

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

© 2021 г. М. Г. Деминов<sup>1</sup>, \*, В. Н. Шубин<sup>1</sup>, Р. Г. Деминов<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Казанский 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 ( $\Phi < 31^\circ$ – $33^\circ$ ) 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  $\Phi = 22^\circ$ – $24^\circ$ . При высокой солнечной активности этот максимум  $R$  расположен на  $\Phi = 64^\circ$ – $66^\circ$ . На широте  $\Phi = 22^\circ$ – $24^\circ$  в северном и южном полушариях средняя по долготе концентрация  $NmF2$  в январе больше, чем в июле, при любом уровне солнечной активности. На  $\Phi = 64^\circ$ – $66^\circ$  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]

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

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

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

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 анализа свойств глобального индекса  $R$  необходимо знание закономерностей и свойств

индекса  $R(\Phi)$  на данной геомагнитной широте  $\Phi$ . 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  $\Phi$  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  $25^\circ$  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  $15^\circ$  по долготе и  $5^\circ$  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  $\Phi$  и  $\Lambda$ , когда магнитное поле Земли аппроксимировано центрированным диполем для 2010 года, географические координаты полюса которого в северном полушарии:  $80.01^\circ$  N,  $287.79^\circ$  E [Koochak and Fraser–Smith, 2017].

Поэтому более конкретно целью данной работы был анализ зависимости индекса годовой асимметрии  $R$  в полдень от геомагнитной широты  $\Phi$  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  $\Phi$  для фиксированного индекса солнечной активности  $F$  вычислялись средние по всем долготам значения  $NmF2$  в полдень для января (и июля) на широте  $\Phi$  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  $\Phi$  для данного индекса солнечной активности  $F$ , следующий. Задать геомагнитные долготы  $\Lambda(i)$  с шагом по долготе  $15^\circ$  (24 значения). Для каждого пункта с геомагнитными координатами  $\Phi$ ,  $\Lambda(i)$  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  $\Phi$  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  $\Phi$  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  $1^\circ$   $\Phi$ . Этот же шаг использован при анализе зави-

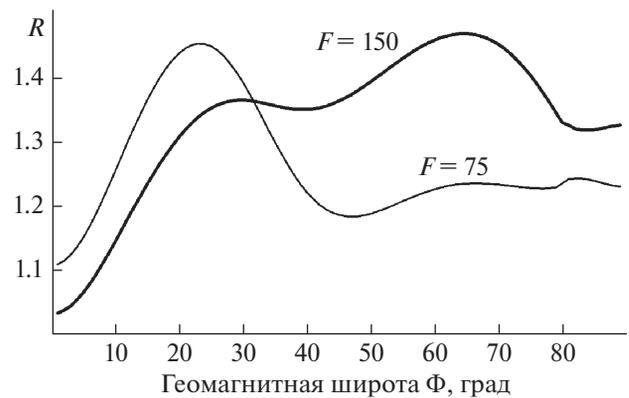
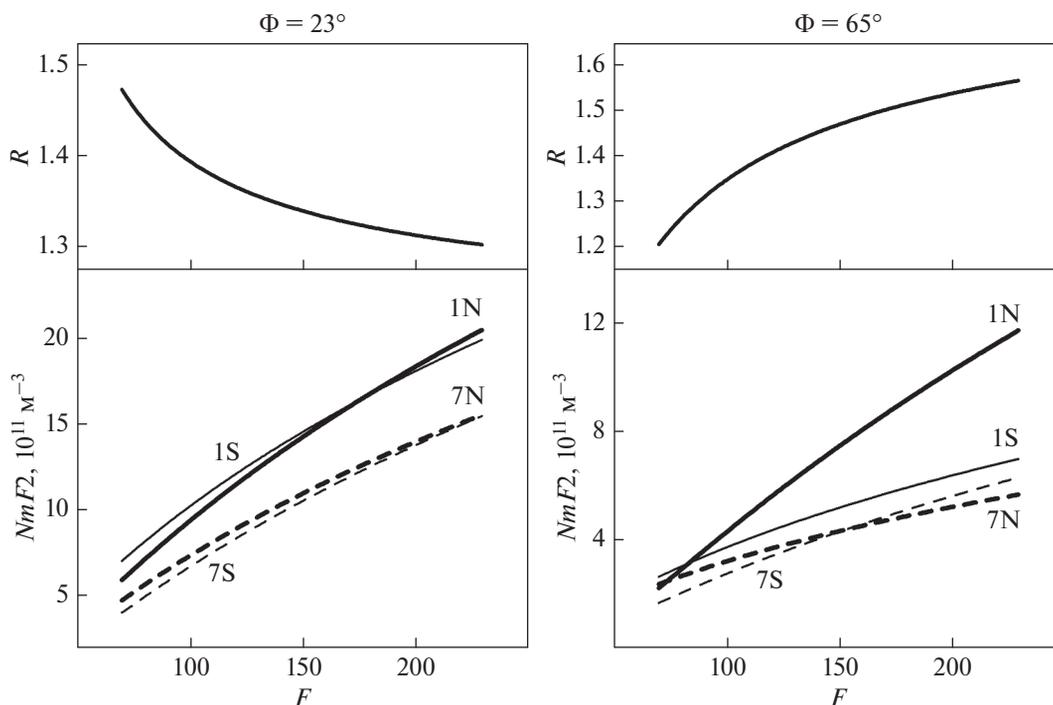


Рис. 1. Изменения локального индекса годовой асимметрии  $R$  в полдень с геомагнитной широтой  $\Phi$  по модели SDMF2 для низкой ( $F = 75$ ) и относительно высокой ( $F = 150$ ) солнечной активности.

симости локального индекса годовой асимметрии  $R$  от геомагнитной широты  $\Phi$ .

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  $22^\circ$ – $24^\circ$ , 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  $\Phi > 31^\circ$ – $33^\circ$ . На более низких широтах индекс  $R$  уменьшается с ростом солнечной активности. В результате, для  $F = 150$  основной максимум  $R$  расположен на геомагнитной широте  $64^\circ$ – $66^\circ$ , 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  $23^\circ$  и  $65^\circ$ , 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  $23^\circ$  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  $65^\circ$  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

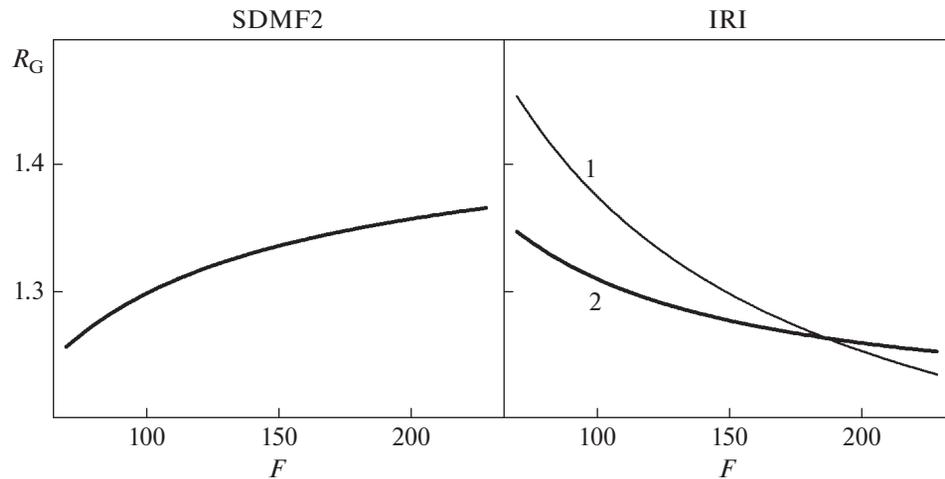


Рис. 3. Зависимости глобального индекса годовой асимметрии  $R_G$  в полдень от индекса солнечной активности  $F$  по модели SDMF2 и модели IRI с коэффициентами CCIR (1) и URSI (2).

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. Вторым фактором 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., Arikan 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>