

ЭФФЕКТ ГИСТЕРЕЗИСА МЕЖДУ ИНДЕКСАМИ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ (A_p , Dst) И ПАРАМЕТРАМИ МЕЖПЛАНЕТНОЙ СРЕДЫ В 21–24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

HYSTERESIS EFFECT BETWEEN GEOMAGNETIC ACTIVITY INDICES (A_p , Dst) AND INTERPLANETARY MEDIUM PARAMETERS IN SOLAR ACTIVITY CYCLES 21–24

Н.А. Куражковская

Геофизическая обсерватория «Борок»,
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Борок, Россия, knady@borok.yar.ru

А.Ю. Куражковский

Геофизическая обсерватория «Борок»,
филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Борок, Россия, ksasha@borok.yar.ru

N.A. Kurazhkovskaya

Borok Geophysical Observatory,
the Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS,
Borok, Russia, knady@borok.yar.ru

A.Yu. Kurazhkovskii

Borok Geophysical Observatory,
the Branch of Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS
Borok, Russia, ksasha@borok.yar.ru

Аннотация. Исследована связь индексов геомагнитной активности A_p и Dst на интервалах времени, равных солнечным циклам (~11 лет), с индикаторами солнечной активности и параметрами гелиосферы. Показано, что кривые зависимости A_p и Dst от индикаторов солнечной активности, а также от параметров гелиосферы, т. е. параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, на восходящей и нисходящей ветвях 21–24-го циклов солнечной активности не совпадают, что является признаком гистерезиса. Индексы A_p и Dst формируют петли гистерезиса со всеми анализируемыми параметрами в 21–24-м циклах. Форма и площадь петель гистерезиса, а также направление вращения в них по часовой стрелке или против часовой стрелки существенно зависят от индикаторов солнечной активности, гелиосферных параметров и изменяются от цикла к циклу. Обнаружена тенденция уменьшения протяженности и площади петель гистерезиса от 21-го к 24-му циклу. Анализ изменчивости формы и размера петель гистерезиса, образуемых индексами A_p и Dst с индикаторами солнечной активности и параметрами гелиосферы, дает основания полагать, что петли отражают долговременную эволюцию потока энергии солнечного ветра, определяющего глобальную геомагнитную активность и интенсивность магнитосферного кольцевого тока на восходящей и нисходящей ветвях 21–24-го циклов солнечной активности.

Ключевые слова: геомагнитная активность, солнечный ветер, циклы солнечной активности, параметры гелиосферы, гистерезис.

Abstract. We have studied the relationship of geomagnetic activity indices (A_p , Dst) on time intervals, equal to solar cycles (~11 years), with solar activity indicators and heliospheric parameters. It is shown that the plots of the A_p and Dst indices versus solar activity indicators, as well as versus heliospheric parameters, i.e. solar wind and IMF parameters in the ascending and descending phases of solar activity cycles 21–24 do not coincide, which is indicative of the hysteresis phenomenon. The A_p and Dst indices form hysteresis loops with all parameters we analyze during cycles 21–24. The shape and area of the hysteresis loops, as well as the direction of rotation, clockwise or counterclockwise, depend significantly on indicators of solar activity, heliospheric parameters and change from cycle to cycle. We have found a tendency for the extension and area of the hysteresis loops to decrease from cycle 21 to cycle 24. Analysis of the variability in the shape and size of the hysteresis loops formed by the A_p and Dst indices with solar indicators and heliospheric parameters gives reason to believe that the obtained loops reflect the long-term evolution of the solar wind energy flux, which determines global geomagnetic activity and the magnetospheric ring current intensity in the ascending and descending phases of solar activity cycles 21–24.

Keywords: geomagnetic activity, solar wind, solar activity cycles, heliospheric parameters, hysteresis.

ВВЕДЕНИЕ

Во многих исследованиях, например [Donnelly, 1991; Bachmann, White, 1994; Özgüç et al., 2012; Бруевич и др., 2018], было отмечено, что динамика ряда параметров солнечной активности различна на восходящей и нисходящей ветвях солнечного цикла. Иными

словами, траектория изменения одного параметра солнечной активности в зависимости от другого демонстрирует подобие явлению гистерезиса в течение солнечного цикла. Наиболее часто в публикациях попарно рассматриваются зависимости между такими индикаторами солнечной активности, как

число солнечных пятен, поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, индекс солнечных вспышек, максимальная скорость корональных выбросов и т.п. В качестве примера приведем работы [Bachmann, White, 1994; Özgüç et al., 2000, 2012; Бруевич и др., 2018], в которых обнаружен эффект гистерезиса между числом солнечных пятен и другими индикаторами солнечной активности. Как утверждается в работе [Bachmann, White, 1994], гистерезис — это реальное явление, а не результат инструментальных эффектов и оценок временных сдвигов между индексами солнечной активности и числом солнечных пятен.

Явление гистерезиса характерно не только для солнечных индикаторов, но и для параметров гелиосферы, индексов ионосферной активности, а также для интенсивности космических лучей. Например, эффект гистерезиса между индексами ионосферной и солнечной активности исследован в работах [Kane, 1992; Ortiz de Adler, Elias, 2008; Вруевич et al., 2016; Деминов и др., 2020]. Феномен гистерезиса между интенсивностью космических лучей и числом солнечных пятен, а также индексом солнечных вспышек проанализирован в работах [Mavromichalaki et al., 1998; Kane, 2003; Özgüç, Ataç, 2003; Singha et al., 2008] и многих других. В исследованиях последних десятилетий [Dmitriev et al., 2002; Özgüç et al., 2016; Reda et al., 2023] обнаружен гистерезисный цикл параметров солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП): плотности N , скорости V , динамического давления P_{dyn} СВ, напряженности B ММП с числами Вольфа и другими показателями солнечной активности.

Для характеристики геомагнитной активности применяются различные геомагнитные индексы. Наиболее часто используются индексы A_p и Dst , которые отражают глобальную магнитную возмущенность на всей Земле и интенсивность магнитосферного кольцевого тока во время развития геомагнитных бурь. Корреляционные связи A_p - и Dst -индексов с солнечной активностью, параметрами СВ и ММП исследованы в многочисленных работах, например [Ahluwalia, 2000; Papitashvili et al., 2000; Verbanac et al., 2011; Kilcik et al., 2017; Samsonov et al., 2019]. В этих и других работах приводятся коэффициенты корреляции между геомагнитными индексами и параметрами гелиосферы, оцениваются временные сдвиги между различными параметрами. Вместе с тем количество публикаций об эффекте гистерезиса между геомагнитными индексами и индикаторами солнечной активности весьма ограничено. Можно указать на работу [Özgüç et al., 2016], в которой выявлен эффект гистерезиса геомагнитных индексов A_p и Dst с индексом максимальной скорости корональных выбросов только в 23-м цикле и на фазе подъема 24-го цикла. Авторы работы [Вруевич et al., 2016] кратко упоминают о гистерезисе между A_p -индексом и потоком солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в 21-м цикле солнечной активности. Судя по доступной нам литературе, вопрос о том, носит ли связь между геомагнитной активностью и индикаторами солнечной активности

в других солнечных циклах характер гистерезиса, остается открытым. Кроме того, представляется интересным выяснить, формируют ли A_p - и Dst -индексы петли гистерезиса с параметрами межпланетной среды в последних четырех солнечных циклах, для которых имеются наиболее полные данные спутниковых наблюдений.

В настоящей работе предпринята попытка обнаружить феномен гистерезиса геомагнитных индексов (A_p и Dst) с солнечными индикаторами, параметрами СВ и ММП в 21–24-м циклах солнечной активности, а также исследовать особенности эффекта гистерезиса в различных солнечных циклах.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В качестве исходных данных использовались 27-дневные средние значения чисел Вольфа W , потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см $F10.7$, геомагнитных индексов A_p и Dst , параметров СВ и ММП за период с 1976 по 2019 г. из базы данных OMNI [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/]. Рассматривались следующие ключевые параметры СВ и ММП, а также их комбинации: скорость V , плотность протонов N , напряженность ММП B , B_z -компонента ММП, температура протонов T , динамическое давление P_{dyn} и параметр β СВ, в тех определениях, которые даются им на сайте OMNI [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html/], E_y -компонента электрического поля СВ: $E_y = -VB_z$, соотношение концентраций ионов гелия и протонов N_α/N_p . Кроме того, использовались среднегодовые значения этих параметров из базы данных OMNI.

Анализируемый интервал охватывал четыре солнечных цикла — с 21-го по 24-й. Информация о времени начала, максимума и минимума циклов солнечной активности взята из работы [Ishkov, 2013]. В работе попарно анализировались зависимости A_p и Dst от солнечных индикаторов и параметров гелиосферы на интервалах времени, равных солнечным циклам.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Циклическая вариация солнечной активности, параметров гелиосферы и геомагнитной активности

При анализе долговременных вариаций индексов солнечной и геомагнитной активности, а также параметров плазмы СВ и ММП обычно используют их среднегодовые значения. Прежде чем исследовать связь индексов геомагнитной активности с солнечной активностью и гелиосферными параметрами в отдельном солнечном цикле, рассмотрим вариацию их среднегодовых значений в течение последних четырех солнечных циклов.

На рис. 1, *a*, *б* приведена динамика среднегодовых значений анализируемых индексов солнечной активности, параметров межпланетной среды и геомагнитных индексов в 21–24-м циклах солнечной активности. В основном качественное поведение циклических вариаций параметров СВ и ММП одинаково

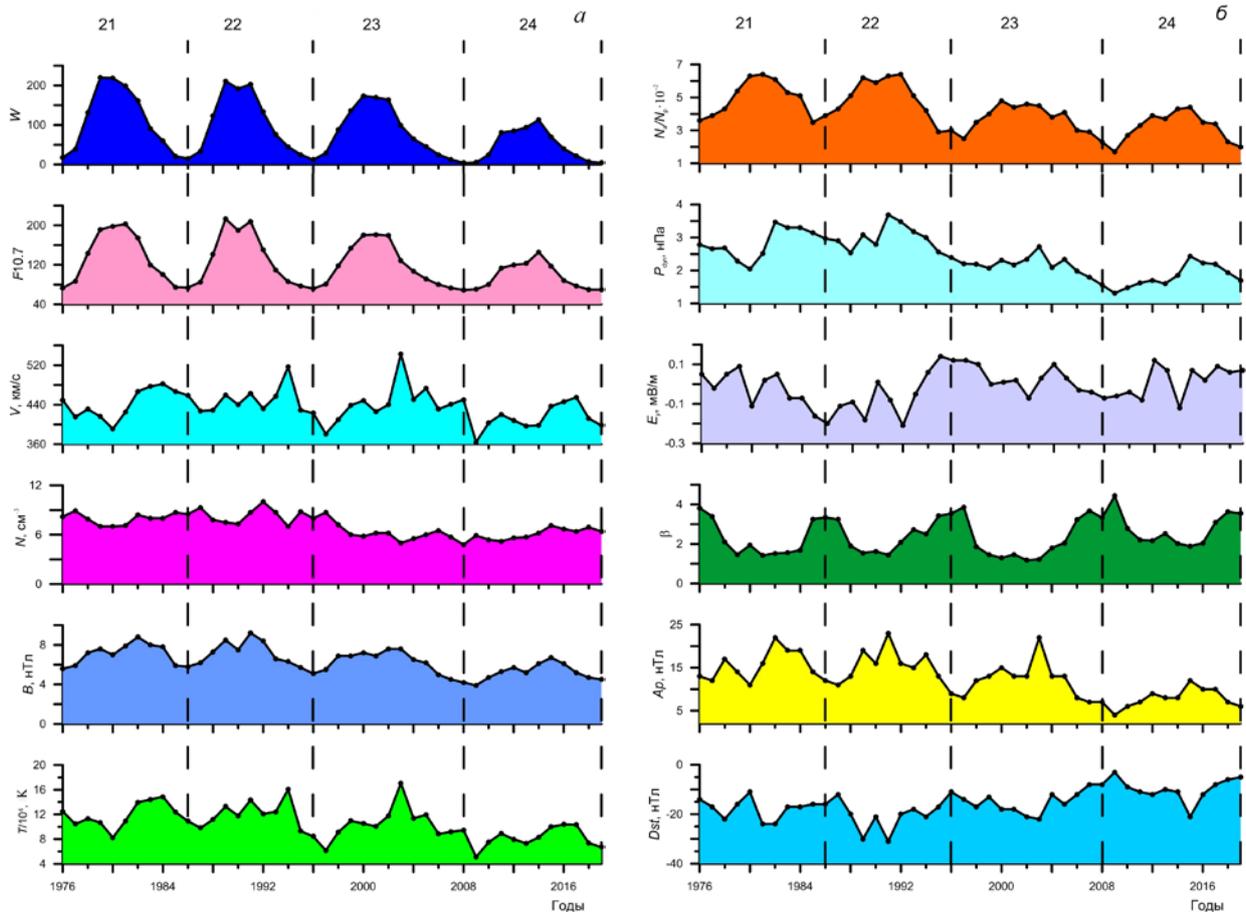


Рис. 1. Динамика среднегодовых индексов солнечной активности, параметров межпланетной среды и геомагнитных индексов в 21–24-м циклах солнечной активности (сверху вниз): *a* — чисел Вольфа W , потока солнечного радиоизлучения на длине волн 10.7 см $F_{10.7}$, скорости СВ V , плотности СВ N , модуля напряженности ММП $|B|$, температуры T ; *б* — соотношения концентраций ионов гелия и протонов N_{α}/N_p , динамического давления СВ P_{dyn} , электрического поля СВ E_y , параметра β СВ, A_p - и Dst -индексов геомагнитной активности

в 21–24-м циклах, хотя циклы различаются по продолжительности и максимальной амплитуде. Так, вариация потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ подобна циклической вариации числа солнечных пятен. Величина $F_{10.7}$ строго следует за циклом солнечной активности на всех его фазах.

Среднегодовая скорость СВ V максимальна на фазе спада солнечной активности, когда вероятность наблюдения высокоскоростных потоков из корональных дыр на Солнце наиболее высока [Ноларра et al., 2014]. На фазу роста всех солнечных циклов приходятся минимальные среднегодовые значения V . Аналогичная циклическая вариация характерна и для температуры протонов T . В отличие от динамики V и T в динамике плотности протонов N прослеживаются два небольших максимума на фазах роста и спада солнечной активности. Минимальные значения N наблюдаются в максимуме и минимуме солнечной активности.

Долговременные вариации напряженности ММП B (см. рис. 1, *a*) и соотношение концентраций ионов гелия и протонов N_{α}/N_p (см. рис. 1, *б*) изменяются в фазе с циклами солнечной активности. Видно, что в течение каждого солнечного цикла значения B и N_{α}/N_p увеличиваются и уменьшаются на фазах

роста и спада солнечной активности соответственно. Максимальные и минимальные значения B и N_{α}/N_p совпадают с годами максимумов и минимумов солнечной активности. Наименьшие среднегодовые значения динамического давления P_{dyn} , так же как и скорости V , наблюдаются на фазе роста солнечных циклов. На фазе максимума солнечной активности P_{dyn} достигает наибольших значений. Для фазы спада солнечной активности характерна тенденция снижения P_{dyn} . Изменения усредненных значений E_y -компоненты электрического поля СВ существенно различаются в течение одних и тех же фаз солнечных циклов. Например, на фазе спада 21-го цикла E_y уменьшается, тогда как на фазе спада 22-го цикла, наоборот, увеличивается. На рис. 1 не приведено поведение B_z -компоненты ММП, поскольку его зеркально отражает вариация E_y -компоненты. Долговременные изменения параметра β противофазны солнечным циклам: β достигает наибольших и наименьших значений в годы минимума и максимума солнечной активности соответственно.

Геомагнитные индексы A_p и Dst отражают уровень возмущенности магнитного поля Земли, который существенно зависит от солнечной активности и состояния межпланетной среды. В долговременной

эволюции A_p -индекса четко прослеживается 11-летняя периодичность солнечной активности (см. рис. 1, б). Для циклической вариации A_p характерны два максимума: один вблизи максимума солнечной активности, другой на фазе спада солнечной активности, что ранее отмечалось в [Schreiber, 1998]. Вариация среднегодовых значений Dst -индекса зеркально отражает среднегодовое поведение A_p -индекса. Среднегодовые изменения Dst -индекса совпадают с вариацией плазменного параметра β , на что ранее обращалось внимание в работе [Куражковская и др., 2021], а долговременные изменения A_p -индекса противофазны вариации параметра β во всех солнечных циклах (см. рис. 1, б).

Таким образом, в 21–24-м солнечных циклах различные гелиосферные параметры изменяются в фазе, противофазе или с некоторым временным сдвигом относительно солнечной активности. Иными словами, вариация каждого гелиосферного параметра существенно зависит от фазы солнечного цикла. Необходимо отметить, что типичное поведение среднегодовых значений параметров СВ и ММП в 21–24-м циклах совпадает с ранее замеченными закономерностями поведения гелиосферных параметров на орбите Земли для предшествующих циклов солнечной активности [Веселовский и др., 1998; Dmitriev et al., 2009].

2.2. Эффект гистерезиса геомагнитной и солнечной активности

Рассмотрим связь геомагнитных индексов A_p и Dst с индикаторами солнечной активности в 21–24-м солнечных циклах. В качестве индикаторов солнечной активности были взяты числа Вольфа W и поток солнечного радионизлучения на длине волны 10.7 см $F10.7$. Временные ряды 27-дневных средних значений как A_p - и Dst -индексов, так и солнечных индикаторов в каждом цикле содержат короткопериодные флуктуации, для сглаживания которых применялся метод скользящего среднего. На рис. 2 попарно показаны зависимости A_p - и Dst -индексов от W и $F10.7$ в последних четырех циклах солнечной активности. Зависимости получены по 27-дневным средним значениям параметров, предварительно сглаженным скользящим средним по 27 точкам. Вариации $A_p(W)$, $Dst(W)$, $A_p(F10.7)$ и $Dst(F10.7)$ для разных циклов обозначены кружками: 21-й цикл — синими, 22-й цикл — красными, 23-й цикл — голубыми, 24-й цикл — розовыми.

На рис. 2 видно, что одному и тому же фиксированному значению W или $F10.7$ соответствуют два разных значения A_p - или Dst -индекса. Как следствие этого, в каждом солнечном цикле зависимости A_p и Dst от W и $F10.7$ не совпадают на фазах подъема и спада солнечной активности. Такое поведение зависимостей $A_p(W)$, $Dst(W)$, $A_p(F10.7)$ и $Dst(F10.7)$ в циклах солнечной активности напоминает феномен гистерезиса. Как видно на рис. 2, кривые зависимости геомагнитных индексов от индикаторов солнечной активности имеют форму, близкую к гистерезисным петлям, причем полученные зависимости $A_p(W)$, $Dst(W)$, $A_p(F10.7)$ и $Dst(F10.7)$ образуют

гистерезисные петли в каждом солнечном цикле.

Качественными характеристиками петель гистерезиса служат их форма, ширина (расстояние между восходящей и нисходящей ветвями цикла) и площадь. Сравнительный анализ гистерезисных петель позволил выявить их сходство и различие в разных солнечных циклах. Например, гистерезисные петли, образуемые A_p -индексом с W и $F10.7$, подобны по форме и размерам во всех солнечных циклах. Аналогичное подобие характерно для зависимостей $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$. По-видимому, эта закономерность обусловлена тождественным циклическим поведением солнечных параметров W и $F10.7$ (см. рис. 1, а). Если же сравнивать размеры гистерезисных петель, формируемых индексами A_p и Dst , то заметно, что петли зависимостей $A_p(W)$ и $A_p(F10.7)$ шире, чем петли гистерезиса для $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$.

Рисунок 2 наглядно демонстрирует эволюцию гистерезиса от одного солнечного цикла к другому. Так, одной из особенностей зависимостей $A_p(W)$, $A_p(F10.7)$, $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$ является постепенное уменьшение протяженности и площади гистерезисных петель от 21-го солнечного цикла к 24-му. Кроме того, на рис. 2 видно смещение петель вдоль горизонтальной оси к нулевой точке вертикальной оси от 21-го цикла к 24-му циклу солнечной активности. На наш взгляд, подобные динамика и изменение размеров гистерезисных петель отражают уменьшение солнечной и геомагнитной активности со временем. Наименьшую площадь гистерезисные петли $A_p(W)$, $A_p(F10.7)$, $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$ имеют в 24-м цикле солнечной активности, для которого характерно существенное уменьшение амплитуды солнечных индикаторов и индексов геомагнитной активности по сравнению с другими циклами.

Как известно, необходимым условием возникновения петель гистерезиса является фазовый сдвиг между анализируемыми параметрами. Ширина петель гистерезиса пропорциональна фазовому сдвигу (временной задержке) между геомагнитными индексами и индикаторами солнечной активности и фактически отражает время запаздывания реакции магнитосферы на процессы, происходящие на Солнце. Как видно на рис. 2, ширина петель гистерезиса может быть сопоставима в разных солнечных циклах, но может и существенно различаться. Чем больше временная задержка, тем шире петля. Временная задержка между парами индексов геомагнитной активности и солнечных индексов не является постоянной в конкретном цикле и может то уменьшаться, то увеличиваться. Визуальное сопоставление гистерезисных петель показывает, что самые широкие петли наблюдались в 23-м цикле в зависимостях как A_p , так и Dst от W и $F10.7$. Наиболее отчетливый эффект гистерезиса в зависимостях индексов A_p и Dst от W и $F10.7$ проявляется в последних двух циклах солнечной активности. В 21-м и 22-м циклах петли гистерезиса $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$ имеют более сложную структуру, чем петли гистерезиса $A_p(W)$ и $A_p(F10.7)$.

Еще одной характеристикой гистерезисных петель является направление вращения, которое отражает запаздывание одного параметра относительно другого.

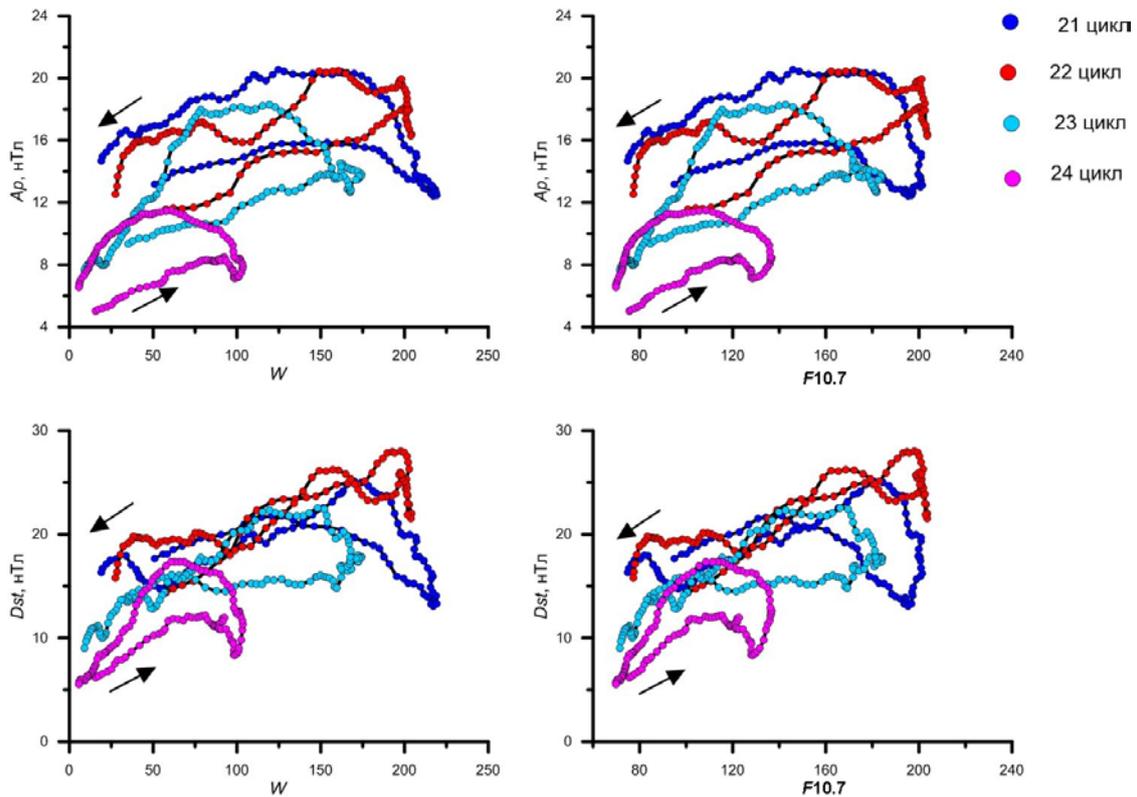


Рис. 2. Петли гистерезиса между индексами геомагнитной активности A_p и Dst ($|Dst|$) и индикаторами солнечной активности W и $F10.7$ для 21–24-го солнечных циклов

Стрелками на рис. 2 показано направление вращения в гистерезисных циклах. Так, в гистерезисных петлях, образуемых A_p -индексом с W и $F10.7$, изменения происходят против часовой стрелки во всех анализируемых солнечных циклах, что свидетельствует о запаздывании изменения глобальной геомагнитной возмущенности (которую характеризует A_p) относительно изменения индикаторов солнечной активности. Кроме того, при одном и том же фиксированном значении W или $F10.7$ величина A_p -индекса на восходящей ветви солнечного цикла существенно ниже, чем на нисходящей ветви. Эта закономерность сохраняется для всех анализируемых циклов.

В петлях гистерезиса, формируемых Dst -индексом с W и $F10.7$, также наблюдается направление вращения против часовой стрелки во всех циклах солнечной активности. Таким образом, проявления возмущенности магнитосферы, связанной с развитием геомагнитных бурь, запаздывают относительно изменения индикаторов солнечной активности. Полученные кривые (см. рис. 2) свидетельствуют о нелинейной связи A_p - и Dst -индексов с индикаторами солнечной активности W и $F10.7$.

2.3. Гистерезисный цикл геомагнитной активности и параметров СВ и ММП

Далее исследовалась связь индексов геомагнитной активности с параметрами межпланетной среды в 21–24-м циклах солнечной активности. Для этого попарно рассматривалась связь A_p и Dst с параметрами плазмы СВ и ММП. В ходе исследования было обнаружено, что зависимости A_p и Dst от гелио-

сферных параметров формируют гистерезисные петли со всеми исследуемыми параметрами. Здесь мы не будем приводить все полученные зависимости, а ограничимся представлением связи индексов A_p и Dst только с некоторыми основными параметрами, такими как B , V , T , N_α/N_p , а также с параметрами P_{dyn} и β , которые являются комбинацией ключевых параметров СВ и ММП.

На рис. 3 попарно приведены зависимости геомагнитных индексов A_p и Dst от параметров СВ и ММП: B и V (а); T и N_α/N_p (б); P_{dyn} и β (в) в 21–24-м циклах солнечной активности. Как и в разделе 2.2, все зависимости получены по 27-дневным средним значениям, предварительно сглаженным скользящим средним по 27 точкам. Общей закономерностью в данном случае является то, что траектории изменения A_p и Dst в зависимости от межпланетных параметров на фазах роста и спада солнечных циклов не совпадают. Это позволяет подобную особенность рассматривать как феномен гистерезиса.

Как видно из полученных диаграмм, регулярный характер имеет эффект гистерезиса индексов A_p и Dst с напряженностью ММП, соотношением концентраций ионов гелия и протонов и параметром β . Гистерезисные петли более сложной конфигурации образуются A_p и Dst со скоростью, температурой и динамическим давлением СВ. Под сложностью структуры гистерезисных петель мы имеем в виду пересечение восходящей и нисходящей ветвей гистерезиса, как, например, в зависимости $Dst(P_{\text{dyn}})$ и $A_p(N_\alpha/N_p)$ в 21-м и 22-м солнечных циклах и $A_p(N_\alpha/N_p)$ в 23-м цикле. Тем не менее в связи A_p - и Dst -индексов с V , T , P_{dyn}

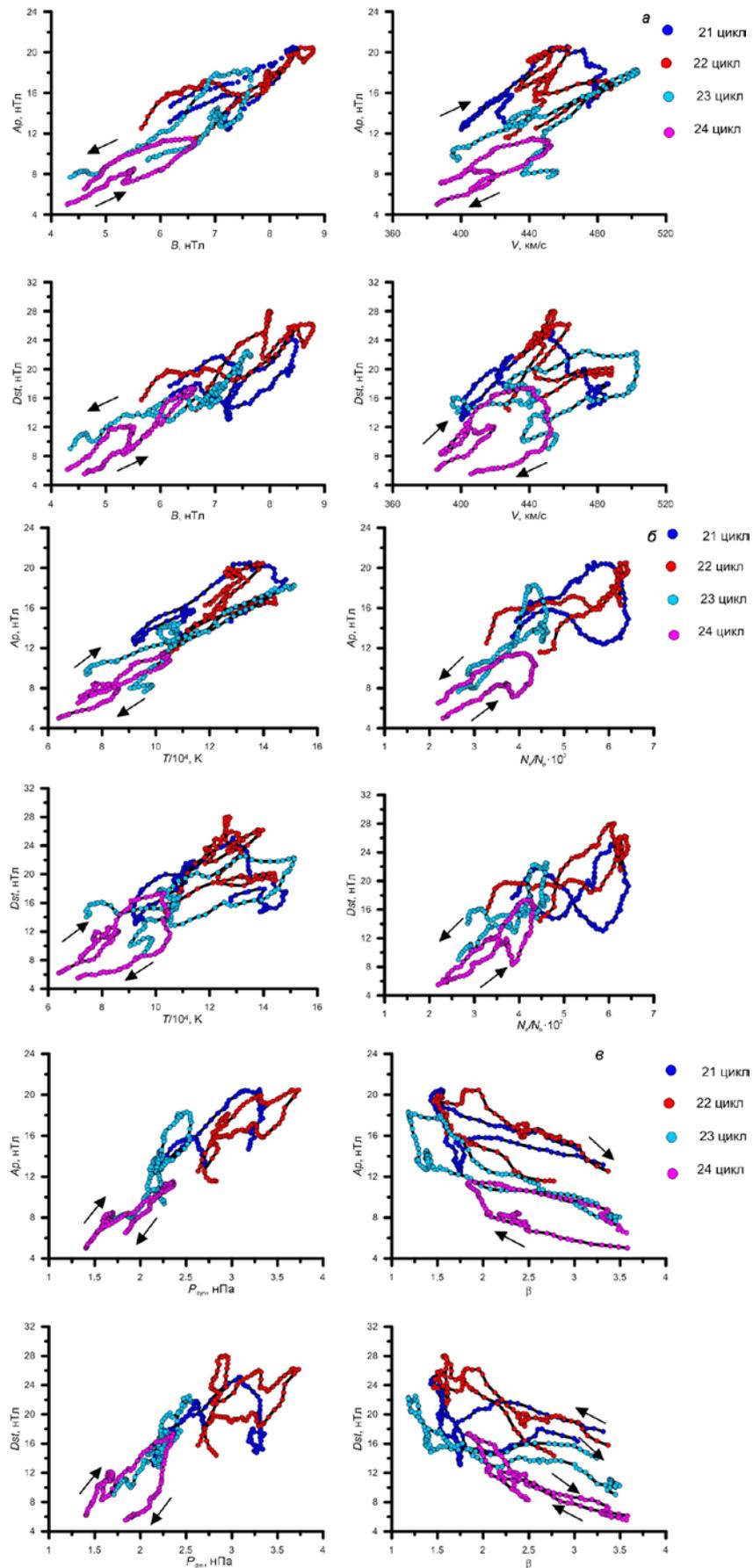


Рис. 3. Эффект гистерезиса для индексов A_p и Dst (Dst) в зависимости от напряженности ММП V и скорости СВ V (а); температуры протонов T и соотношения концентраций ионов гелия и протонов N_α/N_p (б); динамического давления P_{dyn} и β -параметра СВ (в) в 21–24-м циклах солнечной активности

признаки гистерезиса прослеживаются. Такие же сложные петли гистерезиса образуют A_p и Dst с плотностью СВ N и E_y -компонентой электрического поля (здесь они не приведены).

Как площадь, так и форма петель гистерезиса индексов A_p и Dst существенно различаются в зависимости от гелиосферных параметров. Так, зависимости $A_p(B)$, $A_p(T)$, $A_p(P_{dyn})$ представляют собой более узкие гистерезисные петли, чем $A_p(V)$, $A_p(N_\alpha/N_p)$, $A_p(\beta)$. Индекс Dst образует относительно узкие петли гистерезиса только с B и P_{dyn} , а с остальными параметрами — широкие петли. Как отмечалось выше, ширина петля гистерезиса на качественном уровне отражает временные задержки между параметрами на восходящей и нисходящей ветвях солнечного цикла. Чем шире петля гистерезиса, тем больше временные задержки. Исходя из этого, можно отметить, что временные задержки между A_p -индексом и B , T и P_{dyn} меньше, чем между A_p и N_α/N_p , β . Временные задержки между Dst -индексом и B , P_{dyn} меньше, чем между другими параметрами. Иными словами, запаздывание реакции магнитосферы на изменяющиеся внешние условия проявляется в раз- мере петель гистерезиса.

Кроме того, имеет место зависимость площади гистерезисных петель от цикла солнечной активности. Площади петель, образуемых A_p и Dst со всеми параметрами гелиосферы, постепенно уменьшаются от 21-го к 24-му циклу. Одной из особенностей полученных петель гистерезиса для индексов A_p и Dst является их смещение вдоль оси абсцисс к нижней точке оси ординат от 21-го цикла к 24-му циклу с ростом величины гелиосферных параметров. Подобная тенденция отмечается для всех параметров, за исключением β -параметра, наклон гистерезисных петель которого противоположен по наклону гистерезисных петель других параметров. Факт увеличения геомагнитной активности с уменьшением β ранее был отмечен в работах [Зотов и др., 2019; Куражковская и др., 2021]. Поскольку между индексами геомагнитной активности и параметром β существует обратная связь, становится понятным другой наклон петель гистерезиса к горизонтальной оси в зависимостях $A_p(\beta)$ и $Dst(\beta)$. Все петли гистерезиса, представленные на рис. 3, свидетельствуют о нелинейной связи индексов A_p и Dst с параметрами гелиосферы. Направление вращения в гистерезисных петлях, образуемых A_p - и Dst -индексами, различается в зависимости от анализируемых параметров: например, в петлях, формируемых с напряженностью ММП и соотношением концентраций ионов гелия и протонов, направление вращения — против часовой стрелки, а со скоростью СВ, с температурой протонов, динамическим давлением СВ — по часовой стрелке во всех циклах. При направлении вращения против часовой стрелки при одном и том же фиксированном значении B или N_α/N_p величины A_p и Dst на фазе роста солнечной активности меньше, чем на фазе спада. В случае вращения по часовой стрелке при фиксированном значении, например, V , T , P_{dyn} величины A_p и Dst на фазе роста больше, чем на фазе спада цикла. Направление изменения против ча-

совой стрелки A_p - и Dst -индексов в зависимости от B и N_α/N_p можно интерпретировать как запаздывание изменений геомагнитной активности относительно изменений этих межпланетных параметров, аналогично запаздыванию изменений геомагнитной активности относительно изменений солнечных индикаторов. Что касается направления вращения в петлях гистерезиса по часовой стрелке, то это означает, что вариации A_p - и Dst -индексов опережают изменения V , T , P_{dyn} . Все это показывает, что в цикле солнечной активности параметры межпланетной среды, вследствие существующих временных сдвигов между ними, вносят различный вклад в глобальную возмущенность и интенсивность кольцевого тока. В основном направление вращения в петлях гистерезиса, формируемых A_p и Dst -индексами с различными параметрами гелиосферы, совпадает, за исключением параметра β . В петлях, формируемых Dst -индексом с β -параметром СВ, в нечетных циклах направление вращения — против часовой стрелки, а в четных циклах — по часовой стрелке. В гистерезисных петлях, образуемых A_p -индексом с параметром β , изменения происходят по часовой стрелке во всех анализируемых солнечных циклах.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Одиннадцатилетняя периодичность солнечной активности проявляется как в динамике параметров СВ и ММП, так и в геомагнитной возмущенности. Исследуя попарно связь геомагнитных индексов A_p и Dst с солнечными индексами и параметрами гелиосферы, мы обнаружили, что кривые зависимости A_p и Dst от W и $F10.7$, а также от параметров СВ и ММП на восходящей и нисходящей ветвях 21–24-го циклов солнечной активности не совпадают. Возвращение зависимостей $A_p(W)$, $A_p(F10.7)$, $Dst(W)$ и $Dst(F10.7)$ к минимуму солнечной активности происходит по траектории, отличной от траектории их движения к максимуму солнечного цикла. Аналогичное поведение характерно для рассмотренных зависимостей A_p и Dst от параметров межпланетной среды. Наблюдающаяся неоднозначная взаимосвязь индексов геомагнитной активности с индексами солнечной активности, а также с параметрами гелиосферы на фазах роста и спада солнечных циклов напоминает эффект гистерезиса. Анализ показал, что зависимости геомагнитных индексов A_p и Dst от характеристик солнечной активности, параметров СВ и ММП 21–24-м солнечных циклах имеют форму петли гистерезиса для всех анализируемых параметров. Гистерезис между A_p - и Dst -индексами и различными параметрами является отражением их циклического поведения (см. рис. 1). Как следует из рис. 2 и 3, в разных солнечных циклах петли гистерезиса различаются по форме, ширине (расстояние между восходящей и нисходящей ветвью цикла), площади и направлению вращения. Некоторые петли имеют сложную структуру, иногда восходящая и нисходящая ветви гистерезиса могут пересекаться. Вместе с тем на всех полученных диаграммах видно уменьшение протяженности и площади гистерезисных

петель от 21-го к 24-му циклу солнечной активности. Наименьшая площадь гистерезисных петель, образуемых A_p - и Dst -индексами с различными параметрами, характерна для 24-го цикла солнечной активности.

На наш взгляд, процессы, происходящие на Солнце и в межпланетной среде, а также изменение энергии потока СВ, поступающего в магнитосферу в результате взаимодействия ММП с геомагнитным полем, находят отражение в уменьшении площади петель гистерезиса от 21-го к 24-му солнечному циклу. Как известно, одной из основных причин изменчивости солнечной активности является изменение топологии и интенсивности магнитного поля Солнца. Согласно [Penn, Livingston, 2010], начиная с 1998 г. наблюдается уменьшение напряженности магнитного поля солнечных пятен, которое продолжилось в 23-м и 24-м солнечных циклах. Процессы, происходящие внутри Солнца в последние десятилетия [McIntosh et al., 2019], приводят к уменьшению магнитного поля Солнца [Janardhan et al., 2015]. С уменьшением магнитного поля Солнца в 23-м и 24-м циклах солнечной активности тесно связаны ослабление напряженности ММП, уменьшение значений параметров СВ, изменения структуры межпланетной среды и режима обтекания магнитосферы СВ [Yermolaev et al., 2022]. Заметно уменьшилась также амплитуда последних солнечных циклов [Nathaway, 2015]. Следствием низкой активности Солнца являются изменения характера взаимодействия ММП с геомагнитным полем и интенсивности потока энергии СВ в магнитосферу Земли. Уменьшение солнечной активности в конечном счете приводит к ослаблению геомагнитной активности и проявляется в постепенном уменьшении площади гистерезисных петель от 21-го к 24-му циклу.

Исходя из изменчивости формы и размера петель гистерезиса, образуемых A_p - и Dst -индексами с рассмотренными параметрами, можно предположить, что петли отражают долговременную эволюцию потока энергии СВ, определяющего глобальную геомагнитную активность и интенсивность кольцевого тока на восходящей и нисходящей ветвях 21–24-го циклов солнечной активности.

Принято считать, что эффект гистерезиса является долговременной особенностью циклов солнечной активности. Вместе с тем гистерезис проявляется не только на временах, сравнимых с продолжительностью солнечных циклов, но и на более коротких промежутках времени. Например, в работе [Птицына и др., 2021] обнаружен эффект гистерезиса в жесткости обрезания космических лучей при сопоставлении с динамикой геомагнитных индексов и параметров межпланетной среды на временном интервале развития сильной геомагнитной бури.

Рассмотрим еще один пример наблюдения гистерезиса на относительно коротком интервале времени. В работе [Куражковская и др., 2021] было обращено внимание на нелинейный характер связи между Dst -индексом и параметром β СВ во время развития геомагнитных бурь. Действительно, предварительно сгладив скользящим средним накопленные часовые данные Dst -индекса и β -параметра из ра-

боты [Куражковская и др., 2021], построим зависимости $Dst(\beta)$ на интервале 168 ч от моментов начал бурь. Этот временной интервал охватывает среднюю продолжительность главной фазы бури, которая, согласно [Ермолаев и др., 2007], составляет 7 ± 4 ч, и фазу восстановления бури, которая в среднем длится 5–7 сут. На рис. 4 представлены полученные зависимости $Dst(\beta)$ для 288 геомагнитных бурь с внезапным (а) и 645 бурь постепенным началом (б), наблюдавшихся с 1964 по 2010 г.

Видно, что траектория изменения Dst -индекса в зависимости от β -параметра СВ на главной фазе бури не совпадает с ее траекторией на фазе восстановления. Это является типичным признаком гистерезиса. В процессе эволюции геомагнитных бурь Dst и β изменяются циклическим образом. Характерно, что полученные зависимости $Dst(\beta)$ имеют форму петли гистерезиса для бурь как с внезапным, так и с постепенным началом. Таким образом, связь $Dst(\beta)$ наглядно демонстрирует эффект гистерезиса на интервалах времени развития геомагнитных бурь.

Петли гистерезиса для бурь с внезапным и постепенным началом различаются по ширине и направлению вращения. Например, в гистерезисной петле, образуемой Dst -индексом с β -параметром во время развития бурь с внезапным началом, изменения происходят по часовой стрелке и образуемая петля — узкая (см. рис. 4, а). Во время развития бурь с постепенным началом гистерезисная петля существенно шире и направление вращения против часовой стрелки (см. рис. 4, б).

В данной работе мы хотели обратить внимание на то, что гистерезис геомагнитной активности существует как на интервалах времени, равных солнечным циклам, так и на более коротких промежутках времени. Более детальное исследование количественных характеристик петель гистерезиса, образуемых индексами геомагнитной активности с гелиосферными параметрами, может оказаться полезным для прогноза солнечной и геомагнитной активности, а также для понимания физических процессов, ответственных за связь солнечной и геомагнитной активности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована связь индексов геомагнитной активности (A_p , Dst) с индикаторами солнечной активности (W , $F10.7$) и параметрами гелиосферы в последних четырех солнечных циклах. Обнаружено, что кривые зависимости A_p - и Dst -индексов от W и $F10.7$, а также от параметров СВ и ММП на восходящей и нисходящей ветвях 21–24-го циклов солнечной активности не совпадают, что мы интерпретируем как признак гистерезиса. Показано, что геомагнитные индексы A_p и Dst формируют петли гистерезиса со всеми анализируемыми параметрами. Установлено, что форма, ширина и площадь петель гистерезиса, а также направление вращения (по часовой стрелке или против часовой стрелки) существенно зависят от параметров СВ и варьируются от цикла к циклу. Показано, что площадь гистерезисных петель убывает от 21-го к 24-му циклу. Наименьшая площадь

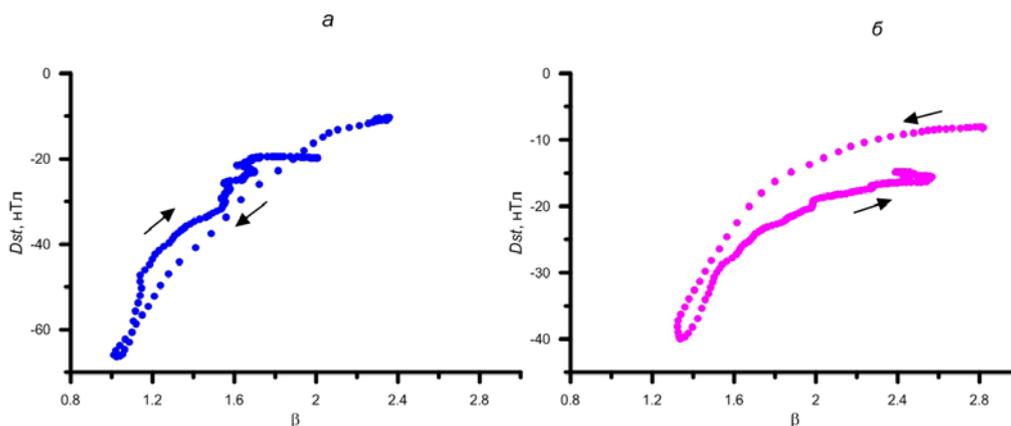


Рис. 4. Эффект гистерезиса между Dst -индексом и β -параметром СВ на временном интервале развития геомагнитных бурь с внезапным (а) и постепенным началом (б)

гистерезисных петель, образуемых A_p - и Dst -индексами с различными параметрами, характерна для 24-го цикла солнечной активности, что связано с тенденцией уменьшения значений индикаторов солнечной активности и параметров межпланетной среды и, как следствие, уменьшения геомагнитной активности. Гистерезисные циклы для A_p - и Dst -индексов подтверждают факт существования задержек во времени между геомагнитной активностью и процессами на Солнце и в СВ на восходящей и нисходящей ветвях цикла. Феномен гистерезиса свидетельствует о нелинейной связи A_p - и Dst -индексов с солнечной активностью и параметрами гелиосферы. Эволюция петель гистерезиса от 21-го к 24-му циклу отражает разницу в энергии потока СВ, определяющего глобальную геомагнитную активность и интенсивность магнитосферного кольцевого тока на восходящей и нисходящей ветвях солнечного цикла.

Благодарим создателей базы данных OMNI (Goddard Space Flight Center, NASA, USA) за возможность использования 27-дневных средних значений и среднегодовых значений чисел Вольфа (W), потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см ($F10.7$), геомагнитных индексов (A_p и Dst), параметров СВ и межпланетного магнитного поля. Выражаем искреннюю благодарность Б.И. Клайну за интерес к работе и обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН № FMWU-2022-0027.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бруевич Е.А., Бруевич В.В., Якунина Г.В. Циклические вариации потоков солнечного излучения в начале XXI века. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2018. № 2. С. 93–99.
- Веселовский И.С., Дмитриев А.В., Суворова А.В. Средние параметры солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли за последние три цикла. *Астрономический вестник*. 1998. Т. 32, № 4. С. 352–358.
- Деминов М.Г., Непомнящая Е.В., Обридко В.Н. Индексы солнечной активности для параметров ионосферы в циклах 23 и 24. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2020. Т. 60, № 1. С. 3–8. DOI: [10.31857/S0016794020010058](https://doi.org/10.31857/S0016794020010058).

Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Лодкина И.Г., Николаева Н.С. Статистическое исследование гелиосферных условий, приводящих к магнитным бурям. *Космические исследования*. 2007. Т. 45, № 1. С. 3–11.

Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А. Влияние параметра β солнечного ветра на статистические характеристики A_p -индекса в цикле солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 4. С. 55–63. DOI: [10.12737/szf-54201906](https://doi.org/10.12737/szf-54201906).

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром β солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104).

Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И. Явления гистерезиса в жесткости обрезания космических лучей во время супербури 7–8 ноября 2004 г. *Геомагнетизм и аэронаука*. 2021. Т. 61, № 4. С. 418–427.

Ahluwalia H.S. A_p time variations and interplanetary magnetic field intensity. *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 105, no. A12. P. 27,481–27,487. DOI: [10.1029/2000JA900124](https://doi.org/10.1029/2000JA900124).

Bachmann K., White O.R. Observations of hysteresis in solar-cycle variations among seven solar-activity indicators. *Solar Phys.* 1994. Vol. 150. P. 347–357. DOI: [10.1007/BF00712896](https://doi.org/10.1007/BF00712896).

Bruevich E.A., Kazachevskaya T.V., Katyushina V.V., et al. Hysteresis of indices of solar and ionospheric activity during 11-year cycles. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016. Vol. 56, no. 8. P. 1075–1081. DOI: [10.1134/S001679321608003X](https://doi.org/10.1134/S001679321608003X).

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S. Expected hysteresis of the 23-rd solar cycle in the heliosphere. *Adv. Space Res.* 2002. Vol. 29, iss. 3. P. 475–479. DOI: [10.1016/S0273-1177\(01\)00615-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00615-9).

Dmitriev A.V., Suvorova A.V., Veselovsky I.S. Statistical characteristics of the heliospheric plasma and magnetic field at the earth's orbit during four solar cycles 20–23. *Handbook on Solar Wind: Effects, Dynamics and Interactions*. Chapter 2 / Ed. H.E. Johannson. New York: NOVA Science Publ., 2009. P. 81–144.

Donnelly R.F. Solar UV spectral irradiance variations. *J. Geomagn. Geoelectr. Suppl.* 1991. Vol. 43. P. 835–842.

Hathaway D.H. The solar Cycle. *Living Rev. Solar Phys.* 2015. Vol. 12, iss. 4. DOI: [10.1007/lrsp-2015-4](https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4).

Holappa L., Mursula K., Asikainen T. A new method to estimate annual solar wind parameters and contributions of different solar wind structures to geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014. Vol. 119. P. 9407–9418. DOI: [10.1002/2014JA020599](https://doi.org/10.1002/2014JA020599).

Ишков В.Н. Периоды пониженной и повышенной солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты. *Труды Всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013»* СПб., 2013. С. 111–114.

- Janardhan P., Bisoi S.K., Ananthkrishnan S., et al. A 20 year decline in solar photospheric magnetic fields: Inner-heliospheric signatures and possible implications. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015. Vol. 120. P. 5306–5317. DOI: [10.1002/2015JA021123](https://doi.org/10.1002/2015JA021123).
- Kane R.P. Solar cycle variation of f_oF_2 . *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. Vol. 54, no. 9. P. 1201–1205.
- Kane R.P. Lags, hysteresis, and double peaks between cosmic rays and solar activity. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108, iss. A10, 1379. DOI: [10.1029/2003JA009995](https://doi.org/10.1029/2003JA009995).
- Kilcik A., Yiğit E., Yurchyshyn V., et al. Solar and geomagnetic activity relation for the last two solar cycles. *Sun and Geosphere*. 2017. Vol. 12/1. P. 31–39.
- McIntosh S.W., Leamon R.J., Egeland R., et al. What the sudden death of solar cycles can tell us about the nature of the solar interior. *Solar Phys.* 2019. Vol. 294, no. 88. DOI: [10.1007/s11207-019-1474-y](https://doi.org/10.1007/s11207-019-1474-y).
- Mavromichalaki H., Belehaki A., Rafios X. Simulated effects at neutron monitor energies: evidence for a 22-year cosmic-ray variation. *Astron. Astrophys.* 1998. Vol. 330. P. 764–772.
- Ortiz de Adler N., Elias A.G. Latitudinal variation of f_oF_2 hysteresis of solar cycles 20, 21 and 22 and its application to the analysis of long-term trends. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 1269–1273. DOI: [10.5194/angeo-26-1269-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-1269-2008).
- Özgülç A., Ataç T. Effects of hysteresis in solar cycle variations between flare index and cosmic rays. *New Astronomy*. 2003. Vol. 8, iss. 8. P. 745–750. DOI: [10.1016/S1384-1076\(03\)00063-0](https://doi.org/10.1016/S1384-1076(03)00063-0).
- Özgülç A., Ataç T., Antalova A. Effects of hysteresis of some solar indices during the past three solar cycles 20, 21 and 22. *Proc. 1st Solar and Space Weather Euroconference “The Solar Cycle and Terrestrial Climate”*. Santa Cruz de Tenerife, Spain, 2000. SP-463. P. 403–405.
- Özgülç A., Kilcik A., Rozelot J.P. Effects of hysteresis between maximum CME speed index and typical solar activity indicators during cycle 23. *Solar Phys.* 2012. Vol. 281. P. 839–846. DOI: [10.1007/s11207-012-0087-5](https://doi.org/10.1007/s11207-012-0087-5).
- Özgülç A., Kilcik A., Georgieva K., Kirov B. Temporal offsets between maximum CME speed index and solar, geomagnetic, and interplanetary indicators during solar cycle 23 and the ascending phase of cycle 24. *Solar Phys.* 2016. Vol. 291. P. 1533–1546. DOI: [10.1007/s11207-016-0909-y](https://doi.org/10.1007/s11207-016-0909-y).
- Papitashvili V.O., Papitashvili N.E., King J.H. Solar cycle effects in planetary geomagnetic activity: Analysis of 36-year long OMNI dataset. *Geophys. Res. Lett.* 2000. Vol. 27, no. 17. P. 2797–2800.
- Penn M.J., Livingston W. Long-term evolution of sunspot magnetic fields. *Proc. IAU Symp. “The Physics of Sun and Star Spots”*. 2010. Vol. 273. P. 126–133.
- Reda R., Giovannelli L., Alberti T. On the time lag between solar wind dynamic parameters and solar activity UV proxies. *Adv. Space Res.* 2023. Vol. 71, iss. 4. P. 2038–2047. DOI: [10.1016/j.asr.2022.10.011](https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.10.011).
- Samsonov A., Bogdanova Y.V., Branduardi-Raymont G., et al. Long-term variations in solar wind parameters, magnetopause location, and geomagnetic activity over the last five solar cycles. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124. P. 4049–4063. DOI: [10.1029/2018JA026355](https://doi.org/10.1029/2018JA026355).
- Schreiber H. On the periodic variations of geomagnetic activity indices A_p and ap . *Ann. Geophys.* 1998. Vol. 16. P. 510–517.
- Singha M., Singha Y.P., Badruddin. Solar modulation of galactic cosmic rays during the last five solar cycles. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70. P. 169–183.
- Verbanac G., Vršnak B., Veronig A., Temmer M. Equatorial coronal holes, solar wind high-speed streams, and their geoeffectiveness. *Astronomy Astrophys.* 2011. Vol. 526, no. A20. DOI: [10.1051/0004-6361/201014617](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201014617).
- Yermolaev Y.I., Lodkina I.G., Khokhlachev A.A., Yermolaev M.Y. Peculiarities of the heliospheric state and the solar-wind/magnetosphere coupling in the era of weakened solar activity. *Universe*. 2022. Vol. 8, 495. DOI: [10.3390/universe8100495](https://doi.org/10.3390/universe8100495).
URL: https://pdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/ (дата обращения 8 декабря 2022 г.).
URL: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/ow_data.html/ (дата обращения 8 декабря 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Куражковская Н.А., Куражковский А.Ю. Эффект гистерезиса между индексами геомагнитной активности (A_p , Dst) и параметрами межпланетной среды в 21-24 циклах солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 3. С. 73–82. DOI: [10.12737/szf-93202308](https://doi.org/10.12737/szf-93202308).