

ТРЕХЧАСОВЫЕ ИНДЕКСЫ ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. Т. Л. Гуляева^{1, *}, Х. Хараламбус^{2, **}¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия²Фредерик Исследовательский Центр, Никосия, Кипр

*e-mail: gulyaeva@izmiran.ru

**e-mail: eng.hh@frederick.ac.cy

Поступила в редакцию 24.02.2021 г.

После доработки 12.04.2021 г.

Принята к публикации 27.05.2021 г.

Предложена система локальных и глобальных 3-часовых индексов ионосферной активности, представляющих собой средневзвешенное значение положительных ионосферных возмущений W -индекса, отрицательных возмущений W -индекса и диапазон возмущений. Выполнен анализ глобальных 3-часовых индексов положительных возмущений ионосферы WU , отрицательных WL , и их диапазона $WE = WU - WL$ с 1994 по 2020 гг. по глобальным картам полного электронного содержания JPL GIM-TEC. По глобальным картам получена высокая корреляция между ионосферной и солнечной активностью ($r2 \cong 0.85$), в то время как геомагнитная возмущенность по kp -индексу показывает слабую корреляцию ($r2 \cong 0.47$) с солнечной и ионосферной активностью. Проведено ретроспективное исследование 3-часовых индексов локальной ионосферной возмущенности DU , DL и DE по критической частоте $foF2$ (максимальной плотности электронов $NmF2$) на станциях Москва, Слай-Чилтон, Канберра и Порт Стэнли с 1945 по 2020 гг. Наблюдается асимметрия трендов ионосферной активности в северном и южном полушариях: убывание 3-часовых индексов в Москве и Слай-Чилтон и рост ионосферной возмущенности в Канберре и Порт Стэнли. В то же время геомагнитная активность (kp -индекс) убывает в течение последних солнечных циклов, что может быть связано с расчетом планетарного kp -индекса по ограниченному числу станций, расположенных в основном в северном полушарии.

DOI: 10.31857/S0016794021060079

1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно принято изучать ионосферные возмущения как следствие возмущений в межпланетном пространстве и магнитосфере. Такой подход подтверждается многочисленными установленными зависимостями ионосферной реакции на геомагнитные бури [Danilov, 2013, и ссылки там]. Однако в ряде работ было показано, что положительные ионосферные возмущения с увеличением плотности электронов в максимуме слоя $F2$, $NmF2$, пропорциональной критической частоте $foF2$, и полного электронного содержания TEC наблюдаются во многих случаях ранее геомагнитных возмущений, т.е. ионосферные возмущения в этих случаях могут служить предвестником возмущений магнитного поля Земли [Immel and Mannucci, 2013; Gulyaeva and Mannucci, 2020]. Кроме того, специальная область литосферно-атмосферно-ионосферных связей рассматривает ионосферные возмущения в связи с землетрясениями, независимо от геомагнитных

возмущений [Пулинец и др., 2021; Oikonomou et al., 2021].

Для операторов космической связи и навигации важно знать, показывают ли ионосферные параметры ее обычное спокойное состояние, характерное для данного уровня солнечной активности, или они указывают на краткосрочные возмущения в ионосфере в связи с возмущениями на Солнце и в магнитосфере Земли [Hargood et al., 2021]. С этой целью в различных исследованиях, моделях космической среды и в операционных системах применяются на практике геомагнитные и ионосферные индексы [Mayaud, 1980; Perrone and De Franceschi, 1998; Гуляева, 1996; Jakowski, 2012; Перевалова и др., 2016; Gulyaeva, 2017; Nishioka et al., 2017; Gulyaeva et al., 2008, 2018, 2021; Brown et al., 2018; Wilken et al., 2018; Borries et al., 2020; Matzka et al., 2021]. В этих работах приводятся характеристики известных солнечных, геомагнитных и ионосферных индексов, включая их период наблюдений, размерность, географические координаты обсерваторий, поставляющих данные наблюдений, интервалы времени наблю-

дений. В то время как общедоступность известных геомагнитных индексов находит им широкое применение в научных исследованиях и на практике, ионосферные индексы находятся в процессе разработки [Borries et al., 2020, и ссылки там].

Ионосферные индексы, основанные на наблюдениях полного электронного содержания, *TEC*, применимы к текущим данным наблюдений и исследованиям, начиная с 1990 г. [Jakowski, 2012; Перевалова и др., 2016; Gulyaeva, 2017; Nishioka et al., 2017; Wilken et al., 2018; Borries et al., 2020]. Для характеристики долговременных изменений в ионосфере более пригодны индексы, основанные на данных измерений ионозондов, доступных начиная с 1940 г. [Perrone and De Franceschi, 1998; Гуляева, 1996; Nishioka et al., 2017; Gulyaeva et al., 2008, 2018, 2021; Brown et al., 2018]. Для успешного применения разработанных ионосферных индексов в ионосферных моделях и практике космической связи и навигации является их доступность в сети Интернет, подобно имеющимся геомагнитным индексам [Perrone and De Franceschi, 1998; Gulyaeva, 2017; Gulyaeva et al., 2008, 2018; Matzka et al., 2021].

В данной работе в рассмотрение впервые введены 3-часовые индексы ионосферной активности, которые могут обозначать локальные, региональные или глобальные условия в ионосфере. Целью работы является ретроспективное исследование ионосферной изменчивости с помощью 3-часовых ионосферных индексов и сравнение их с солнечной и геомагнитной активностью.

2. СПЕЦИФИКАЦИЯ ИНДЕКСОВ ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

Мониторинг ионосферы мировой сетью ионозондов и глобальной сетью приемников сигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС включает наблюдения ионосферных характеристик, их последующий анализ и прогноз космической погоды для радиосвязи и навигации. Для операторов космической связи и навигации важно знать, показывают ли ионосферные параметры ее обычное спокойное состояние, характерное для данного уровня солнечной активности, или они указывают на краткосрочные возмущения в ионосфере в связи с возмущениями на Солнце и в магнитосфере Земли [Nargood et al., 2021]. Подобно геомагнитным индексам, локальные изменения ионосферной погоды предложено градуировать *W*-индексом по четырем уровням для положительных и отрицательных логарифмических отклонений *foF2* (*NmF2*) или полного электронного содержания *TEC* от спокойного медианного значения [Gulyaeva et al., 2008, 2013; Гуляева и Станиславска, 2011]:

$W = 0$ отсутствие отклонений

$W = \pm 1$ спокойное состояние

$W = \pm 2$ умеренное возмущение

$W = \pm 3$ умеренная ионосферная буря или суббуря,

$W = \pm 4$ сильная ионосферная буря.

Положительный знак *W*-индекса относится к положительным ионосферным возмущениям, показывающим прирост электронной плотности *NmF2* или *TEC* по сравнению со спокойной медианой в фиксированный момент времени в указанном месте, а знак минус означает отрицательное ионосферное возмущение, т.е. падение плотности или содержания электронов в ионосфере по сравнению со спокойным уровнем. Нулевое значение индекса означает равенство измеренного значения спокойной медиане.

В отличие от 1-часовых индексов, 3-часовые индексы ионосферной активности позволяют отметить устойчивые изменения в ионосфере, длительностью 3 ч и более. Локальный или глобальный 3-часовой индекс ионосферной активности представляет собой средневзвешенное за каждые 3 часа мирового времени значение локального положительного ионосферного возмущения *DU* (глобальный индекс *WU*), отрицательного ионосферного возмущения *DL* (*WL*) и “диапазон возмущения” $DE = DU - DL$ ($WE = WU - WL$), обозначенных подобно индексам авроральной электроструи *AU*, *AL* и *AE* [Davis and Sugiura, 1966].

При переходе от 1-часовых ионосферных *W*-индексов к 3-часовым индексам необходимо учесть вклад каждого *W*-индекса в зависимости от его величины и расположения на глобусе. Для этого введены весовые коэффициенты, выраженные аналитически в работе [Gulyaeva et al., 2021]. Выбранные весовые коэффициенты, равные натуральному логарифму от абсолютной величины *W*, представлены на рис. 1. Отметим, что 3-часовые индексы за счет принятых весовых коэффициентов полностью относятся к возмущенным условиям в ионосфере, а спокойные условия ($W = 0$ и $W = \pm 1$) исключаются при их подсчете, поскольку $\ln(|\pm 1|) = 0$. Вес каждого последующего уровня *W*-индекса возрастает: $\ln(|\pm 2|) = 0.69$, $\ln(|\pm 3|) = 1.10$, $\ln(|\pm 4|) = 1.39$.

На рисунке 2 представлено изменение второго типа введенных весовых коэффициентов, которые меняются от 1 до 2 по мере изменения широты от экватора к полюсам. Эти изменения отражают известное распространение ионосферных возмущений от полюсов к экватору, таким образом, учтен наибольший вклад ионосферной возмущенности в высоких широтах в 3-часовые индексы.

Термин “локальный индекс” вводится для обозначения 3-часовых индексов, вычисленных по трем последовательным часовым значениям *W*-индекса из наблюдений критической частоты

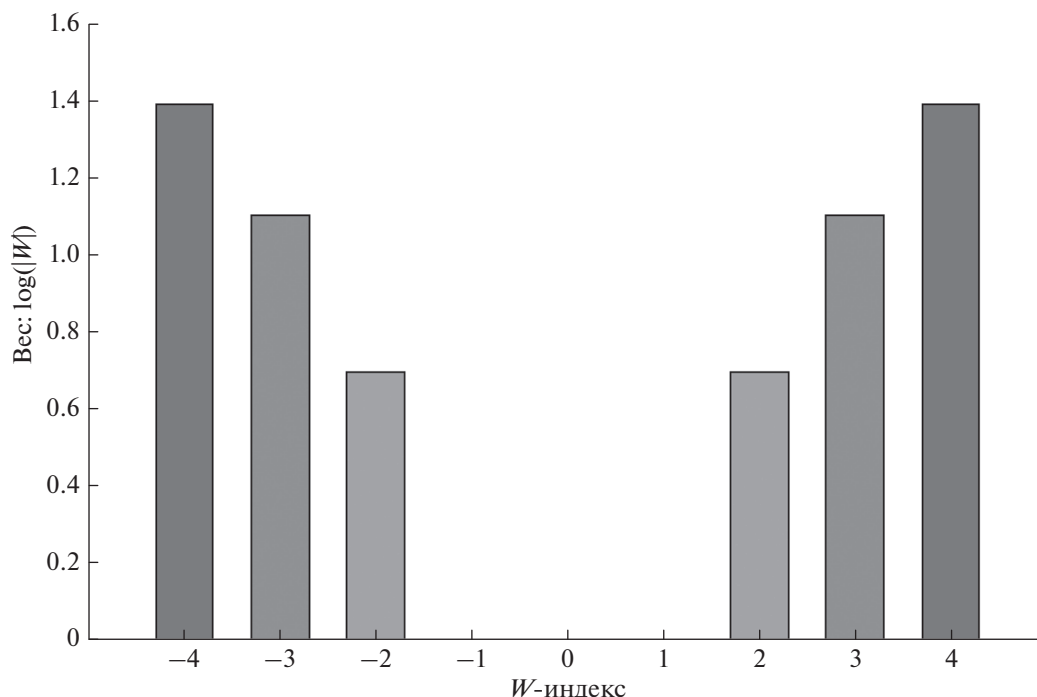


Рис. 1. Весовые коэффициенты, равные натуральному логарифму от абсолютной величины ионосферного W -индекса, используемые при расчете 3-часовых индексов.

$foF2$ для фиксированных координат (широты и долготы) выбранной ионосферной станции или приемника сигналов навигационных спутников, используемых для измерений TEC . “Глобальный индекс” представляет собой осреднение с указанными весовыми коэффициентами (рисунки 1 и 2) значений W -индекса ($W = \pm 2, \pm 3, \pm 4$) за 3 последовательных часа, наблюдаемых в узлах ежеhourных глобальных карт GIM-TEC. Глобальные карты GIM-TEC, построенные начиная с 1994 г., и соответствующие им карты GIM- W -индекса представлены в формате IONEX [Schaer et al., 2015] на широтах от $87.5^\circ S$ до $87.5^\circ N$ с шагом 2.5° , долготах от $180^\circ W$ до $180^\circ E$ с шагом 5° . “Региональные индексы” могут быть отнесены к любому региону в ионосфере, и алгоритм их вычисления подобен расчету “глобальных индексов” с ограничением по числу узлов в выбранном регионе. Результаты анализа 3-часовых локальных и глобальных ионосферных индексов представлены ниже.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

3.1. Ионосферные индексы в спокойных и возмущенных условиях

Пример наблюдаемой критической частоты $foF2$ и вычисленных по ней 1-часовых и 3-часовых ионосферных индексов приведен на рис. 3,

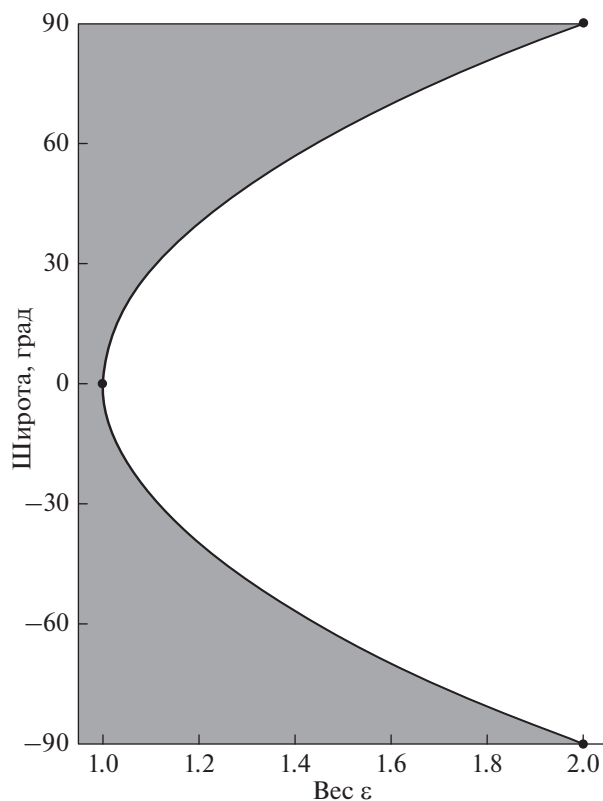


Рис. 2. Весовые коэффициенты, характеризующие вклад W -индекса в зависимости от широты, используемые при расчете 3-часовых индексов ионосферной активности.

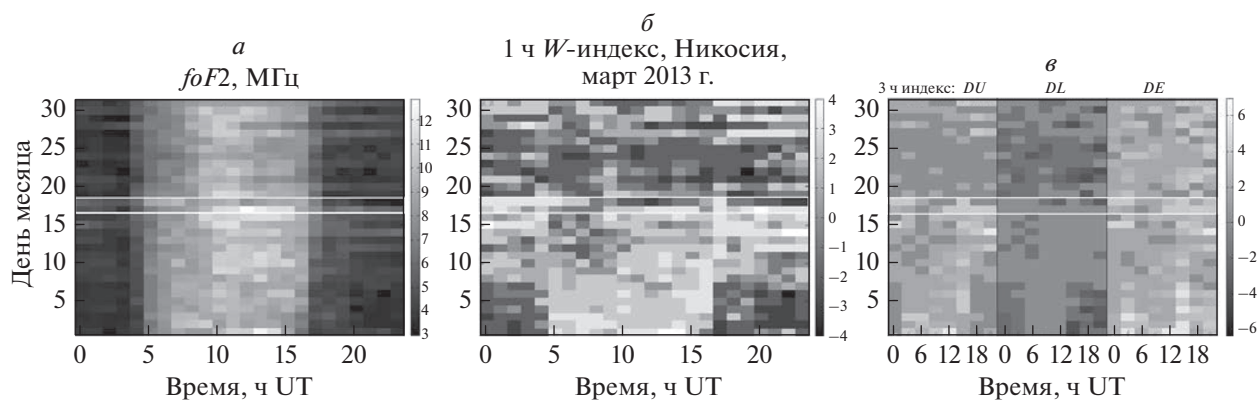


Рис. 3. Диаграмма суточных изменений наблюдаемой критической частоты $foF2$ в Никосии и вычисленных по ней 1-часовых и 3-часовых ионосферных индексов в марте 2013 г. (а) Критическая частота $foF2$ для каждого часа мирового времени; (б) 1-часовые значения W -индекса; (в) 3-часовые ионосферные индексы: DU (левая часть), DL (центральная часть) и DE (правая часть).

в котором представлены данные, полученные по наблюдениям дигизонда в Никосии (географическая широта 35.0° N, долгота 33.2° E) в течение марта 2013 г. Критическая частота $foF2$ показана ежедневно в течение месяца для каждого часа мирового времени на рис. 3а. Видно увеличение значений $foF2$ в дневные часы, в соответствии с ростом плотности электронов в ионосфере под действием солнечной радиации. 1-часовые значения W -индекса, представленные на рис. 3б, показывают картину чередования индексов от часа к часу и ото дня ко дню. Видно преобладание положительных возмущений в дневные часы в первой половине месяца, заметные периоды отрицательных возмущений ночью с 1 по 6 марта и аналогичные явления отрицательной возмущенности в основном днем с 20 по 25 марта. Более сглаженная картина ионосферной возмущенности видна на рис. 3в в 3-часовых ионосферных индексах: DU (левая часть), DL (центральная часть) и DE (правая часть). Здесь эффекты положительных возмущений DU , отрицательных возмущений DL и диапазонных возмущений DE могут быть видны в конкретные дни и конкретные 3-часовые интервалы, начинающиеся в 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 и 21 ч мирового времени. Белыми линиями выделен двухдневный интервал 17–18 марта 2013 г., более подробно рассмотренный в проявлениях космической бури на рис. 4а, б.

На рисунке 4а изображены параметры геомагнитно-ионосферной бури 17–18 марта 2013 г. (сверху вниз): напряженность B межпланетного магнитного поля ММП, B_z -компонента ММП, скорость солнечного ветра V_{sw} , геомагнитные индексы авральной электроструи AE и долготно-симметричный SYM/H -индекс по регистрации H -компоненты геомагнитного поля, эквивалентный Dst -индексу, предоставленные OMNI (https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_min_data.html).

Момент внезапного начала геомагнитной бури отмечен линией SSC (Storm Sudden Commencement), наблюдавшейся 17 марта 2013 г. в 6 ч мирового времени (<http://www.obsebre.es/en/rapid>). На рисунке 4б представлены 3-часовые ионосферные и геомагнитные индексы (сверху вниз): локальные DU , DL и DE -индексы в Москве и Никосии, глобальные ионосферные WU , WL и WE -индексы, и геомагнитный kp -индекс (<https://www.gfz-potsdam.de/kp-index/>). Видно внезапное начало геомагнитной бури в момент SSC (6 ч UT), при котором достигнут максимум $kp = 6.7$. В ионосфере наблюдается постепенное возрастание ионосферной возмущенности в Москве, начиная с 6 ч UT, достигшее максимума $DE = 8.0$ в 21 ч UT, и более умеренная реакция ионосферы на низкоширотной станции Никосия с максимумом $DE = 5.4$ в 15 ч UT. Отклик глобальной ионосферы также начинается с момента SSC и достигает пика $WE = 6.1$ в 9 ч UT. Таким образом, семейство 3-часовых ионосферных индексов отражает особенности отклика локальной и глобальной ионосферы на бурю в межпланетном пространстве.

3.2. Долговременные изменения локальных 3-часовых индексов

Рассмотрим изменение локальных 3-часовых ионосферных индексов по долговременным рядам наблюдений ионизондов на 4 станциях, координаты которых приводятся в табл. 1. Для анализа выбраны станции Слай-Чилтон, Канберра и Москва с многолетними рядами наблюдений в течение 17–25 циклов солнечной активности (СА). Станции Слай-Чилтон и Москва находятся в северном полушарии, а Канберра — в южном полушарии. В список станций включена также станция Порт Стэнли в южном полушарии,

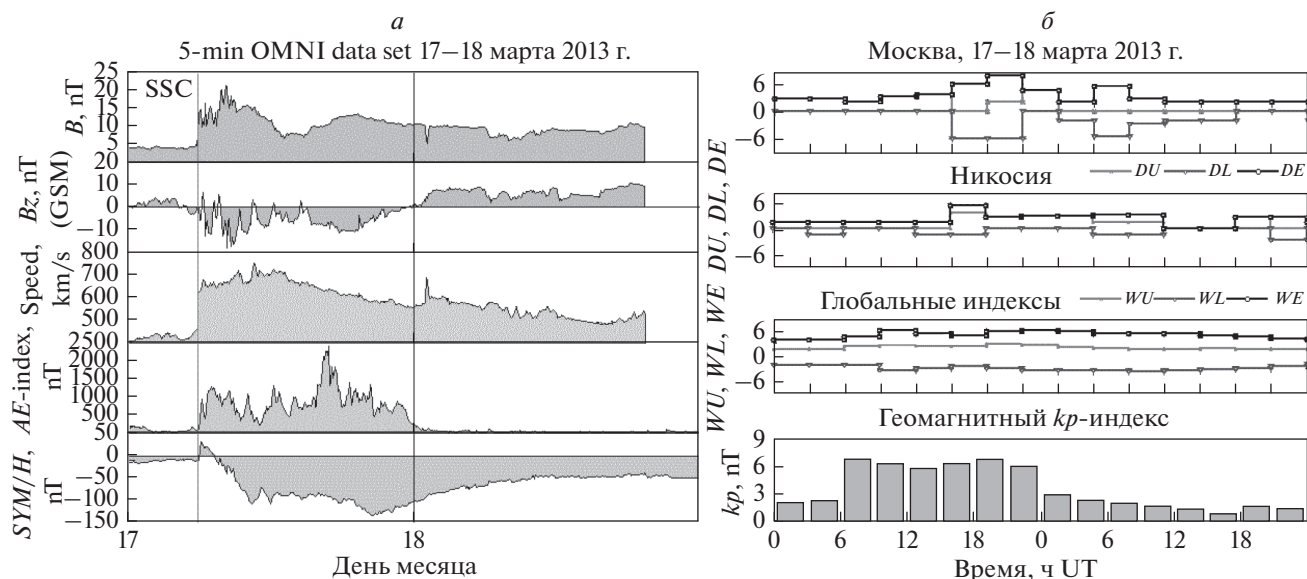


Рис. 4. Параметры геомагнитно-ионосферной бури 17–18 марта 2013 г. (а) сверху вниз: напряженность B межпланетного магнитного поля ММП, B_z -компонента ММП, скорость солнечного ветра V_{sw} , геомагнитные индексы авроральной электроструи AE и долготно-симметричный SYM/H -индекс; SSC – момент внезапного начала геомагнитной бури; (б) сверху вниз: 3-часовые локальные ионосферные индексы DU , DL и DE в Москве, индексы DU , DL и DE в Никосии, 3-часовые глобальные ионосферные индексы WU , WL и WE , геомагнитный Kp -индекс.

которая наряду со станциями Слау-Чилтон и Канберра является одной из базовых станций для вычисления ионосферного IG -индекса, соответствующего солнечной активности [Brown et al., 2018].

На рисунке 5 для выбранных четырех ионосферных станций показана частота появления отрицательных DL -индексов, спокойных условий (ноль на горизонтальной шкале) и положительных DU -индексов. Видно, что спокойные условия наблюдаются более чем в 50% случаев, а распределение возмущенных условий мало отличается на всех станциях. Ранее при долговременном анализе критических частот в Слау-Чилтон, Канберре и Москве было показано, что характер положительных ионосферных возмущений в области повышенной сейсмической активности отличается от изменений геомагнитной активности [Gulyaeva et al., 2017].

Соответствующее распределение частоты появления индексов диапазона DE показано на рис. 6 для тех же четырех станций за все годы их наблюдения. В данном случае спокойные условия наблюдаются менее чем в 20% случаев на всех станциях, что связано с несовпадением времени появления спокойных условий в DL - и DU -индексах. В то же время распределение возмущенных условий для индекса DE подобно для всех станций.

Рассмотрим многолетние тренды изменения среднегодовых значений диапазонных индексов DE и сравним их со среднегодовыми значениями 3-часового геомагнитного Kp -индекса. На рисунке 7а показаны результаты такого сравнения для двух станций в северном полушарии (Москва и Слау-Чилтон). На рисунке 7б показаны результаты сравнения для двух станций в южном полушарии (Канберра и Порт Стэнли). Из рисунка 7а следует, что в северном полушарии наблюдается оди-

Таблица 1. Географические и геомагнитные координаты ионосферных станций и период наблюдений, использованные при анализе долговременных изменений в ионосфере

| Станция | Код URSI | Географические | | Геомагнитные | | Период наблюдений, гг. |
|-------------|-------------|----------------|---------|--------------|----------|------------------------|
| | | Lati °N | Long °E | Mlat °N | Mlong °E | |
| Москва | MO155 | 55.5 | 37.3 | 50.4 | 123.2 | 1946–2020 |
| Слау-Чилтон | SL051-RL052 | 51.6 | –1.3 | 54.1 | 83.2 | 1944–2020 |
| Канберра | CB53N | –35.3 | 149.0 | –43.7 | –134.3 | 1945–2020 |
| Порт Стэнли | PSJ5J | –51.7 | –57.8 | –40.6 | 10.3 | 1957–2019 |

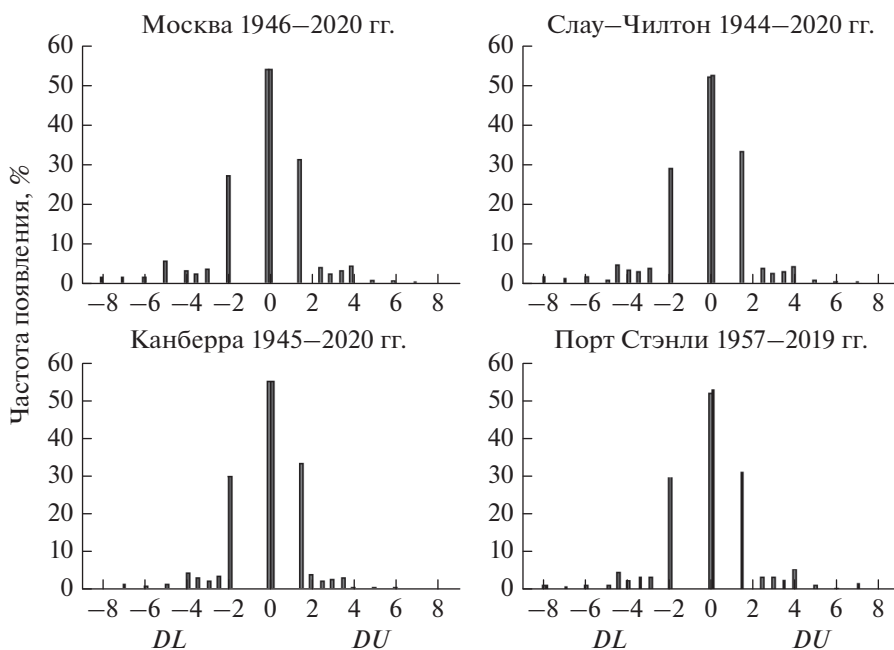


Рис. 5. Частота (в процентах) появления 3-часовых отрицательных DL -индексов и положительных DU -индексов ионосферной активности по многолетним наблюдениям критической частоты $foF2$ в Москве, Слау-Чилтон, Канберре и Порт Стэнли.

наковая направленность постепенного убывания геомагнитной и ионосферной активности, хотя наклон аппроксимирующей прямой линии убывания для геомагнитного kp -индекса значительно превосходит наклон отрицательного тренда ионосферных возмущений. Однако в южном полушарии наблюдаются разнонаправленные тренды изменения геомагнитной и ионосферной активности. В то время как геомагнитный kp -индекс убывает, ионосферная возмущенность возрастает на станциях Канберра и Порт Стэнли.

Отметим, что рост ионосферной возмущенности в южном полушарии наблюдается на фоне долговременных трендов убывания измеренных значений критической частоты $foF2$ в южном полушарии [Sharan and Kumar, 2021]. Тренд убывания геомагнитного kp -индекса подобен трендам убывания других геомагнитных индексов на фоне убывания солнечной активности [Gulyaeva et al., 2021]. Он может быть также связан с преобладающим расположением магнитометров в северном полушарии, измерения которых используются для вычисления планетарного kp -индекса [Vartels, 1949; Matzka et al., 2021]. Преимущество использования глобальной сети станций Интермагнет, расположенных в 113 обсерваториях по всему земному шару, для сопоставлений с поведением ионосферы во время геомагнитных бурь, было недавно показано в работе [Pei et al., 2021]. Однако для исследований долговременных трендов геомагнитной и ионосферной активности ис-

пользование сети Интермагнет не применимо, так как она функционирует недавно, с 2008 г.

Что касается асимметрии поведения ионосферной возмущенности в северном и южном полушариях, то она неоднократно отмечалась в литературе как по отношению к ионосфере, так и магнитосфере [Gulyaeva et al., 2014; Weygand et al., 2014; Laundal et al., 2017; Brown et al., 2018; Lockwood et al., 2018]. В обзоре Laundal et al. [2017] связывают эту асимметрию с различием ориентации географического и геомагнитного полюсов и разницей в магнитном поле двух полушаров, которые сказываются в асимметрии конвекции плазмы, нейтральных ветров, полного электронного содержания, исходящих потоков ионов, ионосферных токов и авроральных высыпаний. Подобная асимметрия в долговременных трендах ионосферной активности подтверждена в настоящей работе.

3.3. Глобальные ионосферные индексы в цикле солнечной активности

При анализе глобальных 3-часовых индексов ионосферной активности WU , WL , WE по картам GIM-W-индекса, полученным по картам GIM-TEC [Gulyaeva et al., 2013], была вычислена частота появления спокойного состояния (ниже уровня введенных пороговых значений ионосферной возмущенности) за период с 1994 по 2020 гг. В соответствии с описанием схемы расчета “глобаль-

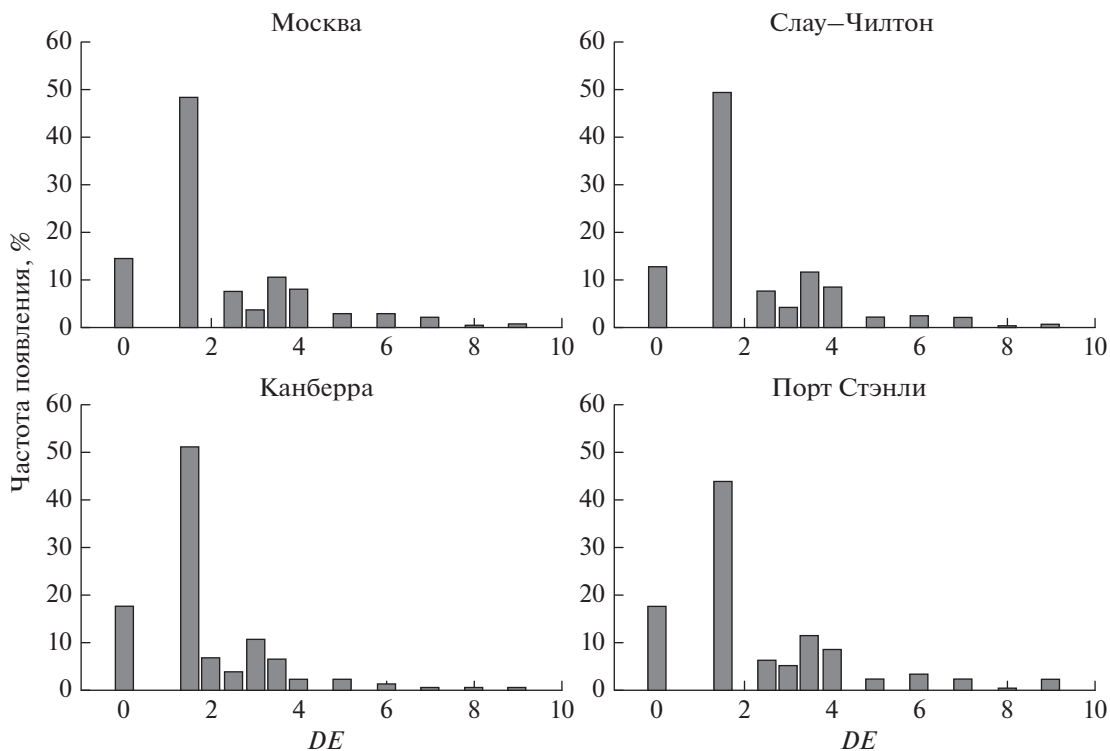


Рис. 6. Частота (в процентах) появления 3-часовых диапазонных DE -индексов ионосферной активности по многолетним наблюдениям критической частоты f_oF_2 в Москве, Слау-Чилтон, Канберре и Порт Стэнли.

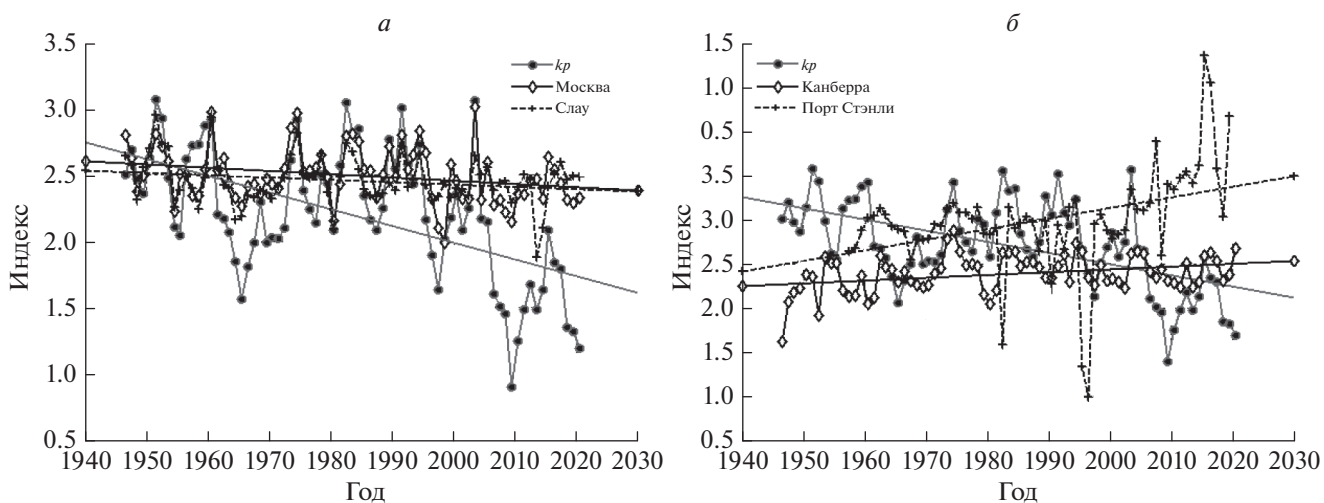


Рис. 7. Многолетние тренды среднегодовых значений диапазонных индексов DE и 3х-часового геомагнитного kp -индекса: (а) индекс kp и индекс DE для двух станций в северном полушарии (Москва и Слау-Чилтон); (б) индекс kp и индекс DE для двух станций в южном полушарии (Канберра и Порт Стэнли).

ного индекса” в Разделе 2, в 3-часовые индексы включены только значения $W = \pm 2, \pm 3, \pm 4$, при этом спокойное состояние из расчета исключено. Для оценки спокойного состояния обозначим символом Q параметр, представляющий процент появления “спокойных” индексов $W = 0$ и $W = \pm 1$ на трех последовательных часовых картах, ис-

пользуемых при подсчете глобальных WU -, WL - и WE - индексов.

Результаты приведены на рис. 8. В верхней панели показано изменение солнечной активности по 12-месячному сглаженному рекалиброванному числу солнечных пятен $SSN2$ (<http://sidc.oma.be/>

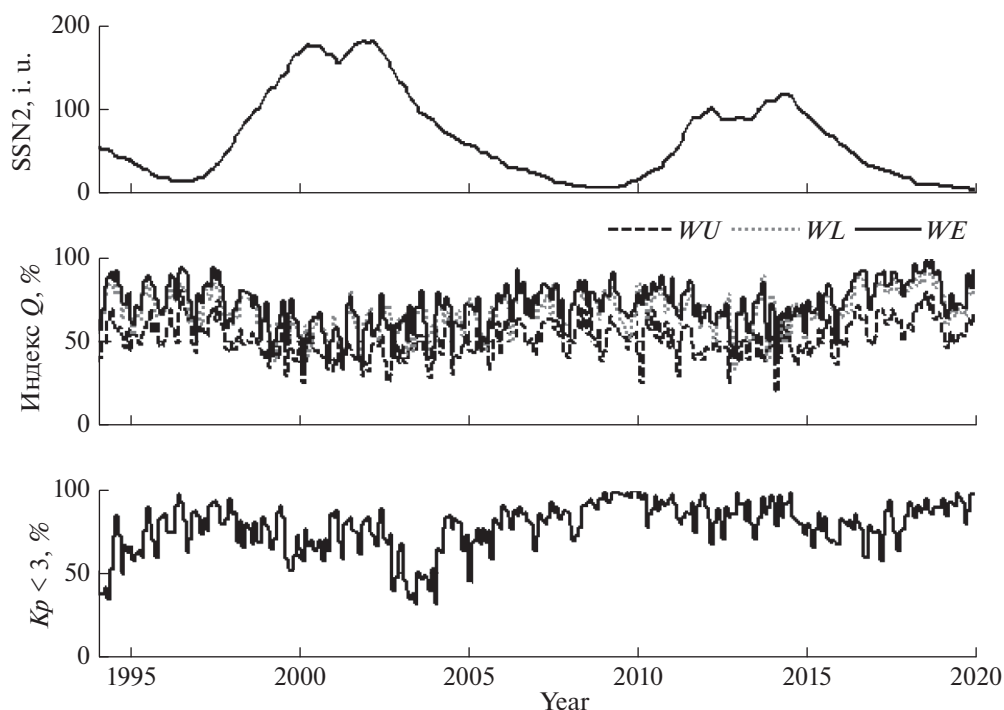


Рис. 8. Сравнение ионосферных и геомагнитных спокойных условий с солнечной активностью в 23–24 циклах: сглаженное 12-месячное число солнечных пятен $SSN2$ (верхняя панель); частота появления (в процентах) спокойных условий в ионосфере по глобальным 3-часовым индексам ионосферной активности WU , WL , WE (средняя панель); спокойные 3-часовые геомагнитные Kp -индексы, $Kp < 3$, (нижняя панель).

silso/). Результаты расчета индекса Q показаны на средней панели. Сравнение со спокойными 3-часовыми индексами геомагнитной активности Kp ($Kp < 3$, нижняя панель) показало, что ионосфера находится в спокойном состоянии (ниже уровня введенных пороговых значений ионосферной возмущенности) в 50–70% времени положительных возмущений WU и от 50 до 90% времени отрицательных WL и диапазонных возмущений WE . Численные оценки изменений глобальных 3-часовых индексов ионосферной возмущенности в сравнении с солнечной и геомагнитной активностью приводятся в табл. 2.

В отличие от рис. 8, где представлено сопоставление спокойных ионосферных и геомагнитных условий с солнечной активностью, в табл. 2

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между годовыми индексами ионосферной, геомагнитной и солнечной активности за период с 1994 по 2020 гг.

| Индекс | $SSN2$ | Kp | WU | WL | WE |
|--------|--------|------|------|------|------|
| $SSN2$ | 1.0 | 0.47 | 0.86 | 0.82 | 0.85 |
| Kp | | 1.0 | 0.47 | 0.48 | 0.51 |
| WU | | | 1.0 | 0.94 | 0.99 |
| WL | | | | 1.0 | 0.97 |
| WE | | | | | 1.0 |

представлены результаты корреляции между годовыми индексами числа солнечных пятен с годовой частотой появления возмущенных условий по 3-часовым ионосферным индексам и геомагнитному Kp -индексу для всего диапазона возмущений ($Kp \geq 3$). Отметим, что наилучшая корреляция наблюдается внутри семейства индексов ионосферной возмущенности (коэффициент корреляции 0.94 между WU и WL , 0.97 между WL и WE и 0.99 между WU и WE), что характеризует баланс между положительными WU и отрицательными ионосферными WL возмущениями и их диапазоном WE при подсчете глобальных показателей. Следующий уровень корреляции наблюдается между солнечной активностью и ионосферными возмущениями (коэффициент корреляции от 0.82 до 0.85), что свидетельствует о доминирующем влиянии солнечной активности на ионосферные возмущения. И, наконец, отметим слабую корреляцию геомагнитного Kp -индекса с солнечной и ионосферной активностью (коэффициент корреляции от 0.47 до 0.51). При расчете коэффициента корреляции между солнечной и геомагнитной активностью не был учтен сдвиг максимума геомагнитной активности к фазе спада солнечного цикла, когда возмущения обусловлены высокоскоростными потоками солнечного ветра [Matzka et al., 2021]. Этим отчасти объясняется слабая корреляция Kp -индекса с

солнечной активностью. Кроме того, она обусловлена трендом уменьшения геомагнитной активности в 23–24 солнечном цикле (рис. 7), в то время как в изменения солнечной и ионосферной активности наибольший вклад вносит периодическая 11-летняя цикличность (см. рис. 8, где видна антикорреляция спокойных ионосферных условий с формой солнечных циклов).

4. ВЫВОДЫ

В работе предложена система локальных и глобальных 3-часовых индексов ионосферной активности, представляющих собой средневзвешенное значение положительных ионосферных возмущений W -индекса, отрицательных возмущений W -индекса и диапазон этих возмущений. При подсчете 3-часовых индексов введены весовые коэффициенты для учета вклада умеренных возмущений, умеренных бурь и интенсивных ионосферных бурь и учета широтной зависимости ионосферных возмущений.

Выполнен анализ глобальных 3-часовых индексов положительных возмущений ионосферы WU , отрицательных возмущений WL , и их диапазона $WE = WU - WL$ с 1994 по 2020 гг. по глобальным картам полного электронного содержания JPL GIM-TEC. Получена высокая корреляция между ионосферной и солнечной активностью ($r^2 \cong 0.85$), в то время как геомагнитная возмущенность по kp -индексу показывает слабую корреляцию ($r^2 \cong 0.47$) с солнечной и ионосферной активностью.

Проведено ретроспективное исследование 3-часовых индексов локальной ионосферной возмущенности DU , DL и DE по критической частоте $foF2$ (максимальной плотности электронов $NmF2$) на станциях Москва, Слау, Канберра и Порт Стэнли с 1945 г. по 2020 г. Наблюдается асимметрия трендов ионосферной активности в северном и южном полушариях: убывание 3-часовых индексов в Москве и Слау-Чилтон и рост ионосферной возмущенности в Канберре и Порт Стэнли. В то же время геомагнитная активность kp -индекса убывает в течение последних солнечных циклов, что может быть связано с определением планетарного kp -индекса по ограниченной сети станций в основном северного полушария.

Таким образом, получены первые результаты анализа трендов ионосферной активности за несколько солнечных циклов по ионосферным наблюдениям критической частоты $foF2$ в течение 75 лет. Полученные результаты подтверждают полезность введенных 3-часовых ионосферных индексов для ретроспективных исследований ионосферной активности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-52-250001_Кипр_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF_Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 “Ретроспективное моделирование и прогноз ионосферной погоды” (RENAM).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность редактору журнала и уважаемым рецензентам статьи за уделенное время и внимание, а также за ценные замечания и предложения, которые позволили существенно улучшить содержательную часть и структуру нашей статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гуляева Т.Л. Логарифмическая шкала ионосферной возмущенности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 36. № 1. С. 160–163. 1996.
- Гуляева Т.Л., Станиславска И. Классификация ионосферной активности: от локальных индексов к списку ионосферно-плазмосферных бурь // Физика окружающей среды. Томск: ТГУ. С. 81–84. 2011.
- Перевалова Н.П., Едемский И.К., Тимофеева О.В. и др. Динамика возмущенности полного электронного содержания в высоких и средних широтах по данным GPS // Солнечно-земная физика. Т. 2. № 1. С. 36–43. 2016.
<https://doi.org/10.12737/13831>
- Пулинец С.А., Давиденко Д.В., Будников П.А. Метод когнитивной идентификации ионосферных предвестников землетрясений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 1. С. 103–114. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021010132>
- Bartels J. The standardized index K_s and the planetary index K_p // IATME Bull № 12b. P. 97. 1949.
- Borries C., Wilken V., Jacobsen K.S. et al. Assessment of the capabilities and applicability of ionospheric perturbation indices provided in Europe // Adv. Space Res. V. 66. № 3. P. 546–562. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.013>
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Ionosonde-based indices for improved representation of solar cycle variation in the International Reference Ionosphere model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 171. P. 137–146. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.022>
- Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. V. 52. № 3. P. 343–366. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.04.019>
- Davis T.N., Sugiura M. Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations. J. Geophys. Res. V. 71. P. 785–801. 1966.
<https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785>
- Gulyaeva T.L., Stanislawski I., Tomasik M. Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index // Ann. Geophysicae. V. 26. № 2. P. 315–321. <http://www.ann-geophys.net/26/315/2008/>. 2008.

- *Gulyaeva T.L., Arikan F., Hernandez-Pajares M., Stanislawski I.* GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 102. P. 329–340. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.06.011>
- *Gulyaeva T.L., Arikan F., Hernandez-Pajares M., Veselovsky I.S.* North-south components of the annual asymmetry in the ionosphere // *Radio Sci.* V. 49. № 7. P. 485–496. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2014RS005401>
- *Gulyaeva T.L.* Ranking ICME's efficiency for geomagnetic and ionospheric storms and risk of false alarms // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 164. P. 39–47. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.07.021>
- *Gulyaeva T., Arikan F., Stanislawski I.* Persistent long-term (1944–2015) ionosphere-magnetosphere associations at the area of intense seismic activity and beyond // *Adv. Space. Res.* V. 59. N 4. P. 1033–1040. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.022>
- *Gulyaeva T.L., Arikan 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., Mannucci A.J.* Echo of ring current storms in the ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 205. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105300>
- *Gulyaeva T.L., Haralambous H., Stanislawski I.* Persistent perturbations of ionosphere at diminution of solar and geomagnetic activity during 21–24 solar cycles // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 221. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105706>
- *Hapgood M., Angling M.J., Attrill G. et al.* Development of space weather reasonable worst-case scenarios for the UK National Risk Assessment // *Space Weather.* V. 19. № 4. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002593>
- *Immel T.J., Mannucci A.J.* Ionospheric redistribution during geomagnetic storm // *J. Geophys. Res. Space.* V. 118. P. 1–12. 2013.
<https://doi.org/10.1002/2013JA018919>
- *Jakowski N., Borries C., Wilken V.* Introducing a disturbance ionosphere index // *Radio Sci.* V. 47. RS0L14. 2012.
<https://doi.org/10.1029/2011RS004939>
- *Laundal K.M., Cnossen I., Milan S.E. et al.* North-South asymmetries in Earth's magnetic field. effects on high-latitude geospace // *Space Sci. Rev.* V. 206. № 1–4. P. 225–257. 2017.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0273-0>
- *Lockwood M., Finch I.D., Chambodut A., Barnard L.A., Owens M.J., Clarke E.* A homogeneous aa index: 2. Hemispheric asymmetries and the equinoctial variation // *J. Space Weather Space Clim.* V. 8. A58. 2018.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018044>
- *Matzka J., Stolle C., Yamazaki Y., Bronkalla O., Morschhauser A.* The geomagnetic Kp index and derived indices of geomagnetic activity // *Space Weather.* V. 19. 2021.
<https://doi.org/10.1029/2020sw002641>
- *Mayaud P.N.* Derivation, meaning and use of geomagnetic indices // *Geophys. Monogr. Ser.* 22. Washington D.C.: AGU. 1980.
- *Nishioka M., Tsugawa T., Jin H., Ishii M.* A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics // *Space Weather.* V. 15. P. 228–239. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001536>
- *Oikonomou C., Haralambous H., Pulnits S. et al.* Investigation of pre-earthquake ionospheric and atmospheric disturbances for three large earthquakes in Mexico // *Geosciences.* V. 11. P. 16.
<https://doi.org/10.3390/geosciences11010016,2021>
- *Pei N., Wu Y., Su R., Li J., Wang Y., Li X., Wu Z.* Global-scale coupling characteristics between geomagnetic storms and ionospheric disturbances // *Geomagn. Aeron.* V. 61. № 4. P. 632–647. 2021.
<https://doi.org/10.1134/S0016793221040101>
- *Perrone L., De Franceschi G.* Solar, ionospheric and geomagnetic indices // *Ann. Geophys.* V. 41. P. 843–855. 1998.
<https://doi.org/10.4401/ag-3824>
- *Schaer S., Gurtner W., Feltens J.* IONEX: The IONosphere Map Exchange Format: Version 1.1.: Darmstadt Germany: ESA/ESOC. <ftp.aiub.unibe.ch/ionex/draft/ionex11.pdf>. 2015.
- *Sharan A., Kumar S.* Long-term trends of the F2-region at mid-latitudes in the Southern Hemisphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 220. 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105683>
- *Weygand J.M., Zesta E., Troshichev O.* Auroral electrojet indices in the Northern and Southern Hemispheres: A statistical comparison // *J. Geophys. Res. Space.* V. 119. № 6. P. 4819–4840. 2014.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019377>
- *Wilken V., Kriegel M., Jakowski N., Berdermann J.* An ionospheric index suitable for estimating the degree of ionospheric perturbations // *J. Space Weather Space Clim.* V. 8. A19. 2018.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2018008>