

ЗАВИСИМОСТЬ ГОДОВОЙ АСИММЕТРИИ В $NmF2$ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

© 2024 г. В. Н. Шубин^{1,*}, В. И. Бадин¹, М. Г. Деминов¹, Р. Г. Деминов²

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

²Казанский федеральный университет, Казань, Россия

*e-mail: shubin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 23.05.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 28.09.2023 г.

На основе глобальной эмпирической модели медианы критической частоты $F2$ -слоя (SDMF2) выполнен анализ свойств суточных вариаций годовой асимметрии в концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ при различных значениях индекса солнечной активности F . В качестве параметра этой асимметрии использован индекс AI , который характеризует относительную разницу в $NmF2$, усредненной по всем долготам и широтам, между январем и июлем в данное местное время. Получено, что в суточных вариациях индекса AI преобладает полусуточная мода с максимумами в дневные и ночные часы. Дневной максимум индекса AI почти не зависит от уровня солнечной активности. Ночной максимум AI уменьшается с ростом солнечной активности. Для низкой солнечной активности дневной и ночной максимумы AI почти совпадают по амплитуде, когда $AI = 16$ – 17% . Разница в потоке солнечного радиоизлучения между январем и июлем из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца вносит заметный вклад в индекс AI во все часы суток. В среднем он составляет 3–4% и может достигать 5% при низкой солнечной активности в ночные часы. Разница в индексе AI для низкой и высокой активности по Международной справочной модели ионосферы IRI (с коэффициентами URSI и тем более CCIR) завышена относительно модели SDMF2 почти во все часы суток, по-видимому, из-за ограниченного числа экспериментальных данных при получении коэффициентов CCIR и URSI, особенно над океанами.

DOI: 10.31857/S0016794024010091, EDN: GQKLQT

1. ВВЕДЕНИЕ

Годовая асимметрия (годовая аномалия, декабрьская аномалия) — это морфологическая особенность ионосферы, при которой 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 радиоэлектронных 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, например, для $NmF2$ используют индекс асимметрии [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]:

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

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 $NmF2(N + S)_{July}$ — суммар-

ные (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 AI для медиан $NmF2$ за месяц. Для оценки величины R по известному индексу AI можно использовать соотношение: $R = (1 + AI)/(1 - AI)$.

Кроме глобального индекса AI можно использовать индекс $AI(\Phi)$, который определен аналогично глобальному индексу AI с помощью уравнения (1), но для фиксированной исправленной геомагнитной широты Φ в Северном полушарии и сопряженной широты в Южном полушарии [Gustafsson et al., 1992]. Индекс $AI(\Phi)$ назван локальным индексом AI для краткости изложения.

Для получения корректных оценок глобального индекса AI для данного местного времени и уровня солнечной активности необходимо иметь соответствующие данные $NmF2$ для января и июля на всех широтах и 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 наблюдений на четырех парах 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 спутников COSMIC, позволили 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 Tulasī Ram, 2017a]. Так, по данным COSMIC для центрированных на 21 июня и 21 декабря 2006 г. 90-дневных интервалов было получено, что при низкой солнечной активности годовая асимметрия $NmF2$ испытывает суточные вариации с максимумами в полдень и полночь на примерно 25° геомагнитной широты [Zeng et al., 2008].

Для получения корректных оценок индекса AI по экспериментальным данным необходимо,

чтобы данные для января и июля (или декабря и июня) соответствовали почти фиксированному уровню солнечной активности. Это требование может удовлетворяться для продолжительного периода низкой солнечной активности, но редко выполняется на фазах роста и спада солнечного цикла, когда за интервал в половину года изменения индекса солнечной активности обычно существенны. В этом, по-видимому, основная причина того, что свойства суточных вариаций глобального индекса AI по экспериментальным данным и на основе численного моделирования детально исследовались только для низкой солнечной активности [Zeng et al., 2008; Dang et al., 2017]. Следовательно, задачу о закономерностях суточных вариаций годовой асимметрии в $NmF2$ при разных уровнях солнечной активности нельзя считать решенной.

Один из способов решения данной задачи основан на использовании глобальной модели медианы $NmF2$, в которой учтены зависимости $NmF2$ от геофизических условий, включая зависимость $NmF2$ от солнечной активности. Реализация этого способа решения задачи 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 $foF2$. Это позволило 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 средне-взвешенным 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 проводит-

ся интерполяция $foF2$ на данный день месяца. В этом случае входными (задаваемыми) параметрами модели являются географические координаты, мировое время UT, месяц года и индекс солнечной активности F — средняя величина измеренного потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см для данного месяца. Этот вариант модели был использован ранее для анализа зависимости индекса годовой асимметрии R в полдень от геомагнитной широты и индекса солнечной активности F с помощью модели SDMF2 [Деминов и др., 2021].

Здесь эта модель использована для анализа свойств суточных вариаций индекса годовой асимметрии AI при различных значениях индекса солнечной активности F . Ниже последовательно представлены результаты анализа свойств суточных вариаций глобального индекса AI по модели SDMF2 и по базовой модели медианы $foF2$ в Международной справочной модели ионосферы 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]. Дополнительно рассмотрен индекс AI для фиксированных исправленных геомагнитных широт. Далее представлены обсуждение этих результатов и основные выводы работы.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

В среднем плотность потока солнечного радиоизлучения в январе больше, чем в июле, из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца, когда расстояние Солнце — Земля минимально в начале января. Для учета этой разницы в величине индекса F здесь использован индекс

$$F^* = cF, \quad (3)$$

где коэффициент $c = 1.03$ для января, $c = 0.97$ для июля. Вариант $c = 1$ соответствует круговой орбите Земли на расстоянии 1 а.е. от Солнца. Ниже для вычисления годовой аномалии в $NmF2$ при заданном значении индекса солнечной активности F использована модель SDMF2, в которой в качестве входного параметра использован индекс F^* , учитывающий эллиптичность орбиты Земли.

Для получения глобального индекса AI для заданной солнечной активности F и фиксированного местного времени LT использовалась модель SDMF2, с помощью которой вычислялись средние (с шагом по широте 5° в интервале

$85^\circ \text{ N}—85^\circ \text{ S}$ и шагом по долготе 15° в интервале $0—345^\circ \text{ E}$) значения $NmF2$ для января и июля. Такие вычисления были выполнены для всех часов местного времени с шагом полчаса. Результат дает искомую зависимость глобального индекса AI от местного времени для заданной солнечной активности. Он показан на рис. 1 для средней солнечной активности ($F = 120$) с учетом эллиптичности орбиты Земли по уравнению (3) и без учета этой эллиптичности, когда коэффициент $c = 1$ в уравнении (3). Данные на этом рисунке показывают, что в суточных вариациях индекса AI преобладает полусуточная мода с максимумами в полночь и почти в полдень (12.25 LT). Для варианта, когда эллиптичность орбиты Земли не учитывается, $AI = 11.0\%$ и $AI = 12.9\%$ в полночь и полдень соответственно. Учет эллиптичности орбиты Земли приводит к отчетливому увеличению AI в течение всех часов суток, которое составляет примерно 4% в полночь и 3% в полдень. В результате $AI = 14.7\%$ в полночь и $AI = 15.8\%$ в полдень для варианта, когда эллиптичность орбиты Земли учитывается с помощью уравнения (3). Следовательно, для средней солнечной активности вклад эллиптичности орбиты Земли составляет примерно 20—25% суммарного значения AI .

Глобальный индекс AI зависит не только от местного времени, но и от солнечной активности. Для примера на рис. 2 показаны суточные вариации глобального индекса AI для низкой ($F = 80$) и высокой ($F = 160$) солнечной активности, вычисленные по модели SDMF2 без учета

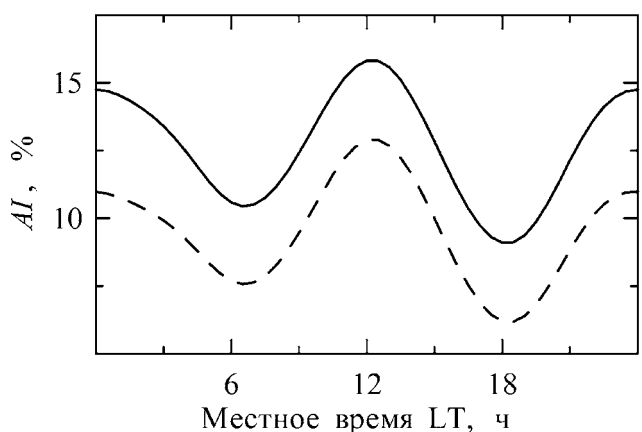


Рис. 1. Суточные вариации глобального индекса AI для средней солнечной активности, $F = 120$, с учетом (сплошная линия) и без учета (штриховая линия) разницы в потоке солнечного радиоизлучения для января и июля из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца.

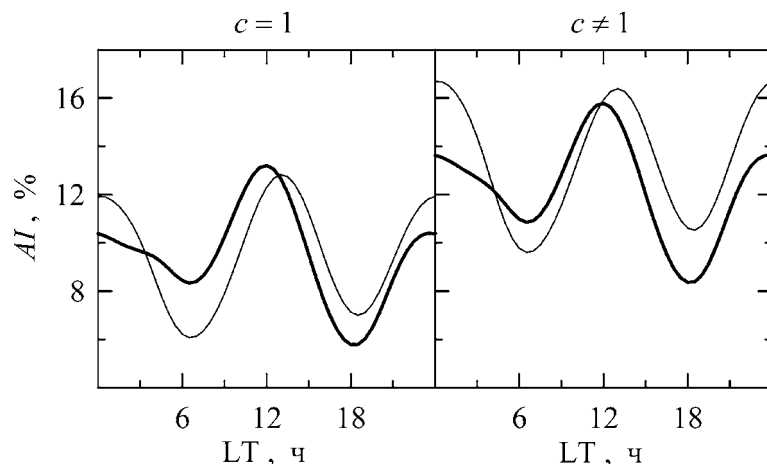


Рис. 2. Суточные вариации глобального индекса AI для низкой ($F = 80$, тонкие линии) и высокой ($F = 160$, толстые линии) солнечной активности без учета ($c = 1$) и с учетом ($c \neq 1$) разницы в потоке солнечного радиоизлучения для января и июля из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца.

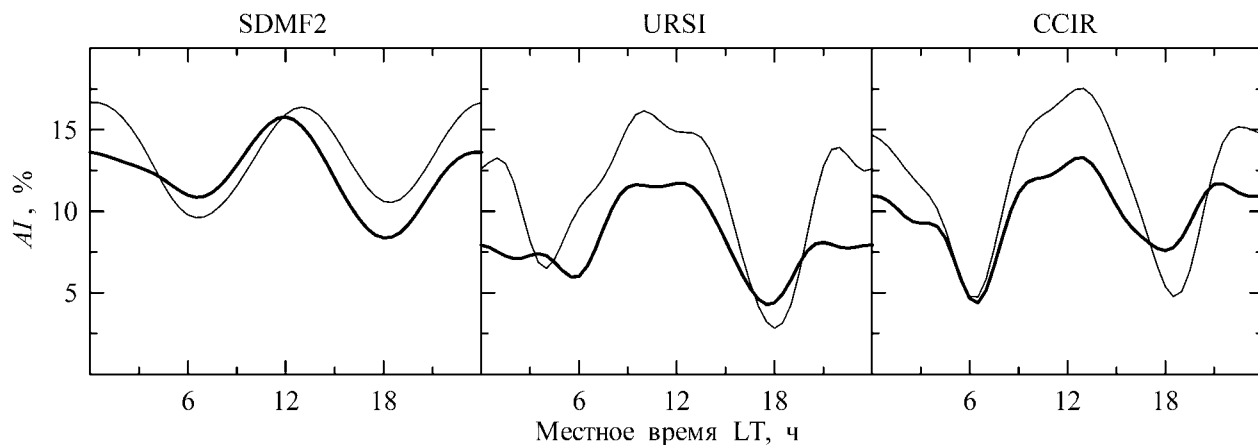


Рис. 3. Суточные вариации глобального индекса AI для низкой ($F = 80$, тонкие линии) и высокой ($F = 160$, толстые линии) солнечной активности по модели SDMF2 и по модели IRI с коэффициентами URSI и CCIR.

($c = 1$) и с учетом ($c \neq 1$) разницы в потоке солнечного радиоизлучения для января и июля по уравнению (3). Из данных на этом рисунке следует, что в полночь индекс AI для высокой солнечной активности меньше, чем для низкой активности, в полдень зависимость AI от солнечной активности ослаблена. В результате для высокой солнечной активности дневной максимум AI больше ночного максимума. Для низкой солнечной активности дневной и ночной максимумы AI практически совпадают. Разница в величине AI между вариантами $c = 1$ и $c \neq 1$ значительна во все часы суток. Она максимальна при низкой солнечной активности для ночных часов и составляет почти 30% суммарного значения AI .

На рис. 3 приведены суточные вариации глобального индекса AI 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]. Следует отметить, что при получении коэффициентов CCIR и URSI по данным $foF2$ в качестве индикатора солнечной активности был использован индекс R_z — относительное число солнечных пятен. Этот индекс определен по данным оптических измерений на Солнце, поэтому он не зависит от эллиптичности орбиты Земли. В модели IRI для получения зависимости $foF2$

(и $NmF2$) от F по коэффициентам CCIR и URSI использовано уравнение регрессии, отражающее корреляцию только между индексами F и R_z . Поэтому приведенные на рис. 3 результаты расчетов индекса AI по модели IRI с коэффициентами CCIR и URSI получены для варианта, когда коэффициент $c = 1$ в уравнении (3). На этом рисунке результаты расчетов индекса AI по модели SDMF2 получены для $c \neq 1$. Из данных на рис. 3 следует, что для всех трех моделей преобладает полусуточная мода изменений AI с местным временем с максимумами в дневные и ночные часы. Для низкой солнечной активности в полдень модели дают близкие значения AI : 15.9; 14.9 и 17.1% по моделям SDMF2, URSI и CCIR соответственно. В полдень увеличение солнечной активности не приводит к заметному изменению AI по модели SDMF2 и приводит к уменьшению AI по моделям URSI и CCIR. В результате для высокой солнечной активности в полдень разница в значениях AI для этих моделей существенна: 15.8; 11.7 и 12.9% по моделям SDMF2, URSI и CCIR. Увеличение солнечной активности приводит к уменьшению глобального индекса AI в полночь по всем трем моделям. Итак, основным качественным отличием глобального индекса AI по модели SDMF2 и модели IRI с коэффициентами URSI и CCIR является разный знак зависимости этого индекса от солнечной активности в дневные часы.

Глобальный индекс AI характеризует среднюю по всем широтам и долготам степень годовой аномалии в $NmF2$ в данное местное время. Локальный индекс $AI(\Phi)$ характеризует среднюю по всем долготам степень годовой аномалии в $NmF2$ в данное местное время на данной исправленной геомагнитной широте Φ Северного полушария и сопряженной широте Южного полушария. На рис. 4 показаны суточные вариации локального индекса $AI(\Phi)$ на трех широтах для низкой и высокой солнечной активности, полученные по модели SDMF2 с учетом разницы в потоке солнечного радиоизлучения для января и июля из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца, когда коэффициент $c \neq 1$ в уравнении (3). Эти три широты подобраны на основе анализа зависимости $AI(\Phi)$ от Φ в полдень. Широта $\Phi = 25^\circ$ примерно соответствуют максимуму $AI(\Phi)$ для низкой солнечной активности, широта $\Phi = 65^\circ$ — максимуму $AI(\Phi)$ для высокой солнечной активности [Деминов и др., 2021]. Данные на рис. 4 показывают, что на выбранных широтах для низкой солнечной активности самое большое значение $AI(\Phi) = 23.5\%$ наблюдается на $\Phi = 25^\circ$ почти в полдень (12.5 LT). Для высокой солнечной активности

самое большое значение $AI(\Phi) = 29.2\%$ наблюдается на $\Phi = 65^\circ$ в 12.5 LT. Противоположные по знаку зависимости индекса $AI(\Phi)$ от солнечной активности на относительно низких ($\Phi = 25^\circ$) и более высоких ($\Phi = 45^\circ$ и $\Phi = 65^\circ$) широтах приводят к отсутствию этой зависимости для глобального индекса AI в полдень, когда индекс $AI = 15.9\%$ (см. рис. 2 и рис. 4). В полночь на низких и средних ($\Phi = 25^\circ$ и $\Phi = 45^\circ$) широтах индекс $AI(\Phi)$ для низкой солнечной активности больше, чем для высокой активности, на высоких широтах ($\Phi = 65^\circ$) эта зависимость практически отсутствует (рис. 4). В результате в полночь глобальный индекс AI для низкой солнечной активности больше, чем для высокой активности (см. рис. 2). Из данных на рис. 2 и рис. 4 можно видеть, что для заданной солнечной активности амплитуда суточных изменений глобального индекса AI обычно меньше, чем локального индекса $AI(\Phi)$, в том числе из-за сдвига фаз суточных вариаций $AI(\Phi)$ на разных широтах.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Дополнительный учет разницы в потоке солнечного радиоизлучения для января и июля из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца с помощью модели SDMF2 приводит к значительному увеличению глобального индекса годовой асимметрии AI во все местные времена. Такое увеличение AI в среднем составляет 20—25% от суммарного значения AI и может достигать 30% при низкой солнечной активности в ночные часы (рис. 1 и рис. 2). Из данных численного моделирования для низкой солнечной активности также следует, что учет разницы в потоке солнечного радиоизлучения приводит к значительному увеличению глобального индекса годовой асимметрии [Dang et al., 2017]. Тем не менее основная причина годовой аномалии в $NmF2$, по-видимому, обусловлена дополнительной перестройкой в нейтральной атмосфере годовых изменений скорости нагрева атмосферы из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца [Lei et al., 2013; Dang et al., 2017]. В данном случае эти изменения в нейтральной атмосфере, по-видимому, обеспечивают примерно 70—80% от суммарного значения индекса AI .

Модель медианы $foF2$ 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]. Модель медианы $NmF2$ с коэффициентами URSI также построена по наземным дан-

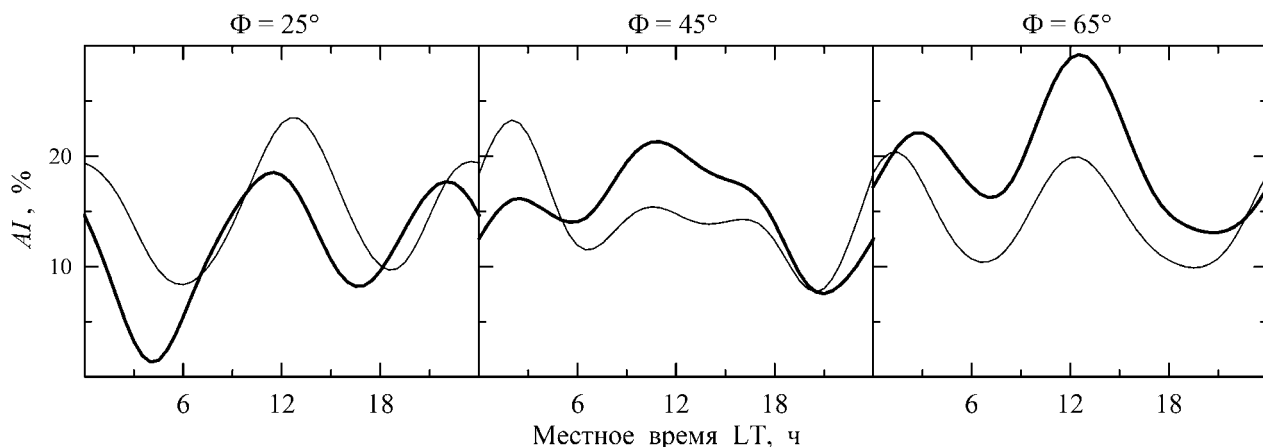


Рис. 4. Суточные вариации локального индекса $AI(\Phi)$ на исправленных геомагнитных широтах $\Phi = 25^\circ$, 45° и 65° для низкой ($F = 80$, тонкие линии) и высокой ($F = 160$, толстые линии) солнечной активности по модели SDMF2.

ным, но дополнительно учтены результаты моделирования ионосферы, в том числе над океанами [Rush et al., 1984; 1989]. Модель SDMF2 в значительной степени построена по спутниковым данным foF_2 , которые обеспечили почти полное покрытие всех долгот и широт для выбранных геофизических условий [Шубин, 2017]. В этом основная причина повышенной точности индекса AI по модели SDMF2 по сравнению с этим индексом по модели IRI с коэффициентами и CCIR, и URSI. В результате разница в индексе AI для низкой и высокой активности по модели IRI (с коэффициентами URSI и тем более CCIR) завышена относительно модели SDMF2 почти во все часы местного времени (см. рис. 3).

Модель SDMF2 дает отчетливые максимумы глобального индекса AI в дневные и ночные часы. В дневные часы этот максимум, по-видимому, обусловлен относительно высокими значениями NmF_2 в январе в Северном полушарии (местной зимой), в ночные часы — относительно высокими значениями NmF_2 в январе в Южном полушарии (местным летом). Это предположение основано на результатах исследования локального индекса $AI(\Phi)$ на средних широтах [Деминев и Деминова, 2023] и требует дополнительного анализа, поскольку разница между локальным и глобальным индексами годовой аномалии в NmF_2 значительна.

4. ВЫВОДЫ

На основе глобальной эмпирической модели медианы критической частоты F_2 -слоя (SDMF2) выполнен анализ свойств суточных вариаций го-

довой асимметрии в концентрации максимума F_2 -слоя NmF_2 при различных значениях индекса солнечной активности F . В качестве параметра этой асимметрии использован индекс AI , который характеризует относительную разницу в NmF_2 , усредненной по всем долготам и широтам, в январе и июле в данное местное время. Получены следующие результаты.

1. В суточных вариациях индекса AI преобладает полусуточная мода с максимумами в дневные и ночные часы. Дневной максимум индекса AI почти не зависит от уровня солнечной активности. Ночной максимум AI уменьшается с ростом солнечной активности. Для низкой солнечной активности дневной и ночной максимумы AI почти совпадают по амплитуде, когда $AI = 16\text{--}17\%$.

2. Разница в потоке радиоизлучения Солнца между январем и июлем из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца вносит заметный вклад в индекс AI во все часы суток. В среднем он составляет 3–4% и может достигать 5% при низкой солнечной активности в ночные часы.

3. Разница в индексе AI для низкой и высокой активности по модели IRI (с коэффициентами URSI и тем более CCIR) завышена относительно модели SDMF2 почти во все часы суток, по-видимому, из-за ограниченного числа экспериментальных данных при получении коэффициентов CCIR и URSI, особенно над океанами.

4. Для локального индекса $AI(\Phi)$, который определен по NmF_2 на данной исправленной геомагнитной широте Φ Северного полушария

и сопряженной широте Южного полушария, также преобладает полусуточная мода в суточных вариациях этих индексов. Для заданной солнечной активности амплитуда суточных изменений глобального индекса AI обычно меньше, чем локального индекса $AI(\Phi)$, в том числе из-за сдвига фаз суточных вариаций $AI(\Phi)$ на разных широтах. Кроме того, в дневные часы с ростом уровня солнечной активности индекс $AI(\Phi)$ уменьшается на относительно низких широтах и увеличивается на средних и высоких широтах. В результате в дневные часы глобальный индекс AI почти не зависит от уровня солнечной активности.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Демин М.Г., Шубин В.Н., Демин Р.Г. Зависимость годовой асимметрии в $NmF2$ от геомагнитной широты и солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 61. № 3. С. 347—353. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021030032>
- Демин М.Г., Демин Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для $NmF2$ от местного времени и солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 63. № 2. С. 147—153. 2023.
<https://doi.org/10.31857/S0016794022600636>
- Шубин В.Н. Глобальная эмпирическая модель критической частоты $F2$ -слоя ионосферы для спокойных геомагнитных условий // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 4. С. 450—462. 2017.
<https://doi.org/10.7868/S0016794017040186>
- Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere // Adv. Radio Sci. V. 16. P. 1—11. 2018.
<https://doi.org/10.5194/ars-16-1-2018>
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international reference ionosphere model // Ann. Geophys. 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. № 6. P. 6727—6736. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024188>
- Gulyaeva T.L., Arian 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>
- Gustafsson G., Papitashvili N.E., Papitashvili V.O. A revised corrected geomagnetic coordinate system for Epochs 1985 and 1990 // J. Atmos. Terr. Phys. V. 54. № 11—12. P. 1609—1631. 1992.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90167-J](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90167-J)
- Jones W.B., Gallet R.M. The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // Telecommun. J. V. 29. № 5. P. 129—149. 1962.
- Jones W.B., Gallet R.M. Representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods // Telecommun. J. V. 32. № 1. P. 18—28. 1965.
- 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. № 5. P. 2503—2510. 2013.
<https://doi.org/doi:10.1002/jgra.50253>
- Mendillo M., Huang C.L., Pi X., Rishbeth H., Meier R. The global ionospheric asymmetry in total electron content // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 67. № 15. P. 1377—1387. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.06.021>
- 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.
<https://doi.org/10.1002/2014JA020929>
- 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. Geophys. V. 24. № 12. P. 3293—3311. 2006.
<https://doi.org/10.5194/angeo-24-3293-2006>
- 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. № 4. P. 1083—1097. 1984.
<https://doi.org/10.1029/RS019i004p01083>
- Rush C., Fox M., Bilitza D., Davies K., McNamara L., Stewart F., PoKempner M. Ionospheric mapping —an update of $foF2$ coefficients // Telecommun. J. V. 56. № 3. 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. № 8. P. 8816—8830. 2017a.
<https://doi.org/10.1002/2017JA024170>
- 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. № 8. P. 1585—1593. 2017b.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.03.017>
- 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. № 6. P. 889—907. 1971.
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90089-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90089-4)
- 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. Geophys. V. 25. № 12. P. 2513—2527. 2007.
<https://doi.org/10.5194/angeo-25-2513-2007>
 —Zeng Z., Burns A., Wang W., Lei J., Solomon S., Synder-
 gaard S., Qian L., Kuo Y.-H. Ionospheric annual asymmetry

observed by the COSMIC radio occultation measurements
 and simulated by the TIEGCM // J. Geophys. Res. —
 Space. V. 113. № 7. A07305. 2008.
<https://doi.org/10.1029/2007JA012897>

Dependence of annual asymmetry in $NmF2$ on local time

V. N. Shubin^{1, *}, V. I. Badin¹, M. G. Deminov¹, R. G. Deminov²

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences
 (IZMIRAN), Moscow, Russia

²Kazan Federal University, Kazan, Russia

*e-mail: shubin@izmiran.ru

Based on the global empirical model of the $F2$ layer critical frequency median (Satellite and Digisonde Data Model of the $F2$ layer, SDMF2), an analysis was made of the properties of diurnal variations in the annual asymmetry in the concentration of the $F2$ layer maximum $NmF2$ at different values of the solar activity index F . The AI index, which characterizes the relative difference in $NmF2$ averaged over all longitudes and latitudes between January and July at a given local time, was used as a parameter of this asymmetry. It was found that the diurnal variations of the AI index are dominated by a semidiurnal mode with maxima in the daytime and at night. The daytime maximum of the AI index is almost independent of the level of solar activity. The nighttime AI maximum decreases with increasing solar activity. For low solar activity, the daytime and nighttime AI maxima almost coincide in amplitude when $AI = 16$ —17%. The difference in the solar radio flux between January and July due to the ellipticity of the Earth's orbit relative to the Sun makes a significant contribution to the AI index at all hours of the day. On average, it is 3—4% and can reach 5% with low solar activity at night. The difference in the AI index for low and high activity according to the IRI model (with URSI and, especially, CCIR coefficients) is overestimated relative to the SDMF2 model at almost all hours of the day, apparently due to the limited number of experimental data when obtaining the CCIR and URSI coefficients especially over the oceans