

УДК 523.98;550.388.2

ВОЗМУЩЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ В ОТСУТСТВИЕ ПЯТЕН НА СОЛНЦЕ

© 2023 г. Т. Л. Гуляева*

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия*

**e-mail: gulyaeva@izmiran.ru*

Поступила в редакцию 19.10.2022 г.

После доработки 25.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

Выполнен анализ геомагнитной и ионосферной активности за 541 возмущенный день ($Kp > 3.0$) без пятен на Солнце с 1995 по 2021 гг. Представлены оценки вариаций глобальных ионосферных индексов WU (положительные возмущения полного электронного содержания), WL (отрицательные возмущения), их разности WE и планетарного индекса Wp . Исходный W -индекс принимает значения от -4 до $+4$ с шагом 1, характеризующие меру отклонения текущего значения полного электронного содержания от спокойной медианы, а глобальные индексы WU , WL , WE , Wp выведены на основе глобальных карт GIM-ТЕС Лаборатории реактивного движения, JPL. Исследование сезонной зависимости показало два уровня ионосферной возмущенности: менее возмущенная ионосфера в течение 1996–1998 гг. и 2018–2021 гг. и более значительные возмущения в течение 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг. Для ионосферной изменчивости сезонные вариации различаются для двух рядов данных. В первом наборе данных впервые выявлены сезонные вариации скорости солнечного ветра V_{sw} на околоземной орбите с максимумами в равноденствие, аналогичные вариациям Kp -индекса. Второй ряд более возмущенной ионосферы относится ко времени перехода от эпохи высокой СА к более низкой СА, характеризующейся полной перестройкой физических условий на Солнце.

DOI: 10.31857/S0016794022600582, EDN: UIRLXK

1. ВВЕДЕНИЕ

Изменчивость магнитной активности Солнца характеризуется числом солнечных пятен SSN, потоком солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ и другими показателями [Lean, 2000; Tapping, 2013; Clette et al., 2014; Hathaway, 2015; Gulyaeva et al., 2018; Goncharenko et al., 2021]. Пятна представляют собой сильно намагниченные области, генерируемые динамо-процессами [Solanki, 2003]. Хронология дней без пятен на Солнце (spotless day, SLD) представлена на сайте обсерватории SIDC (Solar Influences Data Analysis Center, <https://www.bis.sidc.be/silso/>).

Отсутствие пятен на Солнце ($SSN = 0$) означает крайне слабую солнечную активность, которая наблюдается на спаде солнечного цикла (СЦ), в минимуме и в начале фазы роста СЦ. Глубокий минимум солнечной активности (СА) с большим числом дней без пятен соответствует слабому крупномасштабному дипольному полю Солнца и, следовательно, слабому магнитному полю в гелиосфере [Nandy et al., 2011]. Многие исследования посвящены изменениям в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере в минимуме солнечной активности [Chen et al., 2011; Solomon et al., 2013;

Zerbo et al., 2015; Гуляев и Гуляева, 2018; Котонаева и др., 2021; Somaila et al., 2022], однако можно назвать лишь единичные работы для экстремально низкой активности в условиях отсутствия пятен на Солнце [Hathaway, 2015; Гуляев, 2018; Somaila et al., 2022]. В данной работе впервые исследованы вариации геомагнитной и ионосферной возмущенности в отсутствие солнечных пятен в 23–25-м циклах солнечной активности. Одной из целей данного исследования является рассмотрение сезонной зависимости исследуемых параметров в возмущенных геомагнитных условиях ($Kp > 3.0$) при слабой зависимости от солнечной активности за счет выбора дней без пятен.

Выбор интервала для исследований ограничен имеющимися глобальными ионосферными картами полного электронного содержания GIM-ТЕС за 1995–2022 гг. [Hernandez-Pajares et al., 2009]. Эта эпоха характеризуется условиями, когда после переходного 23-го цикла фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза, что привело к полной перестройке физических условий на Солнце, и, как следствие, в гелиосфере, и отразилось на состоянии околоземного космического пространства [Ишков, 2022]. Исследованию солнечного ветра,

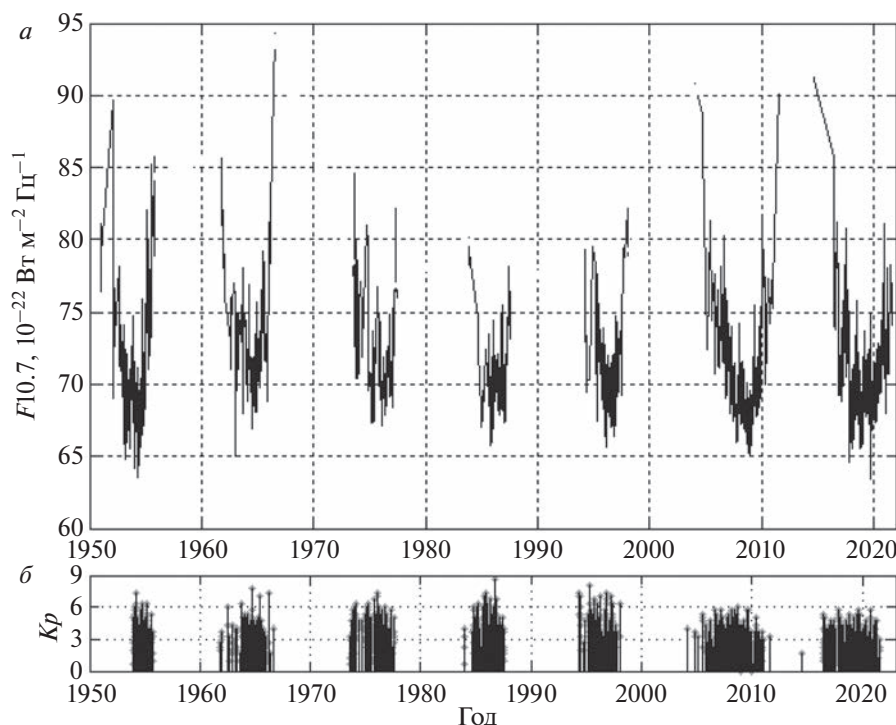


Рис. 1. Изменения потока солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см (а) и геомагнитного K_p -индекса (б) в отсутствие пятен на Солнце.

геомагнитных и ионосферных возмущений в эту необычную эпоху в экстремально спокойных условиях отсутствия пятен на Солнце посвящена данная работа.

2. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Несмотря на отсутствие пятен на Солнце, в это время наблюдаются изменения других признаков (индексов) солнечной цикличности, таких как корональные выбросы вещества, поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см, высокоскоростные потоки солнечного ветра из корональных дыр, являющиеся источником ионосферных возмущений [Gulyaeva and Gulyaev, 2018; Гуляев и Гуляева, 2018], возмущения в околоземном космическом пространстве и на Земле. На рис. 1а показано изменение потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ в дни без пятен на Солнце.

В условиях крайне низкой солнечной активности с 1995 по 2021 гг. наблюдались 1995 дней без пятен на Солнце. Из них был выделен для дальнейшего анализа 541 геомагнитно-возмущенный день с индексом планетарной геомагнитной активности $K_p > 3.0$, предоставленным центром GFZ по адресу (<https://datapub.gfz-potsdam.de/download/10.5880.Kp.0001/>) [Matzka et al., 2021]. Вариации максимальных дневных значений индекса K_p в эти дни при $K_p > 3.0$ приведены на рис. 1б.

Отметим, что на рис. 1б значения K_p достигают величины 8.0, соответствующей сильной геомагнитной буре. В течение 541 дня наблюдались слабые геомагнитные бури (454 дня при $3 < K_p < 5$), умеренные бури (70 дней при $5 \leq K_p < 6$), и сильные геомагнитные бури (17 дней при $K_p \geq 6$).

Глобальные карты полного электронного содержания GIM-TEC, произведенные JPL с 1994 г., использованы для расчета карт GIM- W -индекса и глобального электронного содержания GEC [Афраймович и др., 2006; Gulyaeva et al., 2018], представленных на странице “Ионосферная погода” ИЗМИРАН (<https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/archive>). Глобальные карты GIM-TEC и соответствующие им карты GIM- W -индекса разработаны в формате IONEX [Schaer et al., 2015] на широтах от 87.5° S до 87.5° N с шагом 2.5° , долготах от 180° W до 180° E с шагом 5° , с интервалом в 1 ч от 0 до 23 ч мирового времени за каждый день. W -индекс в каждом узле карты меняется от -4 до $+4$ с шагом 1, что соответствует логарифмическому отклонению текущего значения TEC от спокойной медианы. Глобальные индексы WU (положительные возмущения TEC), WL (отрицательные возмущения) и их разность WE представляют суммирование с соответствующими весовыми коэффициентами значений W -индекса ($W = \pm 2, \pm 3, \pm 4$) по всем ячейкам карты GIM- W [Гуляева и Хараламбус, 2021; Gulyaeva

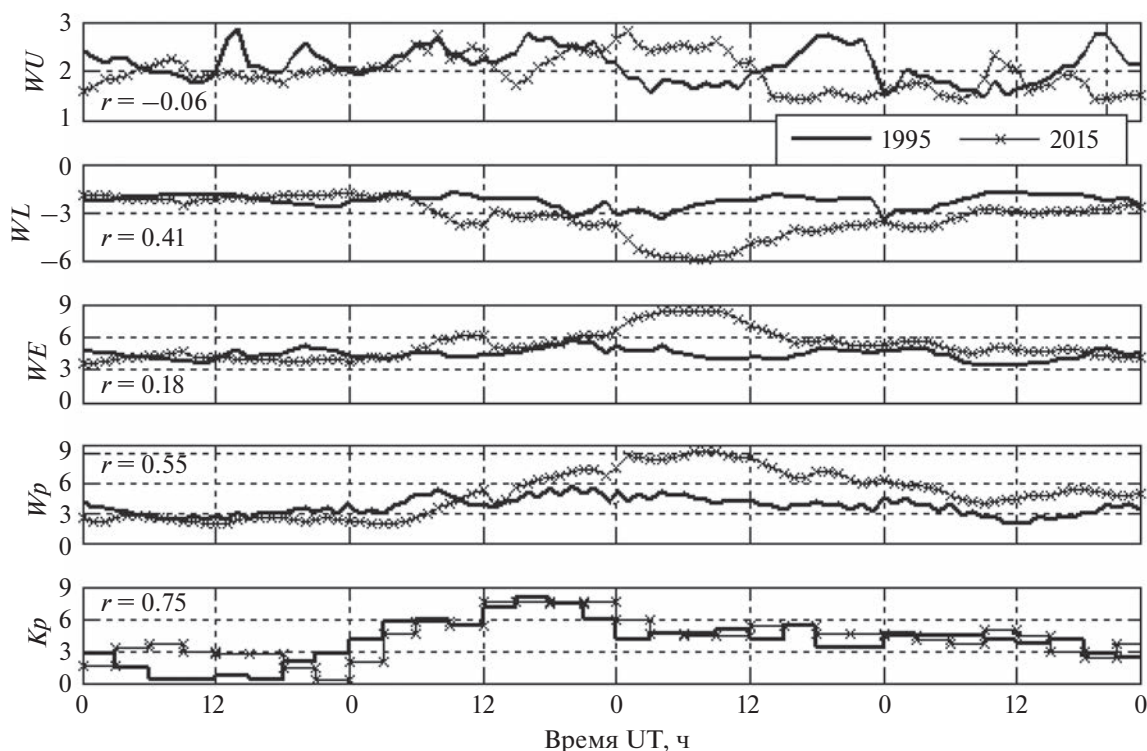


Рис. 2. Вариации ионосферных и геомагнитных индексов в экстремальных условиях: геомагнитная буря 6–9 апреля 1995 г. ($SSN = 0$, $Kp = 8.0$) и буря в день Святого Патрика 16–19 марта 2015 г. ($SSN \approx 40$, $Kp = 7.7$).

et al., 2021]. Глобальный индекс Wp выражает интегральную разность между максимальным положительным индексом ($W > 0$) и минимальным отрицательным индексом ($W < 0$) на каждой широте карт GIM- W [Gulyaeva and Stanislawski, 2008; Gulyaeva et al., 2021].

Для иллюстрации вариаций ионосферных и геомагнитных индексов на рис. 2 приведены данные для интенсивной бури в отсутствие солнечных пятен с 6 по 9 апреля 1995 г. ($Kp = 8.0$) и самой интенсивной бури 24-го СЦ в день Святого Патрика с 16 по 19 марта 2015 г. ($Kp = 7.7$) при наличии пятен на Солнце (рекалиброванное число пятен $SSN2 \approx 40$). Различные аспекты исследования бури в день Святого Патрика представлены в работах [Nava et al., 2016; Gulyaeva and Arıkan, 2017; Гуляева и Гуляев, 2018; Тимченко и др., 2022]. Оба события наблюдались в равноденствие (весна), поэтому сезонная зависимость идентична в сравниваемых результатах. На рис. 2 сверху вниз приведены индексы WU , WL , WE , Wp и Kp : сплошная кривая — для бури 1995 г., штриховая — 2015 г. На нижней панели видно подобие изменений Kp -индекса для двух событий с коэффициентом корреляции $r = 0.75$.

Изменения положительных ионосферных возмущений WU -индекса различаются чередованием иррегулярных взлетов и провалов в двух собы-

тиях (рис. 2, сверху). Их различие подтверждается отсутствием корреляции WU -индексов с коэффициентом $r = -0.06$. Максимальные значения $WU = 2.9$ достигаются в каждом из событий, но в разное время. Более упорядоченные изменения наблюдаются в ионосферных WL -, WE - и Wp -индексах с явно выраженными главной и восстановительной фазами бури, однако, амплитуда их изменений в день Святого Патрика в 2 раза превышает изменения при отсутствии солнечных пятен. Коэффициент корреляции WL -индекса показывает незначительное увеличение ($r = 0.41$) по сравнению с WU -индексом, а эффект отсутствия корреляции WU -индекса приводит к отсутствию корреляции и в их разности $WE = WU - WL$ ($r = 0.18$). Наконец, корреляция ионосферного Wp -индекса достигает приемлемого уровня ($r = 0.55$), с двойным преобладанием максимальной амплитуды во время бури в день Святого Патрика.

Таким образом, при близком соответствии геомагнитного Kp -индекса для двух событий мы наблюдаем существенные различия в двух ионосферных бурях, связанные с различием в солнечной активности. Следовательно, ионосферная возмущенность более чувствительна к воздействию солнечной составляющей, чем геомагнитная активность во время бури. Дальнейший анализ показывает, что эти две бури относятся к двум принципиально различным периодам ионосфер-

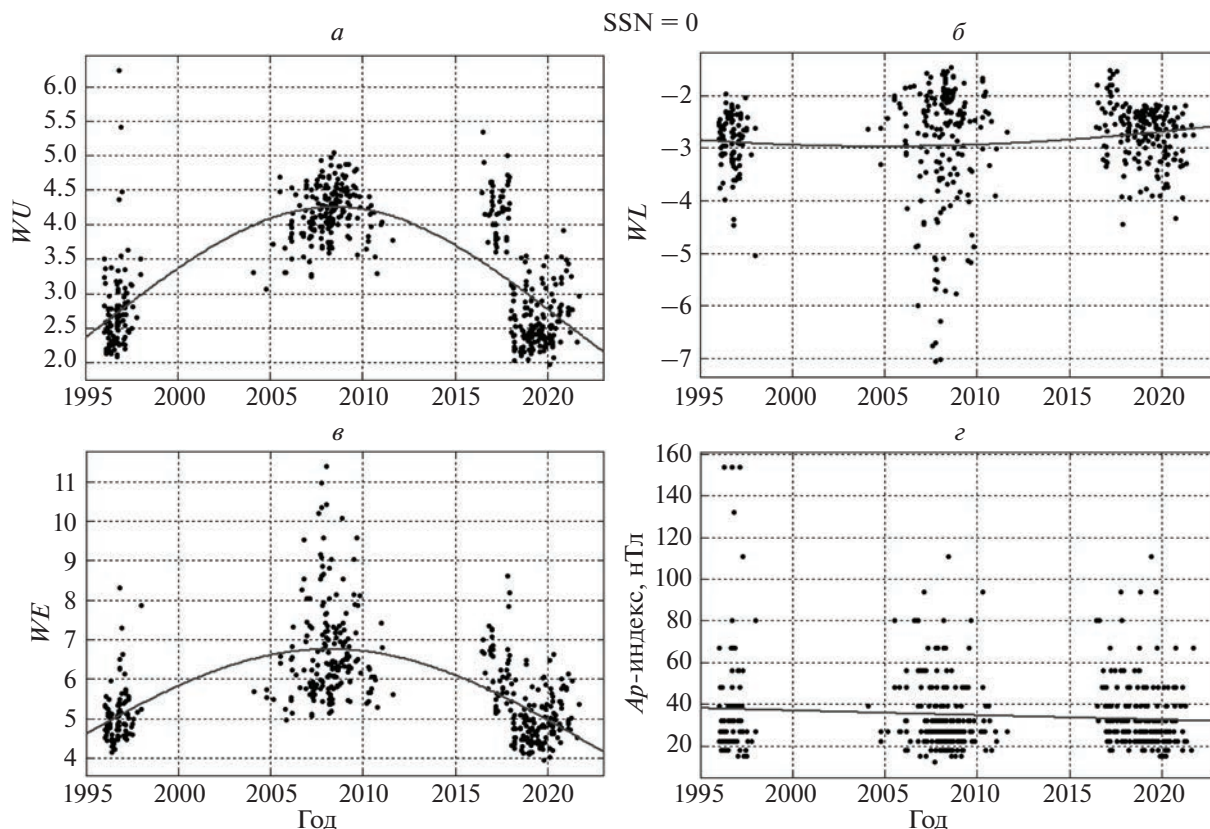


Рис. 3. Вариации глобальных ионосферных индексов: (а) WU ; (б) WL ; (в) WE ; (г) геомагнитный Ap -индекс.

ной возмущенности, наблюдавшихся для полного набора геомагнитно-возмущенных дней в отсутствие солнечных пятен.

Для 541 возмущенного дня без пятен на Солнце проведен анализ скорости солнечного ветра, V_{sw} , геомагнитного Kp -индекса и его амплитудного эквивалента Ap , глобальных ионосферных индексов WU , WL , WE и Wp с 1995 по 2021 гг. На рис. 3 приведены значения дневного максимума WU -, WE - и Ap -индексов и минимума WL -индекса (символы) и их аппроксимация по методу наименьших квадратов (сплошная кривая). На рис. 3а (WU -индекс), 3б (WL -индекс), 3в (WE -индекс) заметно повышение интенсивности ионосферных возмущений с 2004 по 2010 гг. и в 2016–2017 гг. Возмущенность в ионосфере определяется как отклонения (положительные и отрицательные возмущения) от спокойного уровня. Так как абсолютные значения спокойного уровня ионосферных параметров (в данном случае медиана полного электронного содержания, TEC_{med}) с понижением солнечной активности к минимуму уменьшаются, то относительные логарифмические отклонения TEC от медианы, $\log(TEC/TEC_{med})$, в годы минимума СА возрастают. При этом геомагнитная возмущенность амплитудного Ap -индекса (нТл), эквивалентного квазилогарифмиче-

ской шкале Kp -индекса, показывает тенденцию к убыванию (рис. 3г) [Gulyaeva et al., 2021; Somaila et al., 2022].

При построении зависимости полученных результатов от номера дня в году (сезонный ход) для всех рассмотренных дней оказалось, что они четко разделяются на два периода: ряд 1 (модель 1) – данные за 1994–1998 гг. и 2018–2021 гг.; ряд 2 (модель 2) – данные за 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг. Разделение на два ряда определялось эмпирически путем подбора наилучшей аппроксимации в каждом наборе данных. На рис. 4 символы относятся к данным в индивидуальные дни, а их аппроксимация методом наименьших квадратов – сплошные кривые (модель 1 и модель 2). На рис. 4 видны различия в результатах по двум периодам наблюдений в отсутствие пятен на Солнце в зависимости от дня в году: (а) WU ; (б) WL ; (в) WE ; (г) скорость солнечного ветра V_{sw} ; (д) глобальное электронное содержание GEC ; (е) Kp -индекс.

Наибольшее различие в двух рядах данных наблюдается в ионосферных WU - и WE -индексах, как в самих данных, так и в аппроксимирующих кривых, вычисленных методом наименьших квадратов. Заметен минимум сезонного хода положительных возмущений в ионосфере WU -индекса (рис. 4а) в периоды равноденствий (весна – день

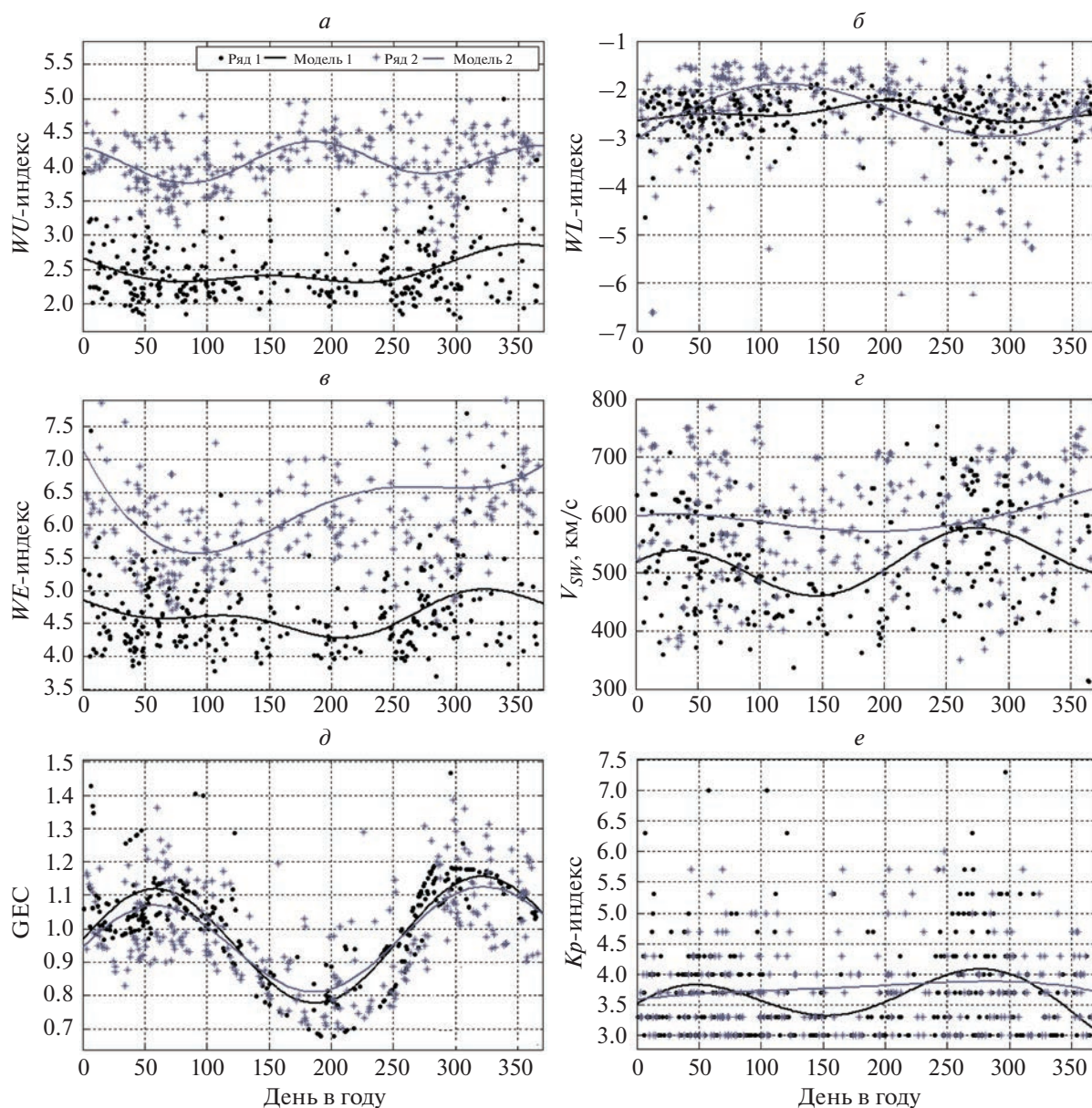


Рис. 4. Зависимость различных параметров от номера дня в году (сезонный ход) для двух периодов наблюдений: ряд 1 – данные за 1994–1998 гг. и 2018–2021 гг.; ряд 2 – данные за 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг. (а) WU -индекс; (б) WL -индекс; (в) WE -индекс; (г) скорость солнечного ветра V_{sw} ; (д) глобальное электронное содержание GEC; (е) Kp -индекс.

весеннего равноденствия 82 ± 30 дней, осень – день осеннего равноденствия 266 ± 30 дней). Он отличается от вариаций индекса диапазона $WE = WU - WL$ (рис. 4в), который включает в себя также зависимость от WL . Индекс WL показывает отрицательные ионосферные возмущения, возрастающие по абсолютной величине к равноденствию для 1-го ряда данных, и весенне-осеннюю асимметрию для 2-го ряда (рис. 4б). В то же время индекс WL не показывает такого различия в двух рядах данных, как индексы WU и WE . Асимметрия сезонных изменений положительных и отри-

цательных ионосферных возмущений наиболее значительна в полярных областях, как было отмечено ранее [Gulyaeva et al., 2022].

Изменения в скорости солнечного ветра (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) несколько отличаются для двух классов наблюдений (рис. 4г). При этом сезонные различия V_{sw} с максимумами в равноденствия наблюдаются только в ряде 1. Источником солнечного ветра являются корональные дыры и корональные выбросы вещества на Солнце. Различия в вариациях скорости солнечного ветра в двух рядах данных можно объяс-

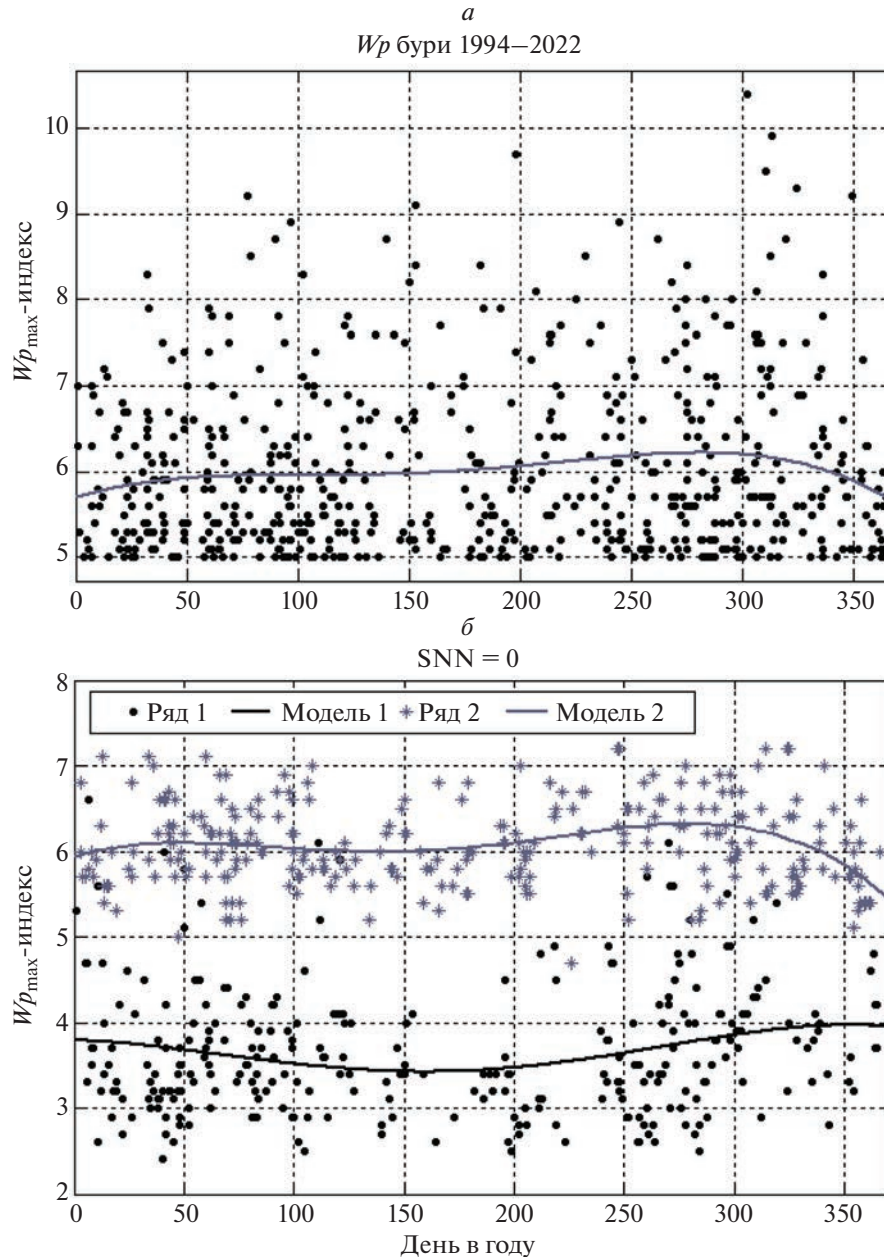


Рис. 5. Сравнение максимального значения $Wp_{\max}$ -индекса: (а) в полном каталоге ионосферных бурь с 1994 по 2022 гг.; (б) в двух наборах данных в отсутствие пятен на Солнце в зависимости от номера дня в году.

нить доминирующими потоками медленного солнечного ветра в СЦ 24 по сравнению с высокоскоростными потоками вне этого периода [Sotmaila et al., 2022].

Ранее было показано, что наблюдается систематическое влияние плотности, скорости и динамического давления солнечного ветра на распределение авроральной яркости, включая ее зависимость от сезона [Shue et al., 2002]. Однако при этом не были замечены сезонные особенности в параметрах скорости солнечного ветра. В работе [Marques de Souza Franco et al., 2021] получено, что во время

геомагнитных бурь наблюдаются полугодовые вариации электрического поля солнечного ветра VBs (где V равна скорости солнечного ветра V_{sw} , а Bs — это южная компонента межпланетного магнитного поля), однако скорость солнечного ветра V_{sw} показывает только годовые вариации и не зависит от сезона. Таким образом, полученная зависимость скорости солнечного ветра V_{sw} от сезона (рис. 4г) является новым фактом наблюдения, впервые выявленным из-за выбора крайне низкой солнечной активности при отсутствии пятен на Солнце.

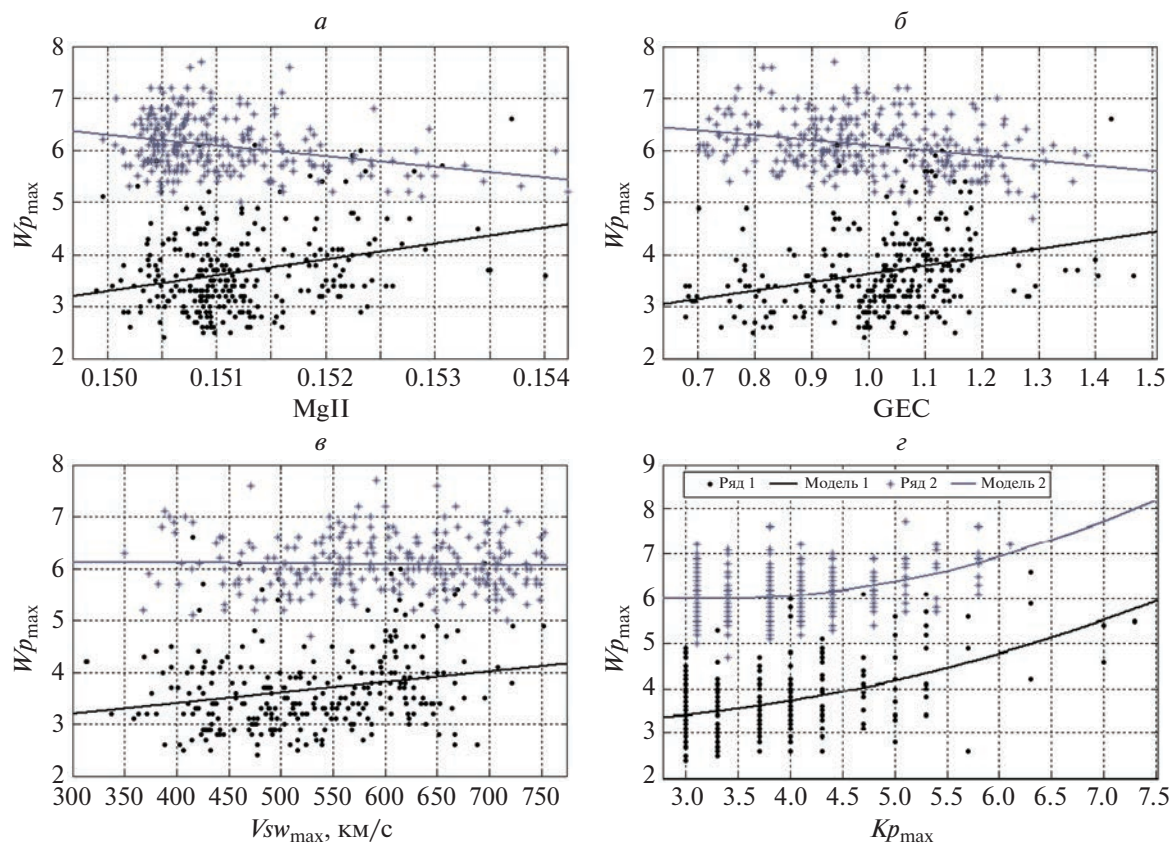


Рис. 6. Связь ионосферной возмущенности $Wp_{\max}$ для двух наборов данных в дни без пятен на Солнце с солнечными, межпланетными, ионосферными и геомагнитными параметрами: (а) составной индекс $MgII$ спектральной линии ионов магния на Солнце; (б) глобальное электронное содержание в ионосфере GEC; (в) скорость солнечного ветра V_{sw} ; (г) геомагнитный Kp -индекс.

Этот факт подтверждается изменениями Kp -индекса (рис. 4е), для которого сезонные различия с максимумами в периоды равноденствий также наблюдаются только в ряде 1 (рис. 4е). Отметим слабое различие геомагнитной возмущенности Kp -индекса в двух периодах наблюдений – близкие по величине как индивидуальные значения, так и аппроксимирующие функции. Близкие результаты для двух рядов данных показывает и глобальное электронное содержание GEC (рис. 4д) с максимумами в периоды равноденствий.

На рисунке 5а представлено изменение максимального значения $Wp_{\max}$ -индекса в зависимости от номера дня в году из полного каталога ионосферных бурь, созданного и регулярно обновляемого с 1994 г. в течение более двух циклов солнечной активности [Gulyaeva et al., 2014]. Отметим максимум в периоды равноденствий, с большей амплитудой в осеннее равноденствие, чем весной, для пика ионосферных бурь на протяжении C23–C25. Для сравнения на рис. 5б приведены максимальные значения индекса $Wp_{\max}$, полученного по двум наборам данных (ряд 1 и ряд 2) в отсутствие пятен на Солнце в зависимости от но-

мера дня в году, отражающие сезонный эффект: максимум в зимнее солнцестояние для ряда 1, и максимум в равноденствие для ряда 2. Получены характерные различия в двух уровнях изменений указанных индексов (рис. 5б). Видно, что в период с 2004 по 2010 гг. и 2016–2017 гг. (рис. 5б, верхний ряд 2), в соответствии с эпохой перестройки физических условий на Солнце и в околоземном космическом пространстве [Ишков, 2022], величина $Wp_{\max}$ фактически принимает значения, характерные для ионосферных бурь (рис. 5а), в то время как уровень возмущений значительно слабее в 1-м наборе данных (рис. 5б, нижний ряд 1). Эти изменения подобны вариациям положительных ионосферных возмущений (рис. 4а), но противоположны по фазе: в равноденствие наблюдается максимум $Wp_{\max}$ -индекса, но минимум WU -индекса, что отражает различия в их определении.

Различия планетарного индекса ионосферной возмущенности $Wp_{\max}$ в дни без пятен на Солнце с 4 другими рассмотренными индексами показаны на рис. 6. На рис. 6а представлены изменения $Wp_{\max}$ для двух наборов данных в зависимости от

составного индекса $MgII$ (<http://www.iup.uni-bremen.de/UVSAT/Datasets/mgii>), рассчитываемого как отношение потоков эмиссии ионизованного магния в центре спектральной линии на длине волны 280 нм и в боковых h и k линиях 279.56 и 280.27 нм (core-to-wing ratio). Индекс $MgII$ непрерывно наблюдается со спутников с 70-х гг. прошлого века [Viereck et al., 2004]. Этот индекс измеряется в относительных единицах и является хорошим индикатором как солнечной хромосферы (ядро линии), так и фотосферы (крылья линии). Он также показывает преимущество для долговременных изменений в ионосфере в эпоху солнечного минимума [Laštovička, 2021]. На рис. 6а видны противоположные тренды в двух наборах данных: с ростом индекса $MgII$ значения 1-го ряда данных Wp_{max} возрастают, а 2-го ряда данных убывают.

На рис. 6б представлены изменения Wp_{max} для двух наборов данных в зависимости от глобального электронного содержания ГЕС. Видны тренды изменения в двух рядах данных, возрастающие к большим значениям ГЕС, подобные изменениям этого параметра с ростом индекса $MgII$ (рис. 6а).

Индекс Wp_{max} отличается для двух наборов данных в зависимости от скорости солнечного ветра V_{sw} (рис. 6в). Здесь отметим тренд роста ионосферной возмущенности в 1-м ряду данных, и почти неизменное среднее значение Wp_{max} при любых V_{sw} во 2-м ряду данных.

Отметим синхронные изменения Wp_{max} в зависимости от Kp -индекса в двух периодах наблюдений (рис. 6г). Получены разные по величине, но одинаковые по направленности тенденции возрастания ионосферной изменчивости с ростом геомагнитной возмущенности. Это подтверждает полученные выше результаты сезонных изменений геомагнитной и ионосферной возмущенности, в которых отмечен двойной уровень индексов Wp_{max} в ионосфере (рис. 5б), и смешанное однородное изменение для двух рядов геомагнитного Kp -индекса (рис. 4е).

3. ВЫВОДЫ

Выполнен анализ геомагнитной и ионосферной активности в течение 541 возмущенного дня без пятен на Солнце ($Kp > 3.0$) с 1995 по 2021 гг. Представлены оценки вариаций глобальных ионосферных индексов WU (положительные возмущения полного электронного содержания ГЕС), WL (отрицательные возмущения), их разности WE и планетарного индекса Wp .

Два уровня ионосферной возмущенности получены при анализе сезонных вариаций: менее возмущенная ионосфера в течение 1996–1998 гг. и 2018–2021 гг. и более значительные возмущения за 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг. Впервые выявля-

ны сезонные вариации в первом наборе данных (в течение 1996–1998 гг. и 2018–2021 гг.) с максимумами в сезон равноденствия на Земле скорости солнечного ветра V_{sw} на околоземной орбите, и аналогичные вариации Kp -индекса.

Результаты показывают два уровня ионосферной возмущенности: (1) низкий уровень возмущенности в течение 1996–1998 гг. и 2018–2021 гг.; (2) более возмущенная ионосфера в 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг. Второй набор более возмущенной ионосферы относится ко времени перехода от эпохи высокой СА к более низкой СА. В нашей работе повышенная ионосферная возмущенность наблюдается в отсутствие пятен на Солнце в 2004–2010 гг. и 2016–2017 гг., что может быть связано с экстремально пониженным минимумом СА в эти годы, в то время как Kp -индекс показал тренд к уменьшению за весь период. Наши результаты согласуются с работой Ишкова [2022], в которой отмечено, что в условиях СЦ 24 после переходного СЦ 23 фоновые значения общего магнитного поля Солнца уменьшились более чем в два раза, что привело к полной перестройке физических условий на Солнце.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую признательность редактору журнала и уважаемым рецензентам за уделенное время и внимание, а также за ценные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить содержание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // ДАН. Т. 409. № 3. С. 399–402. 2006.
- Гуляев Р.А. Действительно ли солнечная корона отсутствовала в период Маундеровского минимума? // Астрономия-2018. Т. 2: Солнечно-земная физика — современное состояние и перспективы. М.: ГАИШ. С. 55–58. 2018.
<https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.013>
- Гуляев Р.А., Гуляева Т.Л. Возрастание мощности центральной корональной дыры к минимуму солнечной активности: реакция ионосферы // Астрономия-2018. Т. 2: Солнечно-земная физика — современное состояние и перспективы. М.: ГАИШ. С. 59–62. 2018.
<https://doi.org/10.31361/eaas.2018-2.014>
- Гуляева Т.Л., Хараламбус Х. Трехчасовые индексы ионосферной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 6. С. 741–750. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021060079>
- Ишков В.Н. Итоги и уроки 24 цикла — первого цикла второй эпохи пониженной солнечной активности // Астрон. журн. Т. 99. № 1. С. 54–69. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0004629922020050>
- Котонаева Н.Г., Коломина М.В., Михайлов В.В., Цыбуля К.Г., Филиппов М.Ю. Эффективность коррекции ионосферных моделей по данным одного ионозонда

- вертикального радиозондирования в период низкой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 1. С. 85–93. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021010089>
- Тимченко А.В., Бессараб Ф.С., Клименко М.В., Радиевский А.В., Клименко В.В. Корреляционный анализ глобальных ионосферных карт полного электронного содержания в марте 2015 г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 62. № 3. С. 345–354. 2022.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022030191>
- Chen Y., Liu L., Wan W. Does the F10.7 index correctly describe solar EUV flux during the deep solar minimum of 2007–2009? // J. Geophys. Res. – Space. V. 116. A04304. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA016301>
- Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W. Revisiting the sunspot number: a 400-year perspective on the solar cycle // Space Sci. Rev. V. 186. № 1–4. P. 35–103. 2014.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0074-2>
- Goncharenko L.P., Tamburri C.A., Tobiska W.K., Schonfeld S.J., Chamberlin P.C., Woods T.N., Didkovsky L., Coster A.J., Zhang S.-R. A new model for ionospheric total electron content: The impact of solar flux proxies and indices // J. Geophys. Res. – Space. V. 126. № 2. e2020JA028466. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020JA028466>
- Gulyaeva T.L., Stanislawska I. Derivation of a planetary ionospheric storm index // Ann.-Geophysicae. V. 26. № 9. P. 2645–2648. 2008.
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-2645-2008>
- Gulyaeva T.L., Arian F., Stanislawska I. Probability of occurrence of planetary ionosphere storms associated with the magnetosphere disturbance storm time events // Adv. Radio Sci. V. 12. P. 261–266. 2014.
<https://doi.org/10.5194/ars-12-261-2014>
- Gulyaeva T.L., Arian F. Statistical discrimination of global post-seismic ionosphere effects under geomagnetic quiet and storm conditions // Geomat. Nat. Haz. Risk. V. 8. № 2. P. 509–524. 2017.
<https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1246483>
- Gulyaeva T.L., Gulyaev R.A. Coherent changes of solar and ionospheric activity during long-lived coronal mega-hole from Carrington rotation CR2165 to CR2188 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 179. P. 165–173. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.007>
- Gulyaeva T.L., Arian F., Sezen U., Poustovalova L.V. Eight proxy indices of solar activity for the International Reference Ionosphere and Plasmasphere model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 172. P. 122–128. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.025>
- Gulyaeva T.L., Haralambous H., Stanislawska I. Persistent perturbations of ionosphere at diminution of solar and geomagnetic activity during 21–24 solar cycles // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 221. Art. № 105706. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105706>
- Gulyaeva T.L., Stanislawska I., Lukianova R. Arctic–Antarctic asymmetry of the ionospheric weather // Adv. Space Res. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.05.008>
- Hathaway D.H. The Solar Cycle // Living Rev. Sol. Phys. V. 12. № 1. Art № 4. 2015.
<https://doi.org/10.1007/lrsp-2015-4>
- Herrndez–Pajares M., Juan J.M., Sanz J. et al. The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. V. 83. № 3–4. P. 263–275. 2009.
<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1>
- Laštovička J. The best solar activity proxy for long-term ionospheric investigations // Adv. Space Res. V. 68. № 6. P. 2354–2360. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.06.032>
- Lean J.L. Short term, direct indices of solar variability // Space Sci. Rev. V. 94. № 1–2. P. 39–51. 2000.
<https://doi.org/10.1023/A:1026726029831>
- Marques de Souza Franco A., Hajra R., Echer E., Bolzan M.J.A. Seasonal features of geomagnetic activity: a study on the solar activity dependence // Ann. Geophysicae. V. 39. № 5. P. 929–943. 2021.
<https://doi.org/10.5194/angeo-39-929-2021>
- Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., Morschhauser A. The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // Space Weather. V. 19. № 5. e2020SW002641. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002641>
- Nandy D., Muñoz–Jaramillo A., Martens P.C.H. The unusual minimum of sunspot cycle 23 caused by meridional plasma flow variations // Nature. V. 471. P. 80–82. 2011.
<https://doi.org/10.1038/nature09786>
- Nava B., Rodríguez–Zuluaga J., Alazo–Cuartas K., Kashcheyev A., Migoya–Orué Y., Radicella S.M., Amory–Mazaudier C., Fleury R. Middle- and low-latitude ionosphere response to 2015 St. Patrick’s Day geomagnetic storm // J. Geophys. Res. – Space. V. 121. № 4. P. 3421–3438. 2016.
<https://doi.org/10.1002/2015JA022299>
- Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The IONosphere Map Exchange Format: Version 1.1. // Darmstadt, Germany: ESA/ESOC. 2015. <ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf>
- Shue J.-H., Newell P.T., Liou K., Meng C.-I. Solar wind density and velocity control of auroral brightness under normal interplanetary magnetic field conditions // J. Geophys. Res. – Space. V. 107. № A12. 1428. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2001JA009138>
- Solanki S.K. Sunspots: an overview // Astron. Astrophys. Rev. V. 11. № 2–3. P. 153–286. 2003.
<https://doi.org/10.1007/s00159-003-0018-4>
- Solomon S.C., Qian L., Burns A.G. The anomalous ionosphere between solar cycles 23 and 24 // J. Geophys. Res. – Space. V. 118. № 10. P. 6524–6535. 2013.
<https://doi.org/10.1002/jgra.50561>
- Somaila K., Yacouba S., Louis Z.J. Solar wind and geomagnetic activity during two antagonist solar cycles: Comparative study between the solar cycles 23 and 24 // Int. J. Phys. Sci. V. 17. № 3. P. 57–66. 2022.
<https://doi.org/10.5897/IJPS2022.4998>
- Tapping K.F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7) // Space Weather. V. 11. № 7. P. 394–406. 2013.
<https://doi.org/10.1002/swe.20064>
- Viereck R.A., Floyd L.E., Crane P.C., Woods T.N., Knapp B.G., Rottman G., Weber M., Puga L.C., DeLand M.T. A composite Mg II index spanning from 1978 to 2003 // Space Weather. V. 2. № 10. S10005. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2004SW000084>
- Zerbo J.L., Richardson J.D. The solar wind during current and past solar minima and maxima // J. Geophys. Res. – Space. V. 120. № 12. P. 10250–10256. 2015.
<https://doi.org/10.1002/2015JA021407>