

ЗАВИСИМОСТЬ ЛОКАЛЬНОГО ИНДЕКСА ГОДОВОЙ АСИММЕТРИИ ДЛЯ $NmF2$ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. М. Г. Деминов¹, *, Г. Ф. Деминова¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 21.11.2022 г.

Принята к публикации 28.11.2022 г.

На основе данных медиан электронной концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ пары ионосферных станций Боулдер–Хобарт за 1963–2013 гг. проведен анализ зависимости локального индекса годовой асимметрии R от местного времени и солнечной активности, где индекс R – отношение январь/июль суммарной концентрации $NmF2$ (для этой пары станций) в фиксированное местное время. В качестве индикатора солнечной активности для медианы $NmF2$ использован индекс F – среднее за 81 день значение потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, которое центрировано на середину данного месяца. Получено, что в зависимости индекса R от местного времени LT преобладает полусуточная мода с максимумами вблизи полудня и полуночи и минимумами утром и вечером. Самые низкие значения $R = 1$ наблюдаются при низкой солнечной активности в узком интервале 19.0–19.5 LT. Годовая асимметрия в медиане $NmF2$ существует ($R > 1$) для всех остальных часов местного времени при любом уровне солнечной активности. Вблизи полудня индекс R увеличивается с солнечной активностью с тенденцией к насыщению при высоком уровне этой активности. Вблизи полуночи в зависимости индекса R от F наблюдается максимум для $F = 140$, при превышении которого R уменьшается с ростом F . Высокие значения индекса R в полдень и полночь, в основном, обусловлены относительно высокими значениями $NmF2$ в январе в Северном полушарии (местной зимой, Боулдер) в полдень и в Южном полушарии (местным летом, Хобарт) в полночь.

DOI: 10.31857/S0016794022600636, EDN: DKZACT

1. ВВЕДЕНИЕ

Годовая асимметрия (годовая аномалия) – это ионосферные явления, в которых глобально усредненная концентрация электронов в январе больше, чем в июле [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. Для выделения этой асимметрии используют концентрацию максимума $F2$ -слоя $NmF2$ по данным сети ионосферных станций [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018], внешнего зондирования ионосферы [Gulyaeva et al., 2014] или по данным радиозатменных измерений на спутниках FORMOSAT-3/COSMIC [Zeng et al., 2008; Sai Gowtam and Tulasi Ram, 2017a]. Кроме того, используют полное электронное содержание ионосферы [Mendillo et al., 2005; Zhao et al., 2007; Gulyaeva et al., 2014] или высотное распределение концентрации электронов в области F ионосферы [Sai Gowtam and Tulasi Ram, 2017b]. В качестве индекса этой асимметрии, например, для $NmF2$, используют

отношение [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015]

$$R = NmF2(N + S)_{Jan} / NmF2(N + S)_{July} \quad (1)$$

или относительную амплитуду [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Brown et al., 2018]

$$AI = (NmF2(N + S)_{Jan} - NmF2(N + S)_{July}) / (NmF2(N + S)_{Jan} + NmF2(N + S)_{July}), \quad (2)$$

где $NmF2(N + S)_{Jan}$ и $NmF2(N + S)_{July}$ – суммарные (по Северному и Южному полушариям) значения $NmF2$ в январе и июле в фиксированное местное время. Обычно в этих уравнениях используют средние за месяц или медианы за месяц $NmF2$ [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018]. Ниже для определенности использован индекс R для медиан $NmF2$ за месяц. Для оценки величины AI по известному индексу R можно использовать соотношение $AI = (R - 1) / (R + 1)$.

Для получения индекса R по данным ионосферных станций обычно выбирают несколько пар ионосферных станций для охвата достаточно большого интервала широт, и каждая из этих пар состоит из станций на близких геомагнитных широтах в Южном и Северном полушариях. По данным этих станций последовательно вычисляют локальные индексы R для каждой пары станций и среднее по всем выбранным парам станций значение R . Это среднее значение R и есть глобальный индекс R по данным ионосферных станций. Для получения корректной оценки R обычно требуют, чтобы $NmF2$ соответствовали фиксированному уровню (или интервалу) солнечной активности. На фазах роста и спада солнечного цикла это требование редко удовлетворяется, поскольку за интервал в половину года (с января по июль) изменения индекса солнечной активности обычно значительны. Поэтому основная доля работ по анализу причин годовой асимметрии в $NmF2$ была выполнена для периодов продолжительной низкой солнечной активности, когда индексы солнечной активности не сильно различались [Zeng et al., 2008; Mikhailov and Perrone, 2015; Lei et al., 2016; Dang et al., 2017].

Один из путей решения этой проблемы, предложенный нами, связан с использованием достаточно большого массива данных $NmF2$ для фиксированного местного времени с целью получения эмпирических зависимостей $NmF2$ от солнечной активности в январе и июле для каждой из пар анализируемых станций [Демин и Демина, 2021]. В результате может быть определена зависимость индекса R от солнечной активности для данного часа местного времени. При этом исчезает проблема разных уровней солнечной активности в январе и июле в конкретный год, поскольку в данном случае зависимость R от солнечной активности означает, что индекс R определен для каждого фиксированного значения этой активности.

Предлагаемый метод был реализован на примере получения зависимости индекса R (или индекса AI) от солнечной активности в полдень для конкретной пары ионосферных станций [Демин и Демина, 2021]. Продолжение этих исследований для получения зависимости локального индекса R от солнечной активности для всех часов местного времени было главной целью данной работы. Следует отметить, что ранее индекс AI был получен для полуночи и полудня для ряда фиксированных значений среднего уровня солнечной активности [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. Поэтому вопрос о получении зависимости индекса R (или AI) от местного времени и солнечной активности по экспериментальным данным оставался в значительной степени открытым.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для анализа использованы данные медиан $foF2$ станций Боулдер (Boulder, 40.0° N, 254.7° E, $\Phi = 48.6^\circ$ N, $\Phi^* = 49.1^\circ$ N) и Хобарт (Hobart, 42.9° S, 147.3° E, $\Phi = 50.9^\circ$ S, $\Phi^* = 54.3^\circ$ S) для каждого часа мирового времени для января и июля в интервале 1963–2013 гг. В скобках даны координаты этих станций: географическая широта, географическая долгота, геомагнитная широта Φ и исправленная геомагнитная широта Φ^* . Широты Φ и Φ^* приведены для 1985 г., что примерно соответствует середине анализируемого интервала времени. Эти широты получены с помощью моделей, приведенных в Интернете (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/gggm, omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo). Выбор этой пары станций для анализа локальных свойств годовой асимметрии связан с близостью абсолютных значений как географических, так и геомагнитных широт станций. Следует отметить, что медианы $NmF2$ данной пары станций совместно с данными других пар станций ранее использовались для анализа глобальных свойств годовой асимметрии [Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018].

В качестве индикатора солнечной активности для медианы $NmF2$ за месяц использован индекс F – среднее за 81 день значение потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, которое центрировано на середину данного месяца [Демин и Демина, 2021].

Для определения зависимости медиан $NmF2$ от солнечной активности для каждой из станций в январе или июле в каждый час мирового времени (UT) использовалось уравнение регрессии

$$NmF2 = a_0 + a_1 F + a_2 F^2. \quad (3)$$

Коэффициенты этого уравнения определялись по массиву данных медиан $foF2$ за 1963–2013 гг. для выбранных условий. На этот массив были наложены дополнительные условия. В нем были оставлены только случаи, которые удовлетворяли условиям

$$2 < foF2 < 20 \text{ МГц}, \quad 80 < F < 220. \quad (4)$$

Первое из условий позволяет исключить особенно сильные выбросы $foF2$, которые могут носить случайный характер. Второе из условий позволяет исключить относительно редко встречающиеся уровни солнечной активности для получения, по возможности, устойчивых тенденций в зависимости концентрации максимума $F2$ -слоя от солнечной активности. Массив данных $foF2$, полученный с учетом перечисленных условий, был преобразован в массив данных $NmF2$, поскольку $NmF2 = 1.24 \times 10^{10} (foF2)^2$, где $NmF2$ измеряется в $1/\text{м}^3$, $foF2$ – в МГц. Этот массив данных $NmF2$ был исходным для определения коэффициентов уравнения регрессии (3), т.е. получения эмпириче-

ской модели зависимости медиан $NmF2$ от солнечной активности для выбранных условий. Предварительный анализ показал, что в некоторых случаях число измерений N в этом массиве недостаточно для получения значимых зависимостей $NmF2$. Например, для ст. Хобарт в 14 UT (что примерно соответствует полуночи) для июля число доступных медиан $foF2$ для интервала 1963–2013 гг. равно 14. Поэтому для получения коэффициентов уравнения регрессии (3) для каждого из выбранных условий (станция, месяц года, мировое время, интервал 1963–2013 гг.) использовались доступные медианы $foF2$ в данный час, предыдущий и последующий час мирового времени с учетом дополнительных условий (4). В результате число измерений N было увеличено примерно в 3 раза. Для приведенного выше примера (ст. Хобарт в 14 UT для интервала 1963–2013 гг.) $N = 47$, что в 3.4 раза больше предыдущего варианта.

Некоторые статистические характеристики уравнений регрессии (3) приведены в табл. 1. Из данных в табл. 1 видно, что число измерений N для рассмотренных случаев было достаточно большим и изменялось от 130 до 47. В полдень коэффициент корреляции K местной зимой больше, чем местным летом, из-за более сильной зависимости $NmF2$ от F местной зимой. В полночь картина противоположная: коэффициент корреляции K местным летом больше, чем местной зимой, из-за более сильной зависимости $NmF2$ от F местным летом. Из приведенных значений N и K следует, что зависимости (3) значимы для всех рассмотренных случаев при доверительном уровне 99% [Ramachandran and Tsokos, 2009]. Анализ показал, что зависимости (3) значимы и для каждого часа мирового времени в январе и июле (и во все остальные месяцы года) для данных ст. Боулдер и ст. Хобарт.

Уравнения регрессии (3) с известными коэффициентами позволяют по уравнению (1) получить зависимость локального индекса R от местного времени LT для разных уровней солнечной активности для анализируемой пары станций. Результат показан на рис. 1 для низкой ($F = 100$) и высокой ($F = 180$) солнечной активности, где дискретные (ежечасные) зависимости R от LT аппроксимированы рядом Фурье четвертой степени для наглядности. Из данных на этом рисунке следует, что в зависимости R от LT преобладает полусуточная мода с максимумами вблизи полудня и полуночи и минимумами утром и вечером. Индекс R для высокой солнечной активности больше, чем для низкой солнечной активности, для интервала $08 < LT < 24$. Здесь и ниже местное время приведено в часах. Для интервала $00 < LT < 08$ наблюдается противоположная тенденция. Самые низкие значения $R = 1$ наблюдаются при низкой солнечной активности в узком интервале

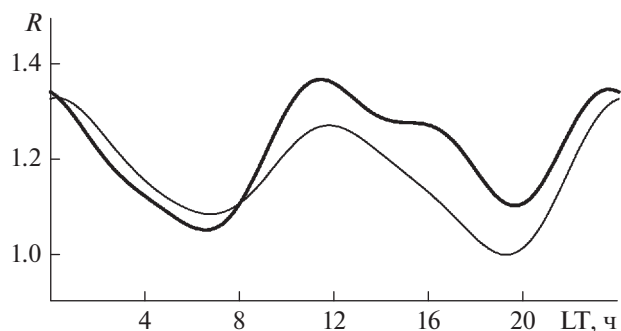


Рис. 1. Зависимость локального индекса годовой асимметрии R от местного времени LT для низкой ($F = 100$, тонкая линия) и высокой ($F = 180$, толстая линия) солнечной активности.

19.0–19.5 LT. Годовая асимметрия в медиане $NmF2$ существует ($R > 1$) для всех остальных приведенных на рис. 1 случаев. Эта асимметрия максимальна для высокой солнечной активности вблизи полудня ($R = 1.37$ для $LT = 11.5$) и полуночи ($R = 1.35$ для $LT = 23.5$).

На рисунке 2 показаны зависимости локального индекса годовой асимметрии R от индекса солнечной активности F для фиксированных часов местного времени. Они получены с помощью уравнений регрессии (3) по данным анализируемой пары станций за 1963–2013 гг. Из данных на этом рисунке следует, что в дневные часы индекс R увеличивается с солнечной активностью с общей тенденцией к насыщению этого увеличения при высокой солнечной активности. Индекс R в полдень больше, чем в 10 и 14 LT, для всего интервала изменений индекса F . Следовательно, максимум R вблизи полудня в зависимости R от LT существует при любом уровне солнечной активности (см. рис. 1). Из данных на рисунке 2 следует, что в 00, 02 и 04 LT в зависимости R от F наблюдается максимум, при превышении которого

Таблица 1. Статистические характеристики уравнений регрессии (3) для анализируемых условий в январе ($nm = 1$) и июле ($nm = 7$) в полдень и полночь: стандартное отклонение σ (в 10^{11} м^{-3}), коэффициент корреляции K , число измерений N

nm	Боулдер			Хобарт		
	σ	K	N	σ	K	N
	Полдень (LT = 12)					
1	0.8	0.99	126	0.7	0.90	119
7	0.5	0.92	125	0.9	0.96	125
nm	Полночь (LT = 00)					
	σ	K	N	σ	K	N
	Полночь (LT = 00)					
1	0.2	0.79	121	0.7	0.90	96
7	0.4	0.95	130	0.2	0.78	47

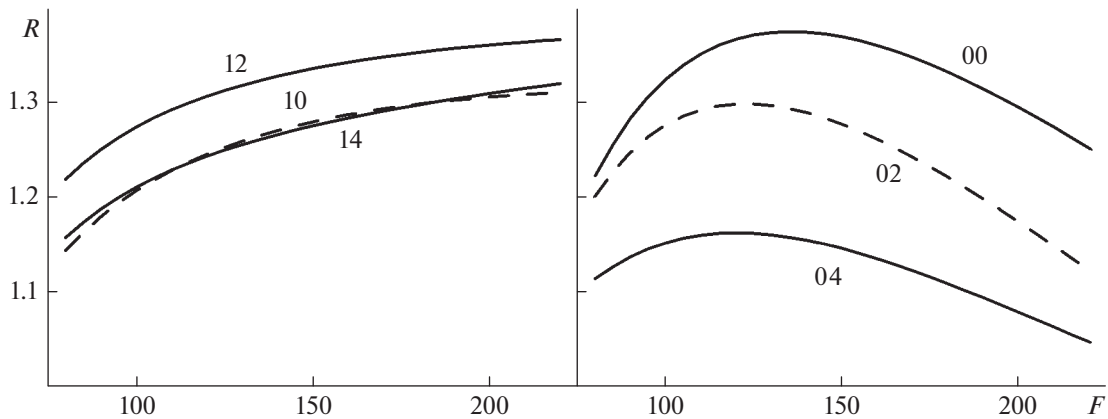


Рис. 2. Зависимости локального индекса годовой асимметрии R от индекса солнечной активности F для фиксированных часов местного времени (цифры у кривых).

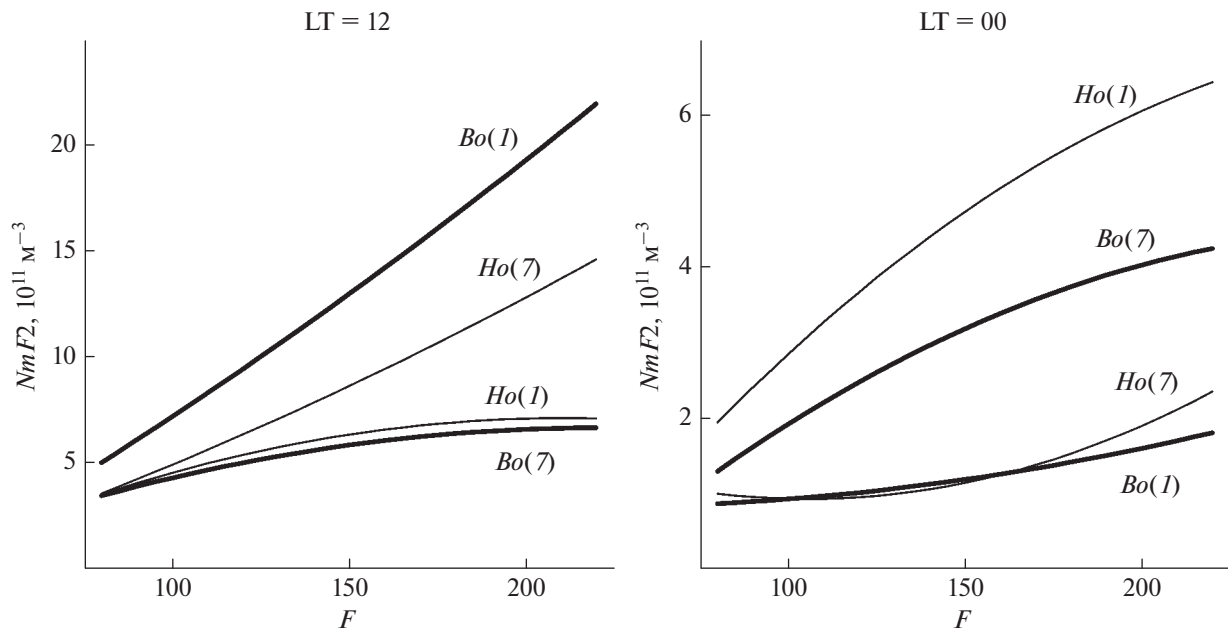


Рис. 3. Зависимости медиан $NmF2$ от индекса солнечной активности F в полдень ($LT = 12$) и полночь ($LT = 00$) в январе (I) и июле (7) для станций Боулдер (Bo, толстые линии) и Хобарт (Ho, тонкие линии).

индекс R уменьшается с ростом F . Этот максимум наблюдается для $F = 140$ в 00 LT и для $F = 120$ в 02 и 04 LT. Более детальный анализ показал, что такой максимум существует в интервале 23–06 LT. Наблюдаемая на рис. 1 тенденция, когда в интервале $00 < LT < 08$ индекс R для $F = 180$ меньше, чем для $F = 100$, также связана с максимумом в зависимости R от F . Выше отмечалось, что максимум в зависимости R от LT вблизи полуночи наблюдается для низкой ($F = 100$) и высокой ($F = 180$) солнечной активности. Более детальный анализ показал, что максимум в зависимости R от LT в 23–24 LT характерен почти для всего анализируемого интервала изменения индекса солнечной актив-

ности ($80 < F < 220$). Исключение может составлять граница этого интервала ($F > 200$), для которой данные недостаточно надежны.

На рисунке 3 приведены зависимости медиан $NmF2$ от солнечной активности, полученные по уравнениям регрессии (3) в полдень и полночь в январе и июле. Эти зависимости позволяют определить дополнительные свойства локального индекса R , поскольку являются элементами этого индекса.

Из данных на этом рисунке можно видеть, что в полдень: а) местным летом концентрации $NmF2$ почти совпадают для анализируемой пары станций при любом уровне солнечной активности;

б) летом зависимость $NmF2$ от солнечной активности слабее, чем зимой; в) местной зимой концентрация $NmF2$ для Боулдера больше, чем для Хобарта, при любом уровне солнечной активности, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Следовательно, относительно высокие значения индекса R в полдень и увеличение этого индекса с ростом солнечной активности обусловлены в основном тем, что $NmF2$ в январе в Боулдере больше, чем в июле в Хобарте, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности.

Из данных на рис. 3 можно видеть, что в полночь: а) местной зимой для $F < 175$ величины $NmF2$ совпадают для анализируемой пары станций и почти не зависят от солнечной активности; $NmF2$ в Хобарте становится больше, чем в Боулдере, для $F > 175$; б) местным летом концентрация $NmF2$ для Хобарта больше, чем для Боулдера, при любом уровне солнечной активности, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Следовательно, относительно высокие значения индекса R в полночь обусловлены в основном тем, что $NmF2$ в январе в Хобарте больше, чем в июле в Боулдере. Нелинейная зависимость индекса R от F в полночь связана с дополнительным вкладом зимних значений $NmF2$ в R при высокой солнечной активности. Итак, высокие значения индекса R в полдень и полночь в основном обусловлены относительно высокими значениями $NmF2$ в январе в Северном полушарии (местной зимой, Боулдер) в полдень и в Южном полушарии (местным летом, Хобарт) в полночь.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Использование уравнения регрессии в виде полинома второй степени (3) для учета зависимости $NmF2$ от индекса F приводит к зависимости индекса R от F с одним максимумом для всех приведенных на рис. 2 случаев. Дополнительный анализ показал, что увеличение степени полинома в этом уравнении регрессии приводит к более сложной зависимости R от F , но общая картина этой зависимости сохраняется.

В ночные часы изменение $NmF2$ со временем определяется суммой двух факторов: уменьшением $NmF2$ после захода Солнца из-за рекомбинации и диффузии и дополнительным увеличением $NmF2$ из-за диффузионного потока плазмы из плазмосферы [Кринберг и Ташилин, 1984]. Вклад первого фактора увеличивается с ростом солнечной активности, вклад второго фактора почти не зависит от солнечной активности. В полночь местной зимой второй фактор обычно является основным, когда $NmF2$ почти не зависит от солнечной активности. Исключение составляют периоды очень высокой солнечной активности, когда первый фактор становится заметным и $NmF2$

увеличивается с ростом солнечной активности (см. рис. 3). В полночь местным летом второй фактор не важен и $NmF2$ увеличивается с ростом солнечной активности. В полночь $NmF2$ местным летом больше, чем зимой, и, кроме того, местным летом в январе (в Южном полушарии) больше, чем в июле (в Северном полушарии). В этом заключается годовая асимметрия $NmF2$ в полночь для анализируемой пары станций. Разный характер зависимости $NmF2$ от солнечной активности местной зимой и летом приводит к нелинейной зависимости индекса этой асимметрии R от F с максимумом R для $F = 140$ в полночь (см. рис. 2).

В дневные часы концентрация $NmF2$ увеличивается с ростом солнечной активности во все сезоны из-за важности ионизационно-рекомбинационные процессов. Местной зимой в полдень увеличение $NmF2$ с ростом F более значительно, чем местным летом. Кроме того, в полдень $NmF2$ местной зимой в январе (в Северном полушарии) больше, чем в июле (в Южном полушарии). В этом заключается годовая асимметрия $NmF2$ в полдень для анализируемой пары станций.

Проблема годовой асимметрии в $NmF2$ хорошо известна (см., например, [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]). Учет только разницы в скорости ионизации атмосферы в январе и июле из-за эллиптичности орбиты Земли вокруг Солнца дает $R = 1.07$ (или $AI = 0.034$) в полдень. Данные на рис. 1 показывают гораздо более высокие значения этого индекса: $R = 1.35–1.37$ вблизи полуночи и полудня при высокой солнечной активности. Для полудня на средних широтах этот вывод не противоречит другим результатам анализа $NmF2$ по данным ионосферных станций [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Brown et al., 2018]. На основе решения обратных задач и моделирования были предложены различные объяснения годовой асимметрии $NmF2$, в которых отмечалась важная роль фотохимических и динамических процессов в атмосфере [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Zeng et al., 2008; Mikhailov and Perrone, 2015; Lei et al., 2016; Dang et al., 2017]. Отмечалось, что эти процессы важны во все часы суток, обеспечивая относительно высокую амплитуду годовой асимметрии в $NmF2$ в дневные и ночные часы [Dang et al., 2017]. Анализ причин годовой асимметрии в $NmF2$ выходит за рамки данной работы. Мы стремились получить новые знания о закономерностях этой асимметрии по данным медиан $NmF2$ анализируемой пары станций. Наиболее важная из этих закономерностей: в изменении индекса R в течение суток преобладает полусуточная мода с максимумами вблизи полудня и полуночи практически независимо от уровня солнечной активности.

Широко известная эмпирическая модель IRI [Bilitza, 2015] позволяет получить индекс годовой

асимметрии R для анализируемой пары станций при заданном значении индекса солнечной активности F , поскольку содержит так называемые карты ITU-R для вычисления медианных за месяц значений критической частоты $F2$ -слоя $foF2$. Эти карты основаны на пионерских работах [Jones and Gallet, 1962, 1965]. Численные коэффициенты карт ITU-R, характеризующие суточные и географические вариации медиан $foF2$, получены для каждого месяца года и двух уровней солнечной активности: $R_z = 0$ и $R_z = 100$, где R_z — относительное число солнечных пятен, центрированное на данный месяц. Связь между $foF2$ и $NmF2$ известна, кроме того, в модели IRI есть связь между индексами солнечной активности R_z и F . Это позволяет по модели IRI вычислить индекс годовой асимметрии R для анализируемой пары станций для заданного индекса солнечной активности. Результаты расчетов показали качественное согласие результатов расчетов индекса R по модели IRI с приведенными выше оценками этого индекса: по модели IRI индекс $R > 1$ во все часы суток. Дневной максимум R по модели IRI занимает интервал 12–16 LT (т.е. гораздо шире, чем по приведенным выше оценкам), ночной максимум R по модели IRI наблюдается не в 23–24 LT, а после полуночи. Эти и другие особенности индекса R по модели IRI требуют специального рассмотрения, что выходит за рамки данной работы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных медиан электронной концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ пары ионосферных станций Боулдер–Хобарт за 1963–2013 гг. проведен анализ зависимости локального индекса годовой асимметрии R от местного времени и солнечной активности, где индекс R — отношение январь/июль суммарной концентрации $NmF2$ (для этой пары станций) в фиксированное местное время. В качестве индикатора солнечной активности для медианы $NmF2$ за месяц использован индекс F — среднее за 81 день значение потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, которое центрировано на середину данного месяца. Получены следующие выводы.

1. В зависимости индекса R от местного времени LT преобладает полусуточная мода с максимумами вблизи полудня и полуночи и минимумами утром и вечером. Индекс R для высокой солнечной активности больше, чем для низкой солнечной активности, в интервале $08 < LT < 24$ ч. Для интервала $00 < LT < 08$ ч наблюдается противоположная тенденция. Самые низкие значения $R = 1$ наблюдаются при низкой солнечной активности в узком интервале 19.0–19.5 LT. Годовая асимметрия в медиане $NmF2$ существует ($R > 1$) для всех

остальных часов местного времени при любом уровне солнечной активности.

2. Вблизи полудня индекс R увеличивается с солнечной активностью с тенденцией к насыщению при высоком уровне этой активности. Вблизи полуночи в зависимости индекса R от F наблюдается максимум для $F = 140$, при превышении которого R уменьшается с ростом F .

3. Высокие значения индекса R в полдень и полночь в основном обусловлены относительно высокими значениями $NmF2$ в январе в Северном полушарии (местной зимой, Боулдер) в полдень и в Южном полушарии (местным летом, Хобарт) в полночь.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данные критических частот $foF2$ станций Боулдер и Хобарт и индексы солнечной активности были взяты с сайтов Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR, <http://spidr.ngdc.noaa.gov/>, до 2015 года), World Data Center for Solar-Terrestrial Physics, Chilton (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdcc1/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-72-10023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Демин М.Г., Демин Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для $NmF2$ от солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 2. С. 224–231. 2021.
- Кринберг И.А., Тащилин А.В. Ионосфера и плазма-сфера. М.: Наука, 189 с. 1984.
- Bilitza D. The International Reference Ionosphere — Status 2013 // Adv. Space Res. V. 55. P. 1914–1927. 2015.
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international reference ionosphere model // Ann. Geophysicae. Discuss. 2018. <https://doi.org/10.5194/angeo-2018-97>
- Dang T., Wang W., Burns A., Dou X., Wan W., Lei J. Simulations of the ionospheric annual asymmetry: Sun-Earth distance effect // J. Geophys. Res. — Space. V. 122. P. 6727–6736. 2017.
- Gulyaeva T.L., Arikani F., Hernandez-Pajares M., Veselovsky I.S. North-south components of the annual asymmetry in the ionosphere // Radio Sci. V. 49. P. 485–496. 2014.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // ITU Telecommun. J. V. 29. P. 129–147. 1962.
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods, 2. Control of instability // ITU Telecommun. J. V. 32. P. 18–28. 1965.

- *Lei J., Wang W., Burns A.G., Luan X., Dou X.* Can atomic oxygen production explain the ionospheric annual asymmetry? // *J. Geophys. Res. — Space*. V. 121. P. 7238–7244. 2016.
- *Mendillo M., Huang C.L., Pi X., Rishbeth H., Meier R.* The global ionospheric asymmetry in total electron content // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 67. № 15. P. 1377–1387. 2005.
- *Mikhailov A.V., Perrone L.* The annual asymmetry in the F2 layer during deep solar minimum (2008–2009): December anomaly // *J. Geophys. Res. — Space*. V. 120. № 2. P. 1341–1354. 2015.
- *Ramachandran K.M., Tsokos C.P.* Mathematical statistics with applications. Oxford: Elsevier Academic Press, 824 p. 2009.
- *Rishbeth H., Müller-Wodarg I.C.F.* Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer // *Ann. Geophysicae*. V. 24. № 12. P. 3293–3311. 2006.
- *Sai Gowtam V., Tulası Ram S.* Ionospheric annual anomaly — New insights to the physical mechanisms // *J. Geophys. Res. — Space*. V. 122. P. 8816–8830. 2017a.
- *Sai Gowtam V., Tulası Ram S.* Ionospheric winter anomaly and annual anomaly observed from Formosat-3/COSMIC Radio Occultation observations during the ascending phase of solar cycle 24 // *Adv. Space Res.* V. 60. P. 1585–1593. 2017b.
- *Zhao B., Wan W., Liu L., Mao T., Ren Z., Wang M., Christensen A.B.* Features of annual and semiannual variations derived from the global ionospheric maps of total electron content // *Ann. Geophysicae*. V. 25. № 12. P. 2513–2527. 2007.
- *Zeng Z., Burns A., Wang W., Lei J., Solomon S., Syndergaard S., Qian L., Kuo Y.-H.* Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM // *J. Geophys. Res.* V. 113. A07305. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012897>