

ЗАВИСИМОСТЬ ГОДОВОЙ АСИММЕТРИИ В $NmF2$ ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ ШИРОТЫ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2021 г. М. Г. Деминов^{1, *}, В. Н. Шубин¹, Р. Г. Деминов²

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

²Казанский федеральный университет, г. Казань, Россия

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.11.2020 г.

После доработки 27.11.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

На основе глобальной эмпирической модели медианы критической частоты $F2$ -слоя (модели SDMF2) выполнен анализ свойств годовой асимметрии в концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ в полдень. В качестве характеристики этой асимметрии использован индекс R – отношение январь/июль суммарной (в данной и геомагнитно сопряженной точке) концентрации $NmF2$ в полдень, которая усреднена по всем долготам. Установлено, что на низких геомагнитных широтах ($\Phi < 31^\circ\text{--}33^\circ$) индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. На более высоких широтах индекс R увеличивается с ростом этой активности. При низкой солнечной активности основной максимум R расположен на широте $\Phi = 22^\circ\text{--}24^\circ$. При высокой солнечной активности этот максимум R расположен на $\Phi = 64^\circ\text{--}66^\circ$. На широте $\Phi = 22^\circ\text{--}24^\circ$ в северном и южном полушариях средняя по долготе концентрация $NmF2$ в январе больше, чем в июле, при любом уровне солнечной активности. На $\Phi = 64^\circ\text{--}66^\circ$ увеличение R с ростом солнечной активности обусловлено, в основном, увеличением $NmF2$ в январе в северном полушарии. Глобальный (средний по всем широтам) индекс R увеличивается с ростом солнечной активности. Дополнительный анализ показал, что в модели IRI (с коэффициентами URSI и, тем более, с коэффициентами CCIR) глобальный индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. Это, по-видимому, обусловлено ограниченным числом экспериментальных данных при получении коэффициентов CCIR и URSI, особенно над океанами.

DOI: 10.31857/S0016794021030032

1. ВВЕДЕНИЕ

Годовая асимметрия (годовая аномалия, декабрьская аномалия) – это ионосферные явления, в которых глобально усредненная концентрация электронов в данное местное время в январе больше, чем в июле [Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006]. Для выделения этой асимметрии часто 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 характеристики этой асимметрии, на-

пример, для $NmF2$, используют индекс асимметрии [Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006]

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

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

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

где $NmF2(N + S)_{\text{Jan}}$ и $NmF2(N + S)_{\text{July}}$ – 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 анализа свойств глобального индекса R необходимо знание закономерностей и свойств

индекса $R(\Phi)$ на данной геомагнитной широте Φ . Индекс $R(\Phi)$ определен уравнением (2), в котором $NmF2(N + S)_{Jan}$ и $NmF2(N + S)_{July}$ – средние по всем долготам суммарные (на данной широте Φ в северном полушарии и на сопряженной широте $-\Phi$ в южном полушарии) значения $NmF2$ в январе и июле в фиксированные местное время и уровень солнечной активности. Индекс $R(\Phi)$ назван локальным индексом R для краткости изложения.

Для получения корректных оценок глобального и локального индексов R для данного местного времени и уровня солнечной активности необходимо иметь соответствующие данные $NmF2$ для января и июля на всех долготах. Данные ионосферных станций не удовлетворяют этому критерию, поскольку в южном полушарии такие станции есть только в определенных долготных секторах. Тем не менее, по данным ионосферных станций были изучены некоторые свойства индексов R или AI [Yonezawa, 1971; Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018]. Например, на основе анализа четырех пар станций этим способом было получено, что в целом AI больше в солнечном максимуме, чем в солнечном минимуме [Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006], вопреки предыдущим выводам [Yonezawa, 1971]. Спутниковые данные и, в первую очередь, данные радиозатменных измерений $NmF2$, полученные с помощью спутника COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate), позволяют получить почти глобальную картину $NmF2$ для определенных геофизических условий и, тем самым, судить о закономерностях пространственного распределения индексов R или AI для этих условий [Zeng et al., 2008; Sai Gowtam and Tulasi Ram, 2017a]. Так, по данным COSMIC, центрированным на 21 июня и 21 декабря 2006 г. в интервале 90 дней, был выделен отчетливый пик индекса AI на геомагнитной широте примерно 25° и показано, что в полдень в декабре глобально осредненное значение $NmF2$ на 30% больше, чем в июне [Zeng, 2008]. Эти результаты были получены для низкой солнечной активности [Zeng, 2008]. Попытки оценить зависимость годовой асимметрии в $NmF2$ (или в высотном распределении концентрации электронов в области F ионосферы) от солнечной активности по данным COSMIC на фазе роста солнечного цикла 24 позволили установить только качественную тенденцию этой зависимости [Sai Gowtam and Tulasi Ram, 2017b]. Последнее связано с тем, что для получения корректной оценки R или AI необходимо, чтобы данные для декабря (или января) и июня (или июля) соответствовали фиксированному уровню (или интервалу) солнечной активности. На фазах роста и спада солнечного цикла это требование редко удовлетворяется, поскольку за интервал в половину года изменения индекса

солнечной активности обычно существенны. Например, на фазе роста солнечного цикла 24 в интервале 2008–2012 гг. самые высокие и низкие значения глобального индекса AI наблюдались в соседних 2011 и 2012 годах из-за существенной и противоположной разницы в индексах солнечной активности в июне и декабре в эти годы [Sai Gowtam and Tulasi Ram, 2017b]. Следовательно, задачу о закономерностях изменения годовой асимметрии в $NmF2$ от геомагнитной активности и широты нельзя считать решенной.

Один из способов решения этой задачи основан на использовании глобальной модели медианы $NmF2$, в которой учтены зависимости $NmF2$ от геофизических условий, включая зависимости $NmF2$ от широты и солнечной активности. Реализация этого способа на примере анализа данных медиан $NmF2$ в полдень по модели SDMF2 (Satellite and Digisonde Data Model of the F2 layer) [Шубин, 2017] была главной целью данной работы. Выбор модели SDMF2 обусловлен тем, что она построена по большой базе данных ионосферных станций и спутниковых радиозатменных измерений критической частоты $F2$ -слоя $foF2$. Они позволили обеспечить почти глобальное покрытие данными $foF2$ (с шагом 15° по долготе и 5° по широте) для каждого месяца и фиксированного часа мирового времени UT при низкой и относительно высокой солнечной активности. При построении модели SDMF2 был использован метод Лежандра для пространственного разложения месячных медиан $foF2$, вычисленных по этой базе данных, а затем – метод Фурье для разложения полученных коэффициентов по времени UT. Кроме того, для получения скользящих медиан $foF2$ на данный день месяца использована линейная интерполяция медиан $foF2$ для данного месяца и ближайшего месяца. В результате, входными параметрами этой модели являются географические координаты, время UT, день, месяц, год и интегральный индекс $F10.7(\tau)$ солнечной активности для данного дня. Индекс $F10.7(\tau)$ является средневзвешенным индексом $F10.7$ (с характерным временем $T = 27$ дней или $\tau = \exp(-1/T) = 0.96$), отражая зависимость $foF2$ от предыстории изменения $F10.7$ [Шубин, 2017].

Для решения поставленной задачи использован вариант модели SDMF2, когда не проводится интерполяция $foF2$ на данный день месяца. В этом случае входными (задаваемыми) параметрами модели являются географические координаты, время UT, месяц года и индекс солнечной активности F – величина измеренного потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см для данного месяца. При анализе годовой асимметрии используют не географические, а геомагнитные [Mikhailov and Perrone, 2015] или магнитные [Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006; Brown et al., 2018] координаты. Здесь, для определенности, ис-

пользованы геомагнитные координаты Φ и Λ , когда магнитное поле Земли аппроксимировано центрированным диполем для 2010 года, географические координаты полюса которого в северном полушарии: 80.01° N, 287.79° E [Koochak and Fraser–Smith, 2017].

Поэтому более конкретно целью данной работы был анализ зависимости индекса годовой асимметрии R в полдень от геомагнитной широты Φ и индекса солнечной активности F с помощью модели SDMF2. Ниже последовательно представлены результаты этого анализа, а также анализа свойств глобального индекса R по модели SDMF2 и по базовой модели медианы $foF2$ в международной модели IRI [Bilitza, 2018] с коэффициентами CCIR (International Radio Consultative Committee) [Jones and Gallet, 1962, 1965] и URSI (International Union of Radio Science) [Rush et al., 1984, 1989]. Далее приведены обсуждение этих результатов и основные выводы работы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для получения локального индекса $R(\Phi)$ в полдень на данной геомагнитной широте Φ для фиксированного индекса солнечной активности F вычислялись средние по всем долготам значения $NmF2$ в полдень для января (и июля) на широте Φ в северном полушарии (и сопряженной широте $-\Phi$ в южном полушарии) для этой солнечной активности. Алгоритм такого вычисления $NmF2$ в полдень, например, для января на широте Φ для данного индекса солнечной активности F , следующий. Задать геомагнитные долготы $\Lambda(i)$ с шагом по долготе 15° (24 значения). Для каждого пункта с геомагнитными координатами Φ , $\Lambda(i)$ последовательно вычислить географические координаты $\varphi(i)$, $\lambda(i)$ и мировое время UT(i), которое соответствует местному полудню; по известным $\varphi(i)$, $\lambda(i)$, UT(i) и F вычислить $foF2(i)$ (и, следовательно, $NmF2(i)$) по модели SDMF2. Далее вычислить $NmF2(N)_{Jan}$ – среднее по всем долготам значение $NmF2$ в январе в полдень в северном полушарии на широте Φ для данного индекса солнечной активности F . Аналогично вычислить $NmF2(S)_{Jan}$, $NmF2(N)_{Jul}$, $NmF2(S)_{Jul}$, по которым вычислить суммарные значения $NmF2(N + S)_{Jan}$ и $NmF2(N + S)_{Jul}$. По уравнению (2) определить искомое значение локального индекса годовой асимметрии $R = R(\Phi)$ в полдень на данной геомагнитной широте Φ для данного уровня солнечной активности F . Среднее по всем широтам значение $R(\Phi)$ дает глобальный индекс годовой асимметрии R_G в полдень для данного уровня солнечной активности F . Для вычисления глобального индекса R_G использован шаг по широте 1° Φ . Этот же шаг использован при анализе зави-

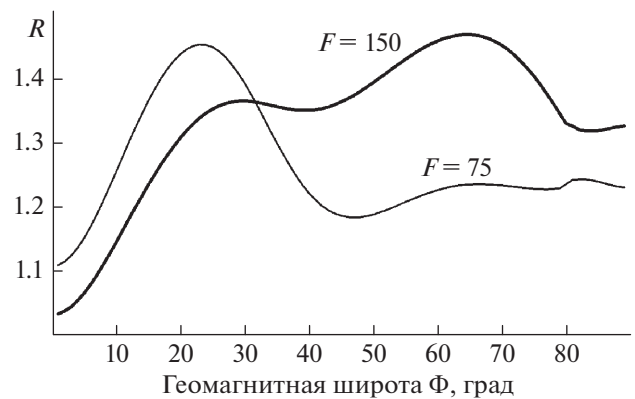


Рис. 1. Изменения локального индекса годовой асимметрии R в полдень с геомагнитной широтой Φ по модели SDMF2 для низкой ($F = 75$) и относительно высокой ($F = 150$) солнечной активности.

симости локального индекса годовой асимметрии R от геомагнитной широты Φ .

На рисунке 1 показаны зависимости локального индекса годовой асимметрии R в полдень от геомагнитной широты для двух уровней солнечной активности, полученные по модели SDMF2 и приведенному выше алгоритму. Видно, что при низкой солнечной активности ($F = 75$) отчетливо выделяется основной максимум R на низких широтах, точнее, на геомагнитной широте 22° – 24° , где $R = 1.45$. На средних и высоких широтах ($\Phi > 40^\circ$) изменения локального индекса годовой асимметрии R с широтой относительно слабые ($1.19 < R < 1.24$). Индекс R при относительно высокой солнечной активности ($F = 150$) больше, чем при низкой солнечной активности ($F = 75$) на широтах $\Phi > 31^\circ$ – 33° . На более низких широтах индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. В результате, для $F = 150$ основной максимум R расположен на геомагнитной широте 64° – 66° , где $R = 1.47$. Из данных на рис. 1 можно заключить, что локальный индекс R больше единицы на всех широтах и при любом уровне солнечной активности.

По данным на рис. 2 можно более детально судить о характере зависимости индекса R от солнечной активности на геомагнитных широтах 23° и 65° , которые получены по модели SDMF2. Эти широты соответствуют максимумам R при низкой и высокой солнечной активности (рис. 1). На рисунке 2 приведены также зависимости от солнечной активности компонентов R , т.е. $NmF2$ для соответствующих геофизических условий (см. уравнение (2)). Видно, что на геомагнитной широте 23° индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. Это уменьшение не сильное: от $R = 1.47$ для $F = 70$ до $R = 1.30$ для $F = 230$. На широте $\Phi = 23^\circ$ концентрация $NmF2$ в полдень в январе больше, чем в июле, в северном и

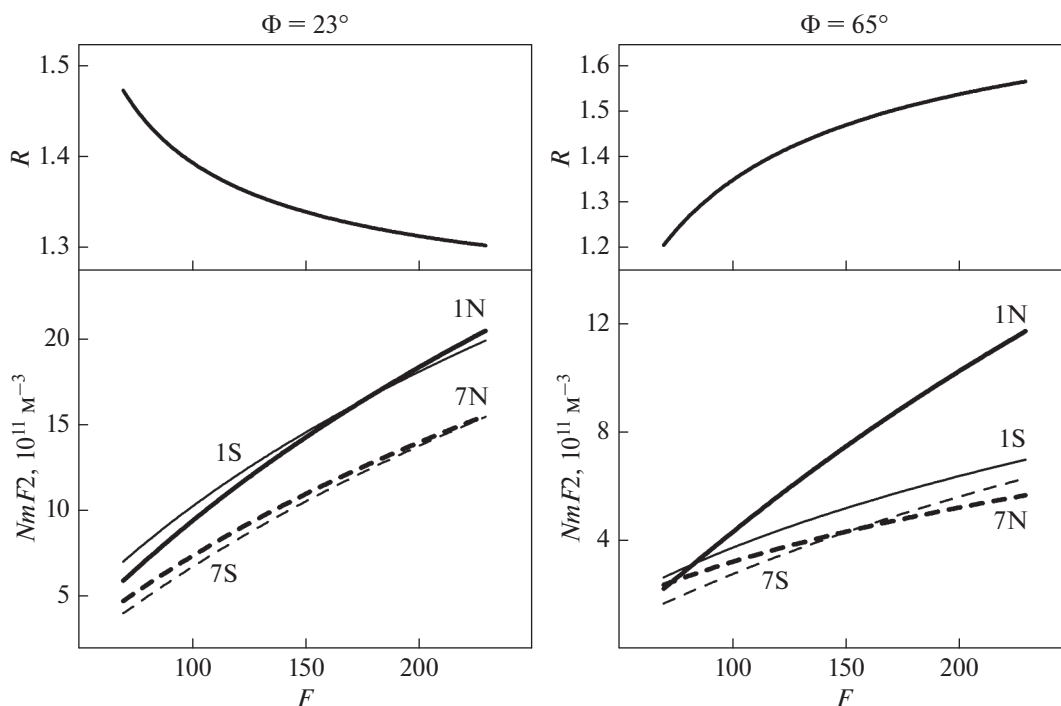


Рис. 2. Зависимости локального индекса годовой асимметрии R в полдень и компонентов этого индекса — концентраций $NmF2$ (1 — январь, 7 — июль, N — северное полушарие, S — южное полушарие) от индекса солнечной активности F на геомагнитных широтах $\Phi = 23^\circ$ и $\Phi = 65^\circ$ по модели SDMF2.

южном полушариях при любом уровне солнечной активности.

На геомагнитной широте 65° индекс R увеличивается с ростом солнечной активности. Это увеличение значительно: от $R = 1.2$ для $F = 70$ до $R = 1.57$ для $F = 230$ (рис. 2). На этой широте концентрация $NmF2$ в полдень в январе больше, чем в июле, в северном и южном полушариях при $F > 75$, т.е. почти при любом уровне солнечной активности. Исключение составляет только очень низкий уровень солнечной активности. На широте $\Phi = 65^\circ$ зависимость $NmF2$ от солнечной активности максимальна в январе в северном полушарии, когда $NmF2$ увеличивается примерно в 5.3 раза при переходе от $F = 70$ к $F = 230$. Для остальных случаев (июль в северном полушарии, январь и июль в южном полушарии) такие увеличения максимальны в июле в южном полушарии, когда они достигают 3.8 раз. Следовательно, на широте $\Phi = 65^\circ$ в полдень в северном и южном полушариях зависимость $NmF2$ от солнечной активности местной зимой больше, чем местным летом, и эта разница в северном полушарии гораздо сильнее, чем в южном полушарии. Это и приводит к увеличению индекса R на данной широте с солнечной активностью.

Среднее по всем широтам значение индекса R в полдень для фиксированного уровня солнечной активности F дает глобальный индекс годовой

асимметрии R_G в полдень для этого уровня солнечной активности. На рисунке 3 показаны зависимости индекса R_G от солнечной активности, полученные по модели SDMF2 и модели IRI с коэффициентами CCIR и URSI. Видно, что по модели SDMF2 индекс R_G увеличивается с ростом солнечной активности. Это увеличение очень слабое: $R_G = 1.26$ при $F = 70$ и $R_G = 1.37$ при $F = 230$. По модели IRI с коэффициентами CCIR и URSI индекс R_G уменьшается с ростом солнечной активности. Использование коэффициентов CCIR приводит к более сильной зависимости R_G от солнечной активности ($R_G = 1.45$ при $F = 70$ и $R_G = 1.23$ при $F = 230$), чем использование коэффициентов URSI ($R_G = 1.35$ при $F = 70$ и $R_G = 1.25$ при $F = 230$). Несмотря на качественное различие между индексами R_G по модели SDMF2 и модели IRI с коэффициентами URSI, их средние значения лежат в диапазоне от 1.25 до 1.37. Следовательно, средние значения индексов R_G по этим моделям не противоречат друг другу.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Существование максимума годовой аномалии в $NmF2$ в низких широтах (примерно в области гребней экваториальной аномалии) в полдень при низкой солнечной активности отмечалось ранее по радиозатменным данным спутников

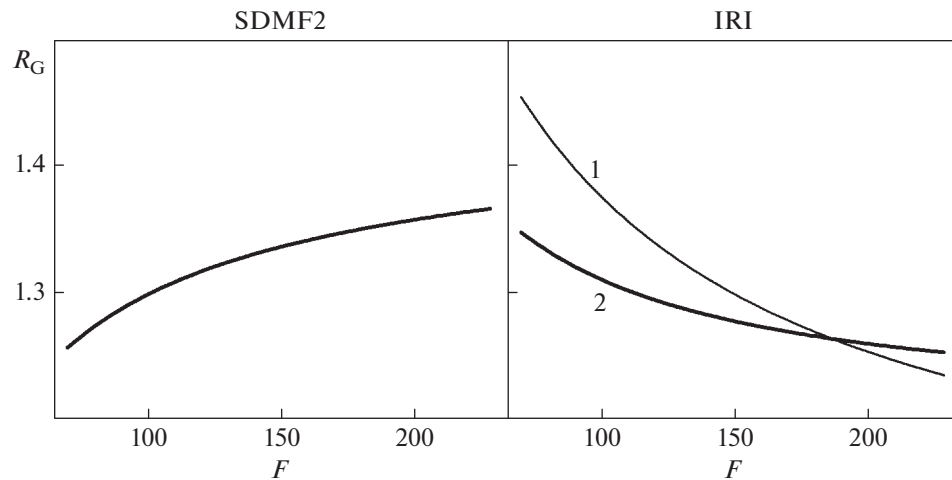


Рис. 3. Зависимости глобального индекса годовой асимметрии R_G в полдень от индекса солнечной активности F по модели SDMF2 и модели IRI с коэффициентами CCIR (1) и URSI (2).

FORMOSAT-3/COSMIC для конкретных периодов измерений, например, по данным, центрированным на 21 июня и 21 декабря 2006 г. в интервале 90 дней, [Zeng et al., 2008] или по данным 2009 г. [Sai Gowtam and Tulas Ram, 2017a]. Данные на рис. 1 показывают, что по модели SDMF2 этот максимум на $\Phi = 22^\circ\text{--}24^\circ$ является регулярной закономерностью индекса годовой аномалии R в полдень при низкой солнечной активности. Вывод о том, что в полдень на широте $\Phi = 22^\circ\text{--}24^\circ$ в северном и южном полушариях средняя по долготе концентрация $NmF2$ в январе больше, чем в июле, при любом уровне солнечной активности, получен, по-видимому, впервые.

Модель SDMF2 дает уменьшение индекса R с ростом индекса солнечной активности F в низких широтах ($\Phi < 31^\circ\text{--}33^\circ$) и увеличение этого индекса с ростом F на средних и высоких широтах. Ионосферные станции сосредоточены в основном на средних широтах и в среднем они дают увеличение индекса R с ростом F [Rishbeth and Müller–Wodarg, 2006; Brown et al., 2018], что согласуется с выводами по модели SDMF2. В свою очередь, включение в анализ большего числа низкоширотных станций может привести к противоположной зависимости среднего индекса R от солнечной активности. В этом возможная причина уменьшения среднего индекса R с ростом F по данным ионосферных станций средних и низких широт [Yonezawa, 1971].

Возможность существования максимума R в полдень на широте $\Phi = 64^\circ\text{--}66^\circ$ отмечена, по-видимому, впервые. Этот максимум существует при любом уровне солнечной активности, он слабо выражен при низкой солнечной активности и становится основным при повышенной и высокой солнечной активности (рис. 1). Следовательно,

на широте $\Phi = 64^\circ\text{--}66^\circ$ происходит самое сильное увеличение R с ростом индекса солнечной активности F . Это увеличение обусловлено, в основном, относительно сильным увеличением $NmF2$ с ростом F в январе в северном полушарии по сравнению с другими компонентами индекса R (рис. 2). По оценкам, относительно сильное увеличение $NmF2$ с ростом F в январе в северном полушарии является свойством ионосферы средних и высоких широт, т.е. всей области ионосферы, где наблюдается увеличение R с ростом F . На основе анализа данных только одной пары среднеширотных станций Боулдер и Хобарт (Boulder, Hobart) было получено, что увеличение индекса R (или AI) с ростом солнечной активности для медианы $NmF2$ более значительно, чем для $NmF2$ при низкой геомагнитной активности [Деминов и Деминова, 2021]. Это обусловлено тем, что на средних широтах медиана $NmF2$ при низкой солнечной активности обычно соответствует низкой ($ap(\tau) < 9$) геомагнитной активности, а медиана $NmF2$ при высокой солнечной активности чаще соответствует умеренной ($9 < ap(\tau) < 20$) геомагнитной активности, где $ap(\tau)$ – средневзвешенный ap -индекс геомагнитной активности с характерным временем $T = 14$ ч или $\tau = \exp(-3/T) = 0.8$ [Деминов и Деминова, 2021]. Умеренная геомагнитная активность обычно ассоциируется с суббурями как наиболее частой причиной геомагнитных возмущений. Возможной причиной того, что на средних широтах индекс R при умеренной геомагнитной активности больше, чем при низкой активности, является асимметрия зима/лето в частоте возникновения суббурь [Tanskanen et al., 2011] и годовая асимметрия в плотности термосферы [Lei et al., 2013]. Первый фактор заключается в том, что местной зимой наблюдается более высокая частота суббурь, с которыми связана генерация

крупномасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) в авроральной области. Второй фактор обеспечивает увеличенные амплитуды ВГВ на средних широтах в январе как наиболее частую причину увеличенных значений $NmF2$ на средних широтах в полдень [Деминов и Деминова, 2021]. Это позволяет качественно понять некоторые особенности зависимости R от солнечной активности на средних и, по-видимому, высоких широтах. Тем не менее, остается открытым вопрос о возможных причинах максимума R на широте $\Phi = 64^\circ - 66^\circ$.

По модели SDMF2 глобальный индекс годовой асимметрии R_G увеличивается с ростом индекса солнечной активности F (рис. 3). Зависимость R_G от F очень слабая, что в значительной степени связано с противоположной зависимостью локального индекса R от F на низких и более высоких широтах. Это означает, что механизмы годовой асимметрии $NmF2$ целесообразно изучать на основе анализа широтного распределения локального индекса R , а не анализа глобального индекса R_G . Модель медианы $NmF2$ с коэффициентами CCIR (как составная часть модели IRI) целиком построена по данным ионосферных станций, которые занимают небольшую часть южного полушария даже на средних широтах [Jones and Gallet, 1962, 1965]. Поэтому вычисления индекса R_G по модели IRI с коэффициентами CCIR приводят к ошибочным выводам: индекс R_G уменьшается с ростом F , и такое уменьшение является достаточно сильным (рис. 3). Модель медианы $NmF2$ с коэффициентами URSI также построена по наземным данным, но дополнительно учтены результаты моделирования ионосферы, в том числе, над океанами [Rush et al., 1984, 1989]. В результате, индекс R_G по модели IRI с коэффициентами URSI не сильно отличается от этого индекса по модели SDMF2, но качественное отличие сохраняется: индекс R_G по модели IRI с коэффициентами URSI уменьшается с ростом солнечной активности (рис. 3). Модель SDMF2 в значительной степени построена по спутниковым данным $foF2$, которые обеспечили почти полное покрытие этими данными всех долгот и широт для выбранных геофизических условий [Шубин, 2017]. В этом основная причина более высокой точности индекса R_G по модели SDMF2 по сравнению с этим индексом по модели IRI с коэффициентами и CCIR, и URSI.

4. ВЫВОДЫ

На основе глобальной эмпирической модели медианы критической частоты $F2$ -слоя (SDMF2) выполнен анализ свойств годовой асимметрии в концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ в полдень. В качестве характеристики этой асиммет-

рии использован индекс R — отношение январь/июль суммарной (в данной и геомагнитно сопряженной точке) концентрации $NmF2$ в полдень, которая усреднена по всем долготам. Получены следующие выводы.

1. Установлено, что в низких геомагнитных широтах ($\Phi < 31^\circ - 33^\circ$) индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. На более высоких широтах индекс R увеличивается с ростом этой активности.

2. При низкой солнечной активности основной максимум R расположен на широте $\Phi = 22^\circ - 24^\circ$. На этой широте в северном и южном полушариях средняя по долготе концентрация $NmF2$ в январе больше, чем в июле, при любом уровне солнечной активности.

3. При высокой солнечной активности этот максимум R расположен на $\Phi = 64^\circ - 66^\circ$, где наблюдается наиболее сильная зависимость R от солнечной активности. Это обусловлено, в основном, относительно сильным увеличением $NmF2$ с солнечной активностью в январе в северном полушарии.

4. Глобальный (средний по всем широтам и долготам) индекс R в полдень увеличивается с ростом солнечной активности в диапазоне от 1.26 до 1.37. Дополнительный анализ показал, что в модели IRI (с коэффициентами URSI и, тем более, с коэффициентами CCIR) глобальный индекс R уменьшается с ростом солнечной активности. Это, по-видимому, обусловлено ограниченным числом экспериментальных данных при получении коэффициентов CCIR и URSI, особенно над океанами.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят создателей сайта IRI (irimodel.org) за FORTRAN программы расчета медиан критической частоты $F2$ -слоя $foF2$ по модели IRI с коэффициентами CCIR и URSI.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00050 (по части низких и средних широт) и при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-72-10023 (по части высоких широт).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для $NmF2$ от солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 2. С. 224–231. 2021.
- Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты $F2$ -слоя ионосферы для спокойных

- геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 57. № 4. С. 450–462. 2017.
- *Bilitza D.* IRI the international standard for the ionosphere // *Adv. Radio Sci.* V. 16. P. 1–11. 2018.
- *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>
- *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 (Pt. 1) // *Telecomm. J.* V. 29. P. 129–149. 1962.
- *Jones W.B., Gallet R.M.* The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods (Pt. 2) // *Telecomm. J.* V. 32. P. 18–28. 1965.
- *Koochak Z., Fraser-Smith A.C.* An update on the centered and eccentric geomagnetic dipoles and their poles for the years 1980–2015 // *Earth and Space Sci.* V. 4. № 10. P. 626–636. 2017.
- *Lei J., Dou X., Burns A., Wang W., Luan X., Zeng Z., Xu J.* Annual asymmetry in thermospheric density: Observations and simulations // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 118. P. 2503–2510. 2013.
- *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.
- *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.
- *Rush C.M., PoKempner M., Anderson D.N., Perry J., Stewart F.G., Reasoner R.* Maps of foF2 Derived from Observations and Theoretical Data // *Radio Sci.* V. 19. P. 1083–1097. 1984.
- *Rush C., Fox M., Bilitza D., Davies K., McNamara L., Stewart F., PoKempner M.* Ionospheric mapping – an update of foF2 coefficients // *Telecomm. J.* V. 56. P. 179–182. 1989.
- *Sai Gowtam V., Tulasi Ram S.* Ionospheric annual anomaly – New insights to the physical mechanisms // *J. Geophys. Res. – Space.* V. 122. P. 8816–8830. 2017a.
- *Sai Gowtam V., Tulasi 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.
- *Tanskanen E.I., Pulkkinen T.I., Viljanen A. et al.* From space weather toward space climate time scales: Substorm analysis from 1993 to 2008 // *J. Geophys. Res.* V. 116. A00134. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015788>
- *Yonezawa T.* The solar-activity and latitudinal characteristics of the seasonal, non-seasonal and semi-annual variations in the peak electron densities of the F2-layer at noon and at midnight in middle and low latitudes // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 33. P. 887–907. 1971.
- *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>