скорости счета РБМ (см. рис. 2) сравнивается с ее аппроксимацией в соответствии с выражениями (1), (2) не только за обсуждавшийся выше 22-летний период между инверсиями ГМП в СЦ 19 и 21 (1960–1978 гг.) с константами  $N_0$  и  $C$ , определенными за период с общей полярностью ГМП  $A < 0$  между инверсиями ГМП в СЦ 19 и 20 (1960–1968 гг.), но и для следующих двух 22-летних периодов (1982–1999 и 2002–2022 гг.) с константами  $N_0$  и  $A$ , определенными за периоды с  $A < 0$ . Видно, что наблюдаемое поведение скорости счета РБМ в 1980-х гг. аппроксимируется выражениями (1), (2) хуже, чем в 1960 гг. ( $\rho=0.83 \pm 0.03$  при  $N=87$ ), хотя существует значительное превышение наблюдаемой интенсивности ГКЛ над ожидаемой согласно (1), (2) через год после окончания инверсии ГМП. По-видимому, ухудшение аппроксимации обусловлено очень острым временным профилем наблюдаемой интенсивности в 1980-х гг., так что для его аппроксимации требуются другие показатели степени для фактора (2) [Bazilevskaya et al., 1995]. Однако для последнего 22-летнего периода (2002–2022 гг.) ситуация близка к той, которая наблюдалась в 1960–1978 гг.: хорошая аппроксимация наблюдений в период с  $A < 0$  ( $\rho=0.90 \pm 0.02$  при  $N=101$ ) и систематическое (хотя и небольшое) превышение наблюдаемой интенсивности над аппроксимацией выражениями (1), (2) после периода инверсии с  $dA/dt > 0$ .

Чтобы сильнее подчеркнуть разницу в форме временных профилей интенсивности ядер в периоды с общей полярностью ГМП  $A < 0$  и  $A > 0$ , на рис. 3 показана регрессия между скоростью счета РБМ и ее производной по времени (или темпом изменения скорости счета) для тех же трех 22-летних периодов, примерно с тем же темпом. Напротив, в периоды  $A > 0$  скорость счета РБМ сначала быстро возрастает в диапазоне  $500\text{--}700 \text{ мин}^{-1} \cdot \text{мес}^{-1}$ , потом темп ее изменения резко уменьшается, оставаясь малым еще некоторое время после достижения максимальной скорости счета. В общих чертах описанное поведение скорости счета РБМ и ее производной по времени соответствует относительно медленному восстановлению интенсивности протонов после максимума СЦ с остроугольным временным профилем интенсивности ядер в периоды  $A < 0$ , а при  $A > 0$  — более

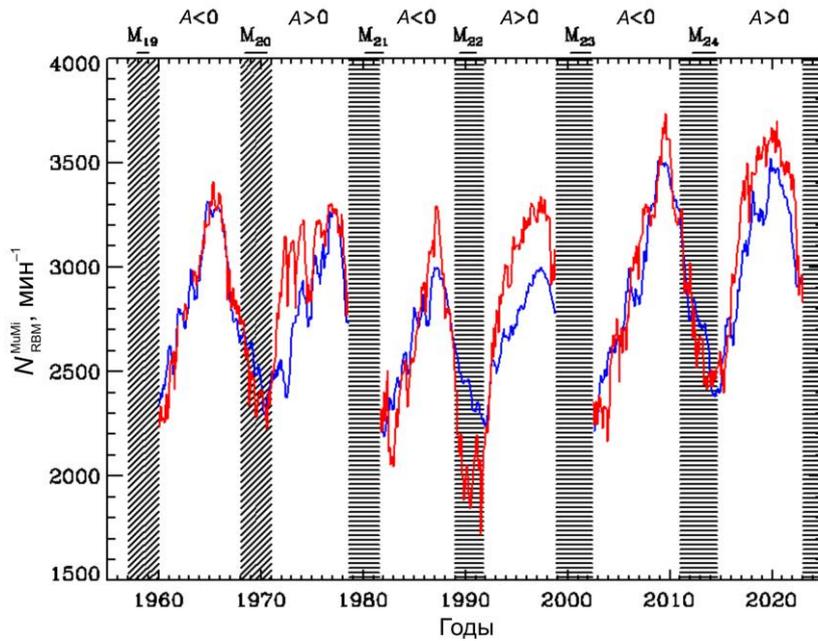


Рис. 2. Сравнение временного профиля среднемесячной скорости счета РБМ (красная линия) и ее аппроксимации выражениями (1), (2) для периодов с  $A < 0$  (синяя линия) для трех 22-летних циклов. Смысл обозначений над панелью и заштрихованных полос тот же, что на рис. 1

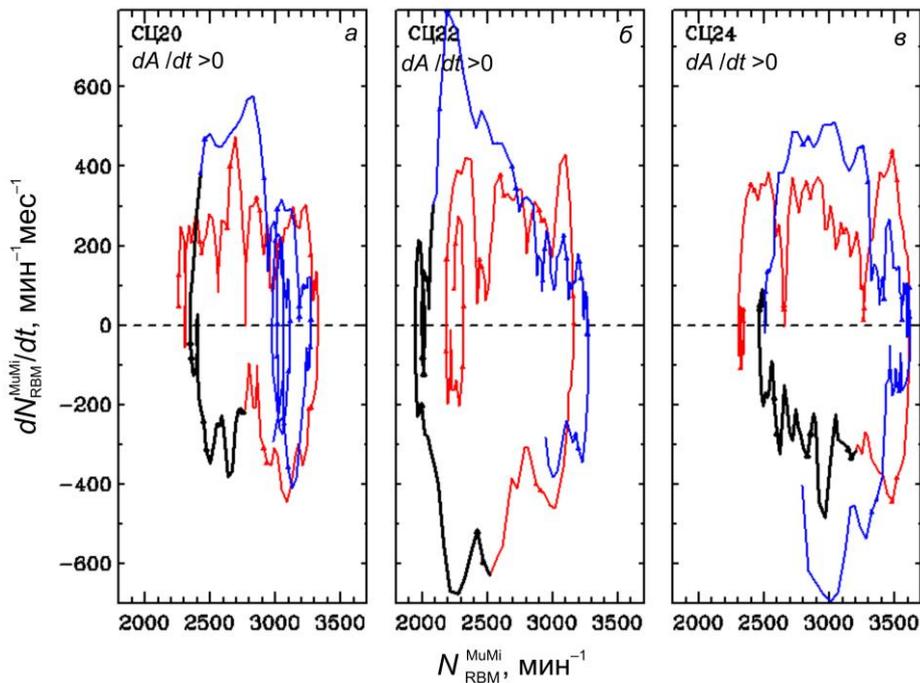


Рис. 3. Регрессия между сглаженной по 13 точкам среднемесячной скоростью счета РБМ и ее производной по времени для трех 22-летних периодов с центром в периоды инверсии ГМП с  $dA/dt > 0$  в СЦ 20 (а), СЦ 22 (б) и СЦ 24 (в). Красные кривые — периоды  $A < 0$ , синие —  $A > 0$ , черные жирные — период инверсии ГМП

быстрому росту интенсивности после инверсии с относительно плоским профилем вокруг максимума интенсивности [Jokipii, Thomas, 1981].

Практически одновременно с описанным выше эффектом существенного превышения наблюдаемой интенсивности над ее аппроксимацией выражениями (1), (2) после инверсии ГМП в 1969–1971 гг. с инверсией ГМП был связан второй эффект в поведении интенсивности ГКЛ — резкое изменение энергетической зависимости долговременной вариации

интенсивности ГКЛ в период инверсии ГМП [Svirzhetskaya et al., 1975]. Широко используемое название этого эффекта как энергетического гистерезиса (ЭГ) связано с тем, что на графиках регрессии между интенсивностями ГКЛ низкой (например, регистрируемой в эксперименте РБМ) и высокой (например, регистрируемой НМ) энергий из-за указанного резкого изменения энергетической зависимости образуется петля, внешне напоминающая петлю магнитного гистерезиса. Отметим, что гисте-

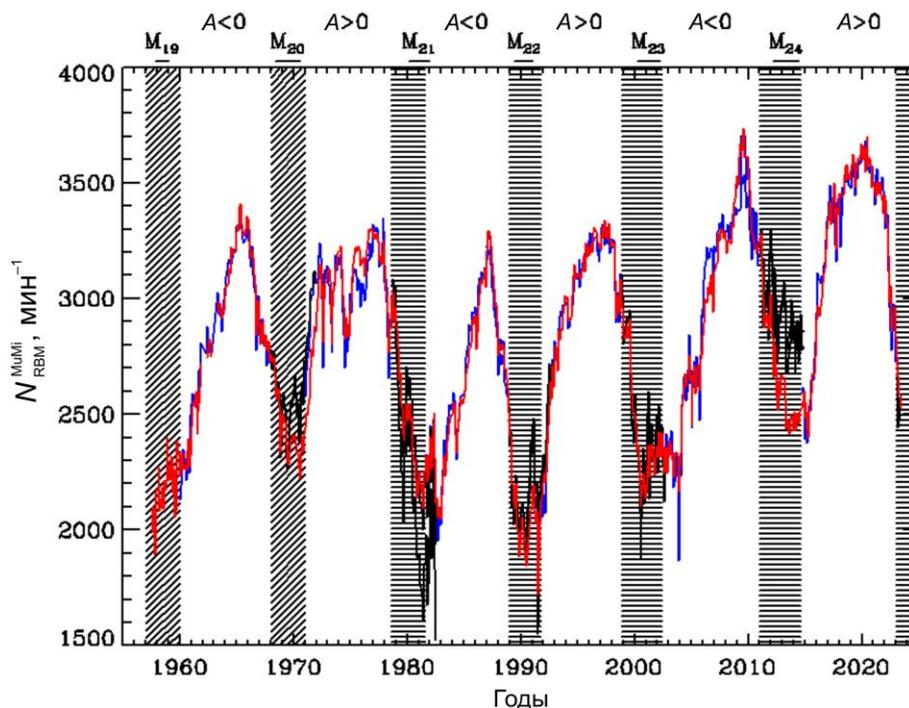


Рис. 4. Сравнение временного профиля скорости счета детектора РБМ (красная кривая) и скорости счета НМ Москва, приведенной к  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}(t)$  линейной регрессией за периоды между инверсиями ГМП (синяя кривая). Смысл обозначений над верхней панелью и заштрихованных полос тот же, что на рис. 1, 2. Черные кривые — экстраполяция на период инверсии ГМП приведенной скорости счета НМ Москва, определенной по предыдущему периоду между инверсиями

резисом в интенсивности ГКЛ часто называют также эффекты в сопоставлении интенсивности и характеристик солнечной активности (см., например, [Simpson, 1963]). Мы будем называть зарядовым гистерезисом эффект в сопоставлении интенсивности частиц с разным знаком заряда (см. ниже).

Фактически резкое изменение энергетической зависимости долговременной модуляции ГКЛ в период максимума СЦ 20 было отмечено в [Lockwood et al., 1972; Burger, Swanenburg, 1973] раньше, чем в [Svirzhevskaya et al., 1975]. Однако в то время как авторы [Lockwood et al., 1972] связали это явление с сильным форбуш-эффектом в июне 1969 г., в работе [Svirzhevskaya et al., 1975] оно рассматривалось как проявление инверсии ГМП в этот период. На рис. 4, иллюстрирующем это явление, поведение скорости счета в эксперименте РБМ сравнивается со скоростью счета НМ «Москва», приведенной к  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}(t)$  линейной регрессией за периоды между инверсиями ГМП (для периодов 1960-х, 1970-х, 1980-х, 1990-х, 2000-х и 2010-х гг. коэффициенты корреляции равны соответственно  $\rho=0.987\pm 0.003$  ( $N=87$ ),  $0.82\pm 0.04$  ( $N=90$ ),  $0.985\pm 0.003$  ( $N=87$ ),  $0.984\pm 0.003$  ( $N=84$ ),  $0.971\pm 0.006$  ( $N=101$ ),  $0.980\pm 0.004$  ( $N=100$ )). Различие в период инверсии ГМП скорости счета РБМ и скорости НМ «Москва», приведенной к  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}(t)$  за предыдущий период между инверсиями ГМП, характеризует изменение энергетической зависимости долговременной модуля-

ции ГКЛ в период максимума СЦ. Видно (см. рис. 4), что действительно резкое изменение энергетической зависимости долговременной модуляции ГКЛ для пары РБМ и НМ «Москва» наблюдается только для периода инверсии ГМП в СЦ 20 (1969–1972 гг.), с которым был связан этот эффект [Svirzhevskaya et al., 1975], и в СЦ 24 (2012–2014 гг.). В остальные периоды инверсии ГМП в СЦ 21–23 различие в скоростях счета РБМ и скорости счета НМ «Москва», приведенной к  $N_{\text{RBM}}^{\text{MuMi}}(t)$  за предыдущий период вне инверсии ГМП, незначительно, т. е. резкого изменения энергетической зависимости долговременной модуляции ГКЛ в периоды инверсии ГМП в эти солнечные циклы не наблюдалось.

Другим форматом, в котором обычно визуализируется ЭГ, является регрессионная зависимость между скоростями счета детекторов ГКЛ разной энергии, в частности, экспериментов РБМ и НМ. На рис. 5 приведены эти зависимости для 22-летних периодов с центром в периоды инверсии СЦ 20–24. Выделяются резкое изменение энергетической зависимости долговременной модуляции ГКЛ в период инверсии ГМП в СЦ 20 и большая петля ЭГ для соответствующего 22-летнего периода. Заметны также локальные петли в периоды максимумов интенсивности всех циклов, обусловленные разностью кинетических свойств (прежде всего, коэффициентов диффузии и скорости магнитного дрейфа) частиц разных энергий. Что же касается периодов минимумов интенсивности ГКЛ, приходящихся на максимумы

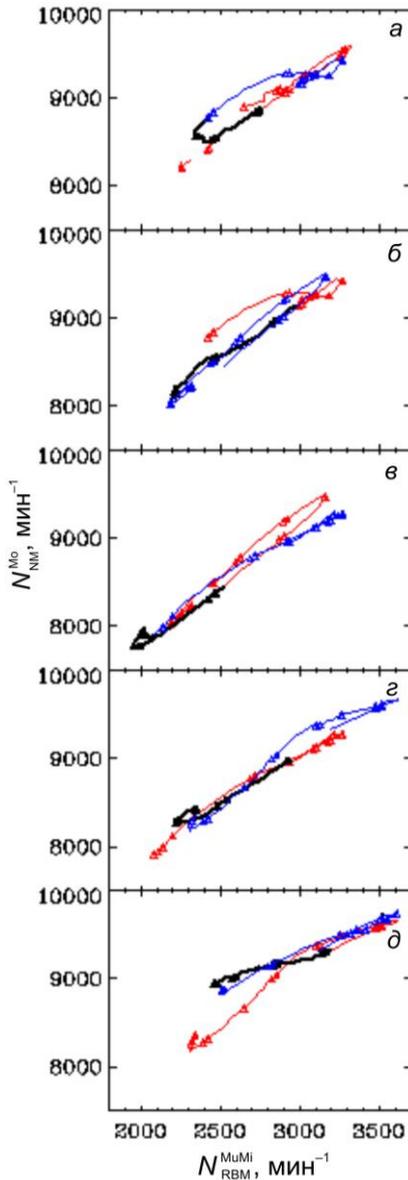


Рис. 5. Регрессия между сглаженными по 13 точкам среднемесячными скоростями счета детекторов эксперимента РБМ и НМ «Москва» для 22-летних периодов с центром в периоды инверсии ГМП в СЦ 20 (а), СЦ 21 (б), СЦ 22 (в), СЦ 23 (г) и СЦ 24 (д). Красные линии — периоды  $A < 0$ , синие —  $A > 0$ , черные жирные линии — периоды инверсии ГМП. Треугольником отмечено начало каждого года

пятенной активности Солнца и инверсии ГМП, то по масштабу изменения энергетической зависимости модуляции ГКЛ опять выделяются СЦ 20 и 24, но последний без существенной петли ЭГ.

Оба периода инверсии ГМП со сравнительно резким изменением энергетической зависимости долговременной модуляции ГКЛ (в СЦ 20 и 24) относятся к периодам с  $dA/dt > 0$ , т. е. характеризуются переходом от общей полярности ГМП  $A < 0$  к  $A > 0$ . Интересно детализировать этот эффект для дифференциальных интенсивностей первичных ГКЛ (или для средних интенсивностей в фиксированных диапазонах энергии или жесткости), а не только для интегральных интенсивностей смеси первичных и вторичных частиц, которые регистрируются в экспери-

ментах РБМ и НМ. В период вокруг инверсии ГМП в СЦ 20 (1968–1971 гг.) надежных систематических измерений дифференциальных интенсивностей в широких энергетических диапазонах еще не было, но в период вокруг инверсии ГМП в СЦ 24 (2011–2014 гг.) эксперименты PAMELA 2006–2016 гг. (см. [Adriani et al., 2013; Martucci et al., 2018]) и AMS-02 с 2011 г. по настоящее время (см. [Aguilar et al., 2018, 2021]) дают такую возможность.

Для этой цели по данным PAMELA [Martucci et al., 2018] и AMS-02 [Aguilar et al., 2018] были сформированы ряды интенсивностей протонов в диапазонах жесткости  $\sim 1$ –2, 2–3, 3–7.5 ГВ, усредненных за кэррингтоновские или бартельсовские обороты за 06.2006–02.2014 (PAMELA) и 05.2011–2019 (AMS-02), а также ряды интенсивности электронов примерно в тех же диапазонах жесткости и с тем же временным разрешением по данным AMS-02 за 05.2011–2017 [Aguilar et al., 2021]. На рис. 6 показаны временные профили этих интенсивностей за 2006–2019 гг.

С данными была проведена процедура, описанная выше для анализа ЭГ по данным эксперимента РБМ и НМ. Интенсивности протонов в диапазонах жесткости 2–3 и 3–7.5 ГВ были приведены к интенсивности в диапазоне 1–2 ГВ путем линейной регрессии в определенные интервалы времени, а затем экстраполированы на период инверсии ГМП. Результаты показаны на рис. 7 по данным PAMELA (а) и AMS-02 (б).

Отметим, что интересующий нас период инверсии ГМП располагается асимметрично по отношению к периодам наличия данных PAMELA и AMS-02. К сожалению, для PAMELA отсутствуют данные за большую часть 2010 г., а данные за 2015 г., когда в интенсивности протонов по данным AMS-02 (а также РБМ и НМ) наблюдалось быстрое восстановление, не опубликованы. Большая часть данных PAMELA (за 2006–2012 гг.) относится к периоду с общей полярностью ГМП  $A < 0$  до периода инверсии ( $N=62$ ), для которого и была проведена основная регрессия интенсивности протонов высоких энергий к интенсивности низких энергий ( $\rho=0.990\pm 0.002, 0.94\pm 0.01$  между интенсивностями соответственно второго и третьего диапазонов жесткости к интенсивности первого диапазона) и их экстраполяция на период инверсии ГМП во времени. Результаты вспомогательной регрессии за короткий интервал  $N=12$ , показанные пунктиром, несколько отличаются от результатов основной регрессии ( $\rho=0.95\pm 0.03, 0.87\pm 0.07$ ).

Большая часть данных AMS-02 (за 2015–2019 гг.) относится к периоду с общей полярностью ГМП  $A > 0$  после периода инверсии ГМП ( $N=65$ ), для которого и была проведена основная регрессия интенсивности протонов высоких энергий к интенсивности низких энергий и их экстраполяция на тот же период назад по времени. Соответствующие коэффициенты корреляции  $\rho=0.990\pm 0.002, 0.975\pm 0.006$ , т. е. линейная регрессия между интенсивностями протонов низкой и более высоких энергий хорошая. Данные AMS-02 существуют лишь с мая 2011 г., поэтому оценить изменение энергетической зависимости по данным за период с  $A < 0$  до периода инверсии,

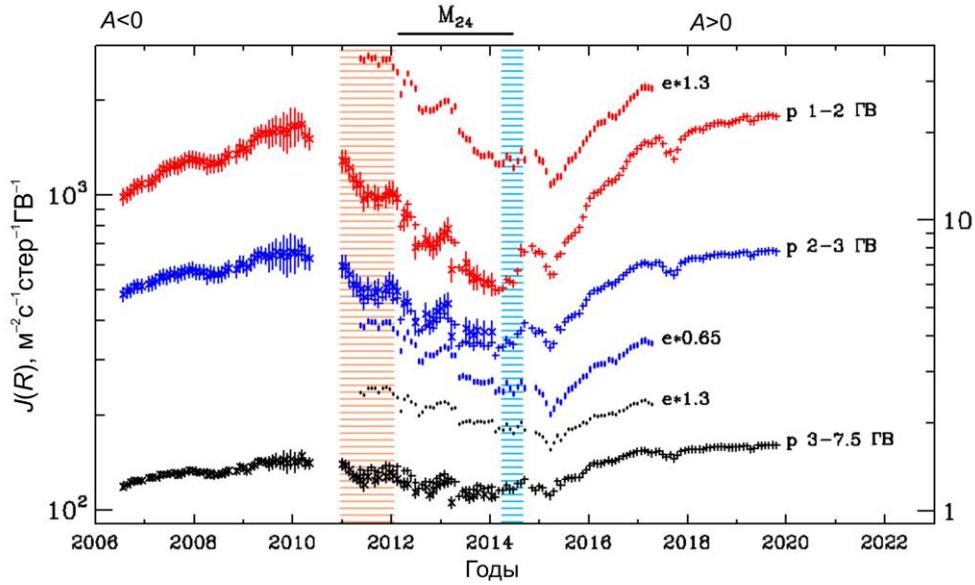


Рис. 6. Зависимость интенсивностей протонов и электронов от времени по данным экспериментов PAMELA и AMS-02 за 2006–2019 гг. Периоды максимума пятенной активности (интервал времени между двумя пиками Гневывшева [Gnevyshev, 1967; Storini et al., 2003]) и общая полярность ГМП А показаны над верхней панелью, а заштрихованные полосы отмечают структуру периода инверсии ГМП (розовая — прединверсия, голубая — постинверсия, а период собственно инверсии ГМП между ними не заштрихован [Крайнев, 2019]). Масштаб на левой оси ординат соответствует интенсивности протонов, на правой — электронов. Красные кривые — интенсивности протонов и электронов с жесткостью 1–2 ГВ, синие — 2–3 ГВ, черные — 3–7.5 ГВ. Для электронов интенсивности умножены на коэффициенты, указанные на рисунке

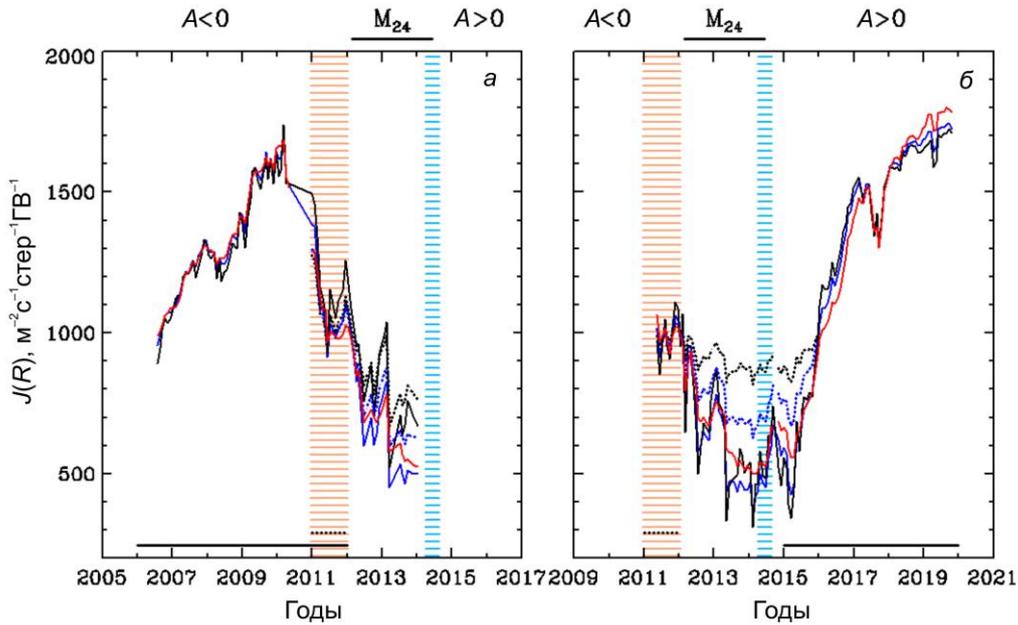


Рис. 7. Изменение энергетической зависимости долговременных вариаций интенсивности ГКЛ в период инверсии ГМП в СЦ 24 в интенсивности протонов разных энергий по данным PAMELA (а) и AMS-02 (б). Смысл обозначений над верхней панелью и заштрихованных полос тот же, что на рис. 6. Красные, синие, черные сплошные и пунктирные линии — интенсивности протонов в диапазонах жесткости 1–2, 2–3, 3–7.5 ГВ соответственно, приведенные к интенсивности в первом из этих диапазонов путем линейной регрессии в интервалы времени, показанные сплошными и пунктирными прямыми у оси времени

чтобы сделать экстраполяцию нормированных значений интенсивности на период собственно инверсии ГМП вперед по времени, можно лишь за очень короткий интервал 05.2011–2012 г. ( $N=9$ ). Соответственно коэффициенты корреляции при регрессии

за этот малый (вспомогательный) период малы,  $\rho=0.8\pm 0.1$ ,  $0.6\pm 0.2$ . Существенное нарушение энергетической зависимости вариаций в период инверсии ГМП (см. рис. 7, б) хорошо видно при экстраполяции приведенных интенсивностей на период инверсии

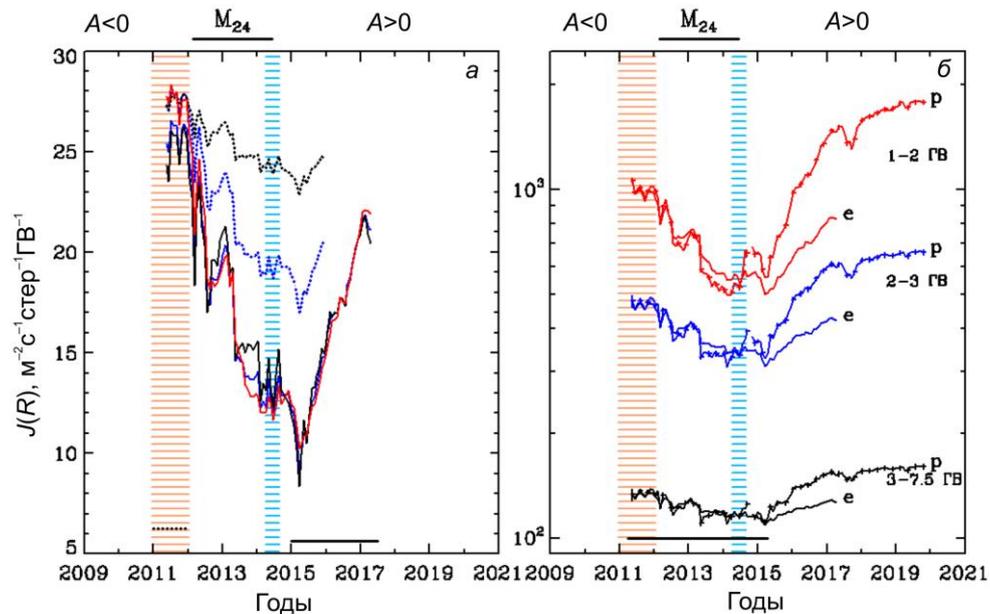


Рис. 8. Изменение энергетической и зарядовой зависимостей долговременных вариаций интенсивности ГКЛ в период инверсии ГМП в СЦ 24 в интенсивности протонов и электронов разных энергий по данным AMS-02. Обозначения те же, что на рис. 7. Панель *a* — то же, что на рис. 7, *b*, но для электронов. Панель *b* — зарядовый гистерезис в период инверсии ГМП в СЦ 24. Красные, синие и черные линии с символами — интенсивности протонов в диапазонах жесткости 1–2, 2–3, 3–7.5 ГВ соответственно; линии того же цвета, но без символов — интенсивность электронов в тех же диапазонах жесткости, приведенная к интенсивности протонов линейной регрессией в интервал времени, показанный прямой у оси времени

ГМП вперед по времени и значительно хуже — при экстраполяции назад.

По данным AMS-02 [Aguilar et al., 2021] можно исследовать ЭГ для электронов, а также зависимость эффектов, связанных с инверсией ГМП, от знака заряда частиц. Для этого с рядами интенсивностей электронов в диапазонах жесткости 1–2, 2–3, 3–7.5 ГВ, усредненных за бартельсовские обороты за 05.2011–2017 гг., была проведена процедура, описанная выше для анализа ЭГ по данным РБМ и НМ «Москва», а также по интенсивности протонов PAMELA и AMS-02. Коэффициенты корреляции между интенсивностями электронов низкой и более высоких жесткостей по основному периоду регрессии ( $N=31$ )  $\rho=0.993\pm 0.002$ ,  $0.981\pm 0.007$ , а по короткому вспомогательному ( $N=9$ ) —  $\rho=0.8\pm 0.1$ ,  $0.5\pm 0.3$ . По данным электронов ЭГ показан на рис. 8, *a*. Так же как для протонов, в данных по электронам AMS-02 изменение энергетической зависимости долговременных вариаций интенсивности ГКЛ хорошо видно при экстраполяции приведенных интенсивностей на период инверсии ГМП вперед по времени и значительно хуже — при экстраполяции назад.

На рис. 8, *b* интенсивности протонов по данным AMS-02 [Aguilar et al., 2021] в диапазонах жесткости 1–2, 2–3, 3–7.5 ГВ, усредненным за бартельсовские обороты в 05.2011–2019 гг., сравниваются с интенсивностями электронов [Aguilar et al., 2018] в тех же диапазонах за 05.2011–2017 гг. после приведения их к протонным интенсивностям за период, близкий к периоду инверсии ГМП ( $N=53$ ). Коэффициенты корреляции  $\rho=0.95\pm 0.01$ ,  $0.93\pm 0.02$ ,  $0.90\pm 0.03$ . Видно, что после завершения инверсии ГМП в 2015–

2016 гг. интенсивность протонов восстанавливается со скоростью, намного большей, чем приведенная интенсивность электронов. Эффект существенно разных скоростей восстановления интенсивности протонов и приведенной интенсивности электронов для всех рассмотренных диапазонов жесткости мы называем зарядовой зависимостью долговременных вариаций интенсивности ГКЛ после периода инверсии ГМП и рассматриваем как третий эффект в поведении интенсивности ГКЛ, связанный с инверсией ГМП.

В поведении интенсивности ГКЛ по данным РБМ и НМ (см. рис. 1, *d*; 2–5) в большинстве периодов инверсии ГМП можно усмотреть значительные вариации примерно в противофазе с вариациями площади солнечных пятен и напряженности ГМП, заметных на рис. 1, *a*, *z*. В данных PAMELA и AMS-02 (см. рис. 6–8) тоже заметны сильные вариации интенсивности как протонов, так и электронов в период инверсии ГМП в СЦ 24. В работах [Astaf'eva et al., 1997; Bazilevskaya et al., 1998; Storini et al., 2003] мы связали эти вариации с так называемым эффектом Гневышева, отмеченным впервые как резкое ослабление солнечной активности и характеристик вспышек солнечных космических лучей в эпохи максимума СЦ [Gnevyshev, 1967]. В результате в указанных характеристиках наблюдаются два пика с провалом между ними. Соответственно в интенсивности ГКЛ образуются два провала с пиком между ними. Отметим, что в интенсивности ГКЛ эффект Гневышева наблюдается не только в долговременных, но и более короткопериодических вариациях (в вариациях ото дня ко дню, в 27-дневных вариациях)

[Bazilevskaya et al., 1998]. В ряде работ [Krainev et al., 1999, 2015] мы предположили, что этот эффект обусловлен инверсией ГМП в этот период, и рассматриваем эффект Гневывшева как четвертый эффект в поведении интенсивности ГКЛ, связанный с инверсией ГМП.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

С 1970-х гг. исследованию 22-летних эффектов в интенсивности ГКЛ посвящено много как наблюдательных, так и теоретических и расчетных работ (см. [Potgieter, 2013] и ссылки в ней), но в основном внимание уделялось периодам средней и низкой пятенной активности Солнца. Очевидно, предполагалось, что в эти периоды 22-летние эффекты в интенсивности ГКЛ должны быть максимальны, а в периоды максимума пятенной активности Солнца с наиболее сильным и возмущенным ГМП изменение полярности его регулярной составляющей в течение короткой фазы собственно инверсии ГМП (порядка года) не должно играть большой роли в долговременных вариациях интенсивности ГКЛ.

В данной статье мы, во-первых, расширяем интервал времени, в котором изучаются явления в интенсивности ГКЛ, связанные с инверсией ГМП. Как ясно из предыдущего раздела, первый и третий эффекты в интенсивности ГКЛ, которые мы связываем с инверсией ГМП, касаются темпа восстановления интенсивности в течение примерно двухлетнего периода после окончания последней фазы инверсии ГМП. Первый эффект состоит в зависимости темпа восстановления интенсивности в этот период для частиц одного и того же знака заряда от типа инверсии ГМП ( $dA/dt > 0$  или  $dA/dt < 0$ ). Напротив, третий эффект состоит в зависимости темпа восстановления интенсивности в тот же период после окончания инверсии ГМП для инверсии ГМП одного и того же типа от знака заряда частиц. Напомним, что, хотя этот двухлетний период находится вне всех трех фаз инверсии ГМП, он принадлежит интервалу СЦ с высокой степенью изогнутости ГТС (квазитилт  $\alpha_{qt} > 30^\circ$ ), когда, согласно результатам моделирования интенсивности ГКЛ, влияние факторов 22-летней цикличности (прежде всего магнитного дрейфа частиц) малы по сравнению с диффузией [Potgieter, 2013]. Как уже говорилось, мы считаем, что на гелиосферные процессы, в том числе на модуляцию интенсивности ГКЛ, в этот интервал времени влияет не столько степень изогнутости ГТС, сколько детали процесса инверсии ГМП. В то же время ясно, что для понимания поведения интенсивности ГКЛ в СЦ явления в обсуждаемый интервал времени важны. Например, когда при обсуждении формы временного профиля интенсивности в зависимости от общей полярности ГМП  $A$  говорят об остроугольных и платообразных циклах, подразумевают только часть циклов вокруг эпохи минимума СЦ. В целом же для частиц с зарядом  $q$  в периоды  $qA > 0$  платообразному участку временного профиля, когда интенсивность ГКЛ слабо меняется со временем, предшествует

интервал очень быстрого роста интенсивности, а в периоды  $qA < 0$  остроугольному участку временного профиля, когда интенсивность ГКЛ растет до максимальных значений, предшествует интервал с примерно таким же темпом роста интенсивности. В обоих случаях поведение интенсивности в эти периоды сравнительно высокой активности Солнца и степени изогнутости ГТС ( $\alpha_{qt} > 30^\circ$ ) обусловлено процессами, которые мы связываем с прошедшей инверсией ГМП.

Во-вторых, мы считаем, что, хотя в периоды максимума пятенной активности Солнца и инверсии ГМП его напряженность в среднем существенно выше, чем в периоды минимума СЦ, топологически регулярное ГМП по-прежнему определяется полонидальными СМП и инверсия последних должна проявляться хотя бы в кратковременных понижениях напряженности ГМП. К этим проявлениям инверсии ГМП мы относим эффект Гневывшева в уровне пятенной активности Солнца и напряженности ГМП, заметный на рис. 1,  $a$  и  $z$ , и соответствующие вариации (примерно в противофазе с  $S_{ss}$  и  $B^{hmf}$ ) интенсивности ГКЛ, хорошо видные на рис. 1,  $d$ , а также в разных форматах на рис. 2–8. Эти вариации в интенсивности ГКЛ мы и относим к четвертому эффекту, связанному с инверсией ГМП. Наконец, обусловленные эффектом Гневывшева вариации напряженности ГМП должны приводить к вариациям кинетических характеристик — прежде всего, коэффициентов диффузии и скорости магнитного дрейфа частиц разных энергий, что должно проявляться в нарушении энергетических зависимостей долговременных вариаций интенсивности ГКЛ. Это явление мы обсуждали выше как резкое изменение энергетической зависимости долговременных вариаций интенсивности ГКЛ и рассматриваем его как второй эффект в интенсивности ГКЛ, связанный с инверсией ГМП.

Относительно сформулированных в предыдущем разделе эффектов в интенсивности ГКЛ, которые мы связываем с инверсией ГМП, прежде всего, отметим качественный характер формулировок. Количественные характеристики каждого из эффектов существенно меняются от цикла к циклу и зависят от выбранного для анализа ряда данных по интенсивности ГКЛ. Мы видим две основные причины такого положения. Прежде всего, циклы солнечной активности действительно сильно отличаются друг от друга. Вторая причина связана со свойствами имеющихся рядов данных. Из шести инверсий ГМП, произошедших за время систематического мониторинга ГКЛ, первые пять (в максимумах СЦ 19–23) наблюдались в основном в экспериментах на Земле по измерению интегрированной по энергии смеси первичных и вторичных частиц, генерированных в атмосфере ядерной компонентой ГКЛ, а также по измерениям вне Земли первичных ГКЛ в сравнительно узких диапазонах энергии значительно меньшей длительности. Во время последней инверсии ГМП (в максимуме СЦ 24, 2011–2014 гг.) благодаря экспериментам PAMELA и AMS-02 впервые появи-

лась возможность исследования поведения дифференциальной интенсивности частиц разного типа и заряда. Однако из-за неидеального расположения периодов наличия данных PAMELA и AMS-02 относительно периода инверсии ГМП связи между некоторыми характеристиками интенсивности приходится изучать по рядам небольшой длины. Но судить о значимости коэффициентов корреляции по их погрешности, вычисляемой как  $\delta\rho = (1 - \rho^2)/(N - 1)^{0.5}$ , при малой длине сравниваемых рядов (например,  $N = 9$  или  $N = 12$ ), затруднительно, и для выводов о достоверности обнаруженной корреляции между этими рядами требуется более строгий анализ (см. [Фишер, 1958]). Если благодаря AMS-02 возможность исследования поведения дифференциальной интенсивности частиц разного типа и заряда сохранится на ближайшие 2–3 года, то уже для текущего периода инверсии ГМП в СЦ 25, начавшегося в конце 2022 г., можно надеяться на детализацию и, возможно, коррекцию сформулированных эффектов.

Из-за сложности связей в системе Солнце — гелиосфера — ГКЛ по вопросу, чем обусловлены некоторые эффекты в интенсивности ГКЛ, которые мы относим к инверсии ГМП, даже среди авторов данной статьи нет полного согласия. В разделе 2 первый эффект в поведении интенсивности ГКЛ в период инверсии ГМП формулируется как существенная разница в темпе восстановления интенсивности после инверсий ГМП с  $dA/dt > 0$  и  $dA/dt < 0$ . Однако сам факт хорошего описания временного профиля интенсивности протонов ГКЛ выражениями (1), (2) в периоды  $A < 0$  (обычно этот остроугольный профиль связывают с зависимостью интенсивности от степени изогнутости ГТС  $\alpha_{qt}$  [Jokipii, Thomas, 1981]) может быть обусловлен зависимостью  $\alpha_{qt}$  от уровня пятенной активности и широты солнечных пятен (см. [Bazilevskaya et al., 1995]). Более того, мы предполагаем, что указанная разница в темпе восстановления интенсивности после инверсии ГМП в последовательных циклах обусловлена известными и обычно привлекаемыми к анализу механизмами (в первую очередь, магнитным дрейфом частиц) и зависимость темпа восстановления от знака заряда частиц (третий эффект в нашем списке) вроде бы подтверждает это. Однако более пятидесяти лет существует точка зрения, что от общей полярности ГМП зависит режим пересоединения между гелиосферным и галактическим полем, который может дополнительно влиять на темп восстановления интенсивности после инверсии ГМП [Schatten, Wilcox, 1969; Nagashima, 1977; Stozhkov et al., 2022]. Наконец, хотя в разделе 2 мы связываем эффект Гневьшева в интенсивности ГКЛ (четвертый эффект в нашем списке) с инверсией ГМП, анализ различных солнечных, гелиосферных и геофизических данных наводит на мысль, что эффект Гневьшева, возможно, является проявлением в солнечной активности квазидвухлетней вариации [Vecchio et al., 2010; Bazilevskaya et al., 2015; Adriani et al., 2018]. Отметим также, что вариации интенсивности ГКЛ типа квазидвухлетних или эффект Гневьшева иногда связывают с глобальными вариациями в напряженности ГМП [Cane et al., 1999], что

близко нашему пониманию эффекта Гневьшева, или с образованием на периферии гелиосферы барьеров с усиленным ГМП, образующихся при слиянии нескольких корональных выбросов массы [Potgieter, Le Roux, 1989].

Рассмотрение всех четырех эффектов, которые мы связываем с инверсией ГМП, позволяет объединить их в две пары. Первый и третий эффекты относятся к скорости восстановления интенсивности после периода инверсии в максимуме СЦ, причем первый эффект можно сформулировать как зависимость этой скорости от знака общей полярности ГМП  $A$  в период после инверсии (или от знака  $dA/dt$  для инверсии ГМП) для частиц с одним и тем же знаком заряда частиц, а второй — как зависимость скорости восстановления интенсивности от знака заряда частиц для одного и того же знака  $dA/dt$  для инверсии ГМП. По крайней мере, качественно два этих эффекта можно сформулировать как зависимость скорости восстановления интенсивности после инверсии ГМП от знака  $qA$  в период после инверсии ГМП или знака  $qdA/dt$  для инверсии ГМП. Заметим, однако, что пока зависимость скорости восстановления интенсивности после максимума СЦ и инверсии ГМП от знака заряда частиц надежно наблюдалась лишь для СЦ 24. Поэтому желательно проверить эту закономерность на поведении частиц с разным знаком заряда, регистрируемых, например, с хорошей статистической точностью в эксперименте AMS-02, в период, включающий инверсию СЦ 25 и два года после нее.

Второй и четвертый эффекты, которые мы связываем с инверсией ГМП, относятся к самому периоду инверсии ГМП, и резкое изменение энергетической зависимости вариации интенсивности ГКЛ может быть связано с вариацией напряженности регулярного ГМП из-за эффекта Гневьшева в этой характеристике [Крайнев, 1983; Крайнев и др., 1984; Krainev et al., 1983a, b, 2015]. В пользу этого предположения говорит тот факт, что в первом приближении поведение интенсивности в этот период одинаково для протонов и электронов (см. рис. 6 и 8, б, а также [Burger, Swanenburg, 1973]). Отметим, однако, что статус этих двух обсуждаемых эффектов (резкое изменение энергетической зависимости вариации интенсивности ГКЛ и эффект Гневьшева в этой интенсивности) различен. Если эффект Гневьшева, т. е. значительные вариации интенсивности примерно в противофазе с вариациями в площади солнечных пятен и напряженности ГМП, наблюдается практически для всех рассмотренных выше периодов инверсии ГМП, то резкое изменение энергетической зависимости вариации интенсивности ГКЛ хорошо заметно лишь для периодов инверсии ГМП в СЦ 20 и в меньшей степени в СЦ 24.

Отметим, что такое представление эффектов в интенсивности ГКЛ, связанных с инверсией ГМП, согласуется со схемой двух последовательных явлений в ГКЛ в этот период, предложенной нами ранее [Крайнев, 1983; Крайнев и др., 1984; Krainev et al., 1983a, b; Krainev et al., 1985], когда систематических измерений интенсивности электронов (кроме при-

веденных в работе [Burger, Swanenburg, 1973]) еще не было. Мы предположили, что первое из этих явлений не зависит от типа инверсии ГМП и знака заряда частиц, а второе — зависит от знака  $dA/dt$ . Теперь, имея значительно более надежные данные по интенсивности электронов [Aguilar et al., 2018], можно сделать вывод, что второе явление зависит от знака  $qdA/dt$ . В работе [Krainev et al., 2015] первое явление было связано с эффектом Гневышева, при этом было отмечено, что в обоих явлениях наблюдается 22-летняя периодичность, т. е. они хорошо проявляются в периоды инверсии ГМП с  $dA/dt > 0$ , т. е. в СЦ 20, 22, 24. Однако этот вывод был сделан при экстраполяции на период инверсии ГМП регрессионной связи между скоростями счета по данным РБМ и НМ «Москва», определенной на узком интервале регрессии (1–2 года). Пока неясно, почему при определении этой регрессионной связи на всем интервале между последовательными инверсиями ГМП, как было сделано в разделе 2, весь комплекс этих явлений явно проявляется лишь в первой и последней инверсиях ГМП (в СЦ 20 и 24).

Детализация поведения интенсивности ГКЛ в периоды инверсии пяти последних циклов с выделением отдельных эффектов, результаты которой описаны в данной статье, существенно отличается от подходов, используемых другими исследователями (см., например, [Aslam et al., 2023]). Возможно, это обусловлено именно нашим интересом к этой особой фазе СЦ с самого обнаружения первого проявления 22-летней цикличности Солнца в интенсивности ГКЛ пятьдесят лет назад [Charakhchyan et al., 1973].

Авторы благодарны всем командам исследователей, представляющим свои результаты в сети Интернет. Полезным и интересным было обсуждение с Ю.И. Стожковым, одним из основных авторов первого обнаружения 22-летних эффектов в интенсивности ГКЛ. Михайлов В.В. благодарит за поддержку Министерство науки и высшего образования РФ (государственное задание, проект «Фундаментальные и прикладные исследования космических лучей», № FSWU-2023-0068).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Крайнев М.Б. Влияние общего магнитного поля Солнца на 11-летний цикл и «аномальные» явления в галактических космических лучах. *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1983. Т. 47, № 9. С. 1754–1760.

Крайнев М.Б. Проявления в гелиосфере и в интенсивности ГКЛ двух ветвей солнечной активности. *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 5, № 4. С. 12–25. DOI: [10.12737/szf-54201902](https://doi.org/10.12737/szf-54201902).

Крайнев М.Б., Стожков Ю.И., Чарахчян Т.Н. Галактические космические лучи в периоды инверсии общего магнитного поля Солнца. *Известия АН СССР. Сер. физ.* 1984. Т. 48, № 11. С. 2100–2102.

Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1964. Т. 4, С. 977–986.

Стожков Ю.И., Чарахчян Т.Н. 11-летняя модуляция интенсивности космических лучей и гелиоширотное рас-

пределение пятен. *Геомагнетизм и аэрономия.* 1969. Т. 9, № 5. С. 803–808.

Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Базилевская Г.А. и др. Потоки космических лучей в максимуме кривой поглощения в атмосфере и на границе атмосферы (1957–2007). *Препринт ФИАН.* 2007. № 14. 77 с.

Фишер Р.А. *Статистические методы для исследователей.* М.: Госстатиздат, 1958. 267 с.

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., et al. (PAMELA collaboration). Time dependence of the proton flux measured by PAMELA during the 2006 July–2009 December solar minimum. *Astrophys. J.* 2013. Vol. 765, no. 2. P. 91. DOI: [10.1088/0004-637X/765/2/91](https://doi.org/10.1088/0004-637X/765/2/91).

Adriani O., Barbarino G.C., Bazilevskaya G.A., et al. (PAMELA collaboration). Unexpected cyclic behavior in cosmic-ray protons observed by PAMELA at 1 a.u. *Astrophys. J. Lett.* 2018. Vol. 852, no.2. P. L28. DOI: [10.3847/2041-8213/aaa403](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa403).

Aguilar M., et al. (AMS Collaboration). Observation of complex time structures in the cosmic-ray electron and positron fluxes with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Phys. Rev. Lett.* 2018. Vol. 121. 051102.

Aguilar M., et al. (AMS Collaboration). Periodicities in the daily proton fluxes from 2011 to 2019 measured by the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station from 1 to 100 GV. *Phys. Rev. Lett.* 2021. Vol. 127. 271102. DOI: [10.1103/PhysRevLett.127.271102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.271102).

Ahluwalia H.S. Eleven year variation of cosmic ray intensity and solar polar field reversals. *Proceedings of 16<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1979. Vol. 12. P. 182–186.

Altschuler M.D., Newkirk G., Jr. Magnetic fields and the structure of the solar corona. I. Methods of calculating coronal fields. *Solar Phys.* 1969. Vol. 9. P. 131–149. DOI: [10.1007/BF00145734](https://doi.org/10.1007/BF00145734).

Aslam O.P.M., Luo Xi, Potgieter M.S., et al. Unfolding drift effects for cosmic rays over the period of the Sun's magnetic field reversal. *Astrophys. J.* 2023. Vol. 947, iss. 2. Id. 72. 17 p. DOI: [10.3847/1538-4357/acc24a](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acc24a).

Astaf'eva N.M., Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Sladkova A.I. Depression in cosmic ray variations during the inversions of the polar magnetic field of the Sun. *Proc. 25<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1997. Vol. 7. P. 337–340.

Babcock H.D. The Sun's polar magnetic field. *Astrophys. J.* 1959. Vol. 130. P. 364–365. DOI: [10.1086/146726](https://doi.org/10.1086/146726).

Babcock H.W. The topology of the Sun's magnetic field and the 22-year cycle. *Astrophys. J.* 1961. Vol. 133. P.572. DOI: [10.1086/147060](https://doi.org/10.1086/147060).

Bazilevskaya G.A., Svirzhevskaya A.K. On the stratospheric measurements of cosmic rays. *Space Sci. Rev.* 1998. Vol. 85. P. 431–521.

Bazilevskaya G.A., Krainev M.B., Makhmutov V.S., et al. The relationship between the galactic cosmic ray intensity and the sunspot distribution. *Adv. Space Res.* 1995. Vol. 16, no. 9. P. (9)221–(9)225. DOI: [10.1016/0273-1177\(95\)00339-G](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00339-G).

Bazilevskaya G., Krainev M., Makhmutov V., et al. The Gnevyshev gap in cosmic ray physics. *Proc. 16<sup>th</sup> European Cosmic Ray Symposium.* 1998. P. 83–86.

Bazilevskaya G., Broomhall A.-M., Elsworth Y., Nakariakov V.M. A combined analysis of the observational aspects of the quasi-biennial oscillation in solar magnetic activity. *Space Sci. Ser. ISSI.* 2015. Vol. 53. P. 359. DOI: [10.1007/978-1-4939-2584-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2584-1_12).

Bieber J.W., Evenson P.A., Matthaeus W.H. The nuts and bolts of cosmic ray modulation. *Proc. the 20<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1987. Vol. 3. P. 175.

Burger J.J., Swanenburg B.N. Energy dependent time lag in the long-term modulation of cosmic rays. *J. Geophys. Res.* 1973. Vol. 78, iss. 1. P. 292. DOI: [10.1029/JA078i001p00292](https://doi.org/10.1029/JA078i001p00292).

- Burton M.E., Crooker N.U., Siscoe G.L., Smith E.J. A test of source-surface models predictions of heliospheric current sheet inclination. *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99, iss. A1. P. 1–10. DOI: [10.1029/93JA02100](https://doi.org/10.1029/93JA02100).
- Cane H.V., Wibberenz G., Richardson I.G. von Rosenvinge T.T. Cosmic ray modulation and the solar magnetic field. *Geophys. Res. Lett.* 1999. Vol. 26. P. 565–568. DOI: [10.1029/1999GL900032](https://doi.org/10.1029/1999GL900032).
- Charakhchyan A.N., Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Charakhchyan T.N. Anomalous effect in the 11-year galactic cosmic ray modulation. *Proc. the 13<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1973. Vol. 2. P. 1159–1164.
- Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle. *Living Reviews Solar Physics.* 2010. Vol. 7. P. 3. DOI: [10.1007/s41116-020-00025-6](https://doi.org/10.1007/s41116-020-00025-6).
- Evenson P., Garcia-Munoz M., Meyer P., et al. A quantitative test of solar modulation theory: The proton, helium and electron spectra from 1965 through 1979. *Astrophys. J. Lett.* 1983. Vol. 275. P. L15. DOI: [10.1086/184162](https://doi.org/10.1086/184162).
- Forbush S.E. World-wide changes in cosmic-ray intensity. *Reviews of Modern Physics.* 1939. Vol. 11, iss. 3-4. P. 168–172. DOI: [10.1103/RevModPhys.11.168](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.11.168).
- Forbush S.E. World-wide cosmic-ray variations, 1937–1952. *J. Geophys. Res.* 1954. Vol. 59, iss. 4. P. 525–542. DOI: [10.1029/JZ059i004p00525](https://doi.org/10.1029/JZ059i004p00525).
- Forbush S.E. Variation with a period of two solar cycles in the cosmic-ray diurnal anisotropy and the superposed variations correlated with magnetic activity. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, iss. 14. P. 3451. DOI: [10.1029/JA074i014p03451](https://doi.org/10.1029/JA074i014p03451).
- Garcia-Munoz M., Meyer P., Pyle K.R., et al. The dependence of solar modulation on the sign of the cosmic ray particle charge. *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, no. A3. P. 2858–2866. DOI: [10.1029/JA091iA03p02858](https://doi.org/10.1029/JA091iA03p02858).
- Gnevyshev M.N. On the 11-year cycle of solar activity. *Solar Phys.* 1967. Vol. 1. P. 107–120. DOI: [10.1007/BF00150306](https://doi.org/10.1007/BF00150306).
- Hale G.E. On the probable existence of a magnetic field in sunspots. *Astrophys. J.* 1908. Vol. 28. P. 3015–343.
- Hale G.E. Preliminary results of an attempt to detect the general magnetic field of the Sun. *Astrophys. J.* 1913. Vol. 38. P. 27–98.
- Hale G.E., Ellerman F., Nicholson S.B., Joy A.H. The magnetic polarity of the sunspots. *Astrophys. J.* 1919. Vol. 49. P. 153–178.
- Howard R. Studies of solar magnetic fields. I. The average field strength's. *Solar Phys.* 1974. Vol. 38. P. 283–299. DOI: [10.1007/BF00155067](https://doi.org/10.1007/BF00155067).
- Jokipii J.R., Levy E.H. Electric field effects on galactic cosmic rays at the heliospheric boundary. *Proc. 16<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1979. Vol. 3. P. 52–56.
- Jokipii J.R., Thomas B. Effect of drift on the transport of cosmic rays. IV. Modulation by a wavy interplanetary current sheet. *Astrophys. J.* 1981. Vol. 243. P. 1115–1122. DOI: [10.1086/158675](https://doi.org/10.1086/158675).
- 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. Vol. 213. P. 861–868. DOI: [10.1086/155218](https://doi.org/10.1086/155218).
- Kraiev M.B. The solar corona expansion geometry and cosmic ray effects. IV. On the cosmic ray energy change due to the electric field. *Proc. 16<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1979. Vol. 3. P. 236–241.
- Kraiev M.B., Kalinin M.S. On the GCR intensity and the inversion of the heliospheric magnetic field during the periods of the high solar activity. *Proceedings of 33<sup>rd</sup> International Cosmic Ray Conference.* 2014, icrc2013-0317/1-4, ArXiv:1411.7532 [astro-ph.SR].
- Kraiev M.B., Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N. On the energetic “hysteresis” in the galactic cosmic ray intensity. *Proc. 18<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1983a. Vol. 3. P. 23–26.
- Kraiev M.B., Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N. On the “anomalous” phenomena in the galactic cosmic ray intensity in the periods of the inversion of general magnetic field of the Sun. *Proc. 18<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1983b. Vol. 3. P. 95–98.
- Kraiev M.B., Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N. On the influence of the heliomagnetospheric periphery on the galactic cosmic rays. *Proc. 19<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1985. Vol. 4. P. 481–484.
- Kraiev M.B., Storini M., Bazilevskaya G.A., et al. The Gnevyshev gap effect in galactic cosmic rays. *Proc. 26<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1999. Vol. 7. P. 155–158.
- Kraiev M., Bazilevskaya G., Kalinin M., et al. GCR intensity during the sunspot maximum phase and the inversion of the heliospheric magnetic field. *Proc. Science.* 2015. PoS (ICRC2015) 081/1-8.
- Lockwood J.A., Leznyak J.A., Webber W.R. Change in the eleven-year modulation at the time of the June 8, 1969, Forbush decrease. *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77, iss. 25. P. 4839. DOI: [10.1029/JA077i025p04839](https://doi.org/10.1029/JA077i025p04839).
- Martucci M., Munini R., Boezio M., et al. (PAMELA collaboration). Proton fluxes measured by the PAMELA experiment from the minimum to the maximum solar activity for solar cycle 24. *Astrophys. J. Lett.* 2018. Vol. 854. P. L2. DOI: [10.3847/2041-8213/aaa9b2](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaa9b2).
- Nagashima K. Long term modulation of cosmic rays in helio-magnetosphere. *Proc. 15<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1977. Vol. 10. P. 380–396.
- Parker E.N. Cosmic ray modulation by solar wind. *Phys. Rev.* 1958. Vol. 110. P. 1445. DOI: [10.1103/PhysRev.110.1445](https://doi.org/10.1103/PhysRev.110.1445).
- Parker E.N. Interplanetary dynamical processes. 1963. New York. Interscience Publishers.
- Parker E.N. The passage of energetic charged particles through interplanetary space. *Planetary and Space Sci.* 1965. Vol. 13. P. 9–49. DOI: [10.1016/0032-0633\(65\)90131-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(65)90131-5).
- Potgieter M.S. Solar modulation of cosmic rays. *Living Reviews Solar Physics.* 2013. Vol. 10. P. 3. DOI: [10.12942/lrsp-2013-3](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-3).
- Potgieter M. S., Le Roux J.A. More on a possible modulation barrier in the outer heliosphere. *Adv. Space Res.* 1989. Vol. 91. P. 121. DOI: [10.1016/0273-1177\(89\)90318-9](https://doi.org/10.1016/0273-1177(89)90318-9).
- Schatten K.H., Wilcox J.M. Direction of the nearby galactic magnetic field inferred from a cosmic-ray diurnal anisotropy. *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, iss. 16. P. 4157. DOI: [10.1029/JA074i016p04157](https://doi.org/10.1029/JA074i016p04157).
- Schatten K.H., Wilcox J.M., Ness F.N. A model of interplanetary and coronal magnetic fields. *Solar Phys.* 1969. Vol. 6. P. 442–455.
- Sheeley N.R., Jr. Polar faculae during the interval 1906–1975. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81. P. 3462. DOI: [10.1029/JA081i019p03462](https://doi.org/10.1029/JA081i019p03462).
- Sheeley N.R., Jr. A century of polar faculae variations. *Astrophys. J.* 2008. Vol. 680. P. 1553–1559. DOI: [10.1086/588251](https://doi.org/10.1086/588251).
- Shulz M. Interplanetary sector structure and the heliomagnetic equator. *Astrophys. Space Sci.* 1973. Vol. 24. P. 371. DOI: [10.1007/BF02637162](https://doi.org/10.1007/BF02637162).
- Simpson J.A. The primary cosmic ray spectrum and the transition region between interplanetary and interstellar space. *Proc. 8<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1963. Vol. 2. P. 155.
- Simpson J.A. Cosmic ray astrophysics at Chicago (1947–1960). *Astrophys. Space Sci. Library.* 1985. Vol. 118. P. 385. DOI: [10.1007/978-94-009-5434-2\\_36](https://doi.org/10.1007/978-94-009-5434-2_36).
- Simpson J.A. The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor, cosmic rays and Earth. *Space Sci. Ser. ISSI.* 2000. Vol. 10. P. 11–32. DOI: [10.1007/978-94-017-1187-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-017-1187-6_2).
- Smith E.J. The heliospheric current sheet. *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106, iss. A8. P. 15819–15832. DOI: [10.1029/2000JA000120](https://doi.org/10.1029/2000JA000120).

М.Б. Крайнев, Г.А. Базилевская, М.С. Калинин,  
В.В. Михайлов, А.К. Свиржевская,  
Н.С. Свиржевский

M.B. Krainev, G.A. Bazilevskaya, M.S. Kalinin,  
V.V. Mikhailov, A.K. Svirzhevskaya,  
N.S. Svirzhevsky

Smith E.J. Solar cycle evolution of the heliospheric magnetic field: The Ulysses legacy. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73, iss. 2-3. P. 277–289. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.03.019](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.03.019).

Storini M., Bazilevskaya G.A., Fluckiger E.O., et al. The Gnevyshev gap: A review for space weather. *Adv. Space Res.* 2003. Vol. 31, no. 4. P. 895–900. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)00789-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00789-5).

Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N. On the role of the heliolatitudes of sunspots in the 11-year galactic cosmic ray modulation. *Acta Phys. Acad. Sci. Hungaricae.* 1970. Vol. 29. Suppl. 2. P. 301–304.

Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A., et al. Long-term (50 years) measurements of cosmic ray fluxes in the atmosphere. *Adv. Space Res.* 2009. Vol. 44. P. 1124–1137. DOI: [10.1016/j.asr.2008.10.038](https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.10.038).

Stozhkov Yu.I., Makhmutov V.S., Svirzhevsky N.S. About cosmic ray modulation in the heliosphere. *Universe.* 2022. Vol. 8, iss.11. P. 558. DOI: [10.3390/universe8110558](https://doi.org/10.3390/universe8110558).

Svirzhevskaya A.K., Stozhkov Yu.I., Charakhchyan T.N. Anomalous effect in the spectrum of cosmic ray variations in 1971–1973. *Proc. 14<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference.* 1975. Vol. 3. P. 985–989.

Vecchio A., Laurenza M., Carbone V., Storini M. Quasi-biennial modulation of solar neutrino flux and solar and galactic cosmic rays by solar cyclic activity. *Astrophys. J. Lett.* 2010. Vol. 709. P. L1–L5. DOI: [10.1088/2041-8205/709/1/L1](https://doi.org/10.1088/2041-8205/709/1/L1).

Zhao X., Hoeksema J.T. A coronal magnetic field model with horizontal volume and sheet currents. *Solar Phys.* 1994. Vol. 151. P. 91–104. DOI: [10.1007/BF00654084](https://doi.org/10.1007/BF00654084).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/forecasts/SRS> (дата обращения 14 октября 2023 г.).

URL: <http://wso.stanford.edu> (дата обращения 14 октября 2023 г.).

URL: <https://solarscience.msfc.nasa.gov> (дата обращения 14 октября 2023 г.).

URL: [ftp://omniweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low\\_res\\_omni](ftp://omniweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni) (дата обращения 14 октября 2023 г.).

URL: [https://sites.lebedev.ru/en/DNS\\_FIAN](https://sites.lebedev.ru/en/DNS_FIAN) (дата обращения 14 октября 2023 г.).

URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения 14 октября 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С., Михайлов В.В., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С. Пятьдесят лет исследования поведения интенсивности ГКЛ в периоды инверсии гелиосферного магнитного поля. I. Наблюдаемые эффекты. *Солнечно-земная физика.* 2023. Т. 9, № 4. С. 5–20. DOI: [10.12737/szf-94202301](https://doi.org/10.12737/szf-94202301).