

## ЗАВИСИМОСТЬ ЛОКАЛЬНОГО ИНДЕКСА ГОДОВОЙ АСИММЕТРИИ ДЛЯ МЕДИАНЫ $NmF2$ ОТ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2023 г. М. Г. Деминов<sup>1</sup>, \*, Г. Ф. Деминова<sup>1</sup>

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

\*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 28.03.2023 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  $R$  в полдень от солнечной активности, где индекс  $R$  – отношение январь/июль суммарной концентрации  $NmF2$  для этой пары станций. Используются средние за 81 день индексы солнечной активности:  $F_{obs}$  – плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, измеренная с помощью наземных радиотелескопов, и  $F_{adj}$  – значения  $F_{obs}$ , приведенные к фиксированному расстоянию от Солнца в одну астрономическую единицу. Получено, что уравнения регрессии, отражающие зависимости медиан  $NmF2$  от  $F_{obs}$ , позволяют получить индекс годовой асимметрии  $R$  для фиксированного  $F_{obs}$  с учетом замены  $F_{obs}$  на  $cF_{obs}$  в этих уравнениях регрессии, где коэффициент  $c$  равен 1.03 и 0.97 для января и июля. Вариант  $c = 1$  соответствует пренебрежению годовой асимметрией в индексе  $F_{obs}$  из-за эллиптичности орбиты Земли. Для варианта  $c = 1$  индекс  $R$  увеличивается с ростом солнечной активности от 1.2 при низкой до почти 1.4 при высокой активности. Дополнительный учет годовой асимметрии в  $F_{obs}$  приводит к увеличению индекса  $R$  примерно на 0.1 почти независимо от уровня солнечной активности. Этот вывод получен, по-видимому, впервые. Индекс  $F_{adj}$  также позволяет получить корректную оценку индекса  $R$ , поскольку годовая асимметрия в потоке солнечного излучения косвенно учтена через экспериментальные значения  $NmF2$ .

DOI: 10.31857/S0016794023600060, EDN: OUNBVC

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Годовая асимметрия – это особенность ионосферных явлений, когда глобально усредненная концентрация электронов в январе больше, чем в июле [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. В качестве индекса этой асимметрии, например, для концентрации максимума  $F2$ -слоя  $NmF2$ , 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]

$$AI = (R - 1) / (R + 1), \quad (2)$$

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 использован индекс  $R$  для медиан  $NmF2$  за месяц.

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. Затем 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  $R$  требуют, чтобы  $NmF2$  соответствовали фиксированному уровню (или интервалу) солнечной активности. На фазах роста и спада солнечного цикла это требование редко удовлетворяется. Поэтому основная доля работ по анализу причин годовой асимметрии в  $NmF2$  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].

Для решения этой проблемы можно получить эмпирические зависимости  $NmF2$  от солнечной активности для фиксированного местного времени в январе и июле для каждой из пар анализируемых станций [Деминов и Деминова, 2021, 2023]. Для этого необходим достаточно большой массив данных  $NmF2$  по этим станциям. В результате, для выбранной пары станций может быть определен индекс  $R$  для данного часа местного времени при любом фиксированном уровне солнечной активности. Эта методика была реализована для конкретной пары станций: для каждой станции этой пары для каждого месяца года были использованы уравнения регрессии

$$NmF2 = a_0 + a_1 F_{obs} + a_2 (F_{obs})^2 \quad (3)$$

для данного местного времени, где  $NmF2$  — медиана концентрации максимума  $F2$ -слоя,  $F_{obs}$  — средняя за 81 день (центрированная на середину данного месяца) плотность потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см (индекс  $F107$ ), измеренная с помощью наземного радиотелескопа. Коэффициенты  $a_j$  этих уравнений определялись по данным измерений  $NmF2$  и  $F_{obs}$  в интервале 40–50 лет. В результате была определена зависимость локального индекса годовой асимметрии  $R$  от  $F_{obs}$  для выбранной пары станций. Этот вариант вычисления  $R$  соответствует случаю, когда значения  $F_{obs}$  в январе и июле совпадают [Деминов и Деминова, 2021, 2023].

Для более полного учета вклада солнечного излучения в годовую асимметрию необходимо принять во внимание, что в среднем плотность потока солнечного радиоизлучения (и ионизирующего излучения Солнца) в январе больше, чем в июле, из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца. Этот эффект для годовой асимметрии исследовался на основе численного моделирования [Dang et al., 2017], но не был выделен по экспериментальным данным. Главной целью данной работы было решение этой задачи для медианы  $NmF2$  в полдень на средних широтах, т.е. определение свойств локального индекса годовой асимметрии по экспериментальным данным с учетом средней разницы в индексах солнечной активности в январе и июле.

## 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  $\Phi$  и исправленная геомагнитная широта  $\Phi^*$ . Широты  $\Phi$  и  $\Phi^*$  приведены для 1985 г., что примерно соответству-

ет середине анализируемого интервала времени. Эти широты получены с помощью моделей, приведенных в Интернете ([wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ig-rf/gggm](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ig-rf/gggm), [omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo](http://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 индикаторов солнечной активности для медианы  $NmF2$  за месяц использованы средние за 81 день (центрированные на середину данного месяца) индексы этой активности:  $F_{obs}$  — плотность потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, измеренная с помощью наземного радиотелескопа;  $F_{adj}$  — пересчитанная для среднего расстояния Солнце–Земля (1 астрономическая единица) величина  $F_{obs}$ ;  $Ri$  — относительное число солнечных пятен, новая версия. Отметим, что исходными для вычисления этих индексов были ежедневные значения  $F107_{obs}$ ,  $F107_{adj}$  и  $Ri$ . Дополнительно использован индекс

$$\begin{aligned} cF_{obs} &= 1.03F_{obs} \text{ для января,} \\ cF_{obs} &= 0.97F_{obs} \text{ для июля,} \end{aligned} \quad (4)$$

где численные коэффициенты примерно равны отношению  $F_{obs}/F_{adj}$  для этих месяцев. Кроме того, использован индекс

$$F_{Ri} = 64 + 0.6Ri + 2.4 \times 10^{-4} Ri^2, \quad (5)$$

где  $F_{Ri}$  есть индекс  $Ri$ , приведенный к масштабу (шкале) индекса  $F_{adj}$ . Уравнение (5) является уравнением связи (регрессии) индекса  $F_{adj}$  с  $Ri$ , коэффициенты которого определены по данным индексов  $F_{adj}$  и  $Ri$  за 1963–2013 гг.

Перечисленные индексы солнечной активности были использованы для получения зависимостей (уравнений регрессии) медиан  $NmF2$  от каждого из этих индексов. Коэффициенты уравнений регрессии определялись по массиву данных медиан  $foF2$  за 1963–2013 гг. для выбранных условий. При анализе использовались дополнительные ограничения:

$$2 < foF2 < 20 \text{ МГц, } 80 < F_{obs} < 220. \quad (6)$$

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 уравнений регрессии, т.е. получения эмпирической модели зависимости медиан  $NmF2$  от перечисленных индексов солнечной активности для выбранных условий. Этими уравнениями регрессии являются уравнение (3) для индекса  $F_{\text{obs}}$  и уравнения

$$NmF2 = b_0 + b_1 F_{\text{adj}} + b_2 (F_{\text{adj}})^2, \quad (7)$$

$$NmF2 = c_0 + c_1 F_{\text{Ri}} + c_2 (F_{\text{Ri}})^2 \quad (8)$$

для индексов  $F_{\text{adj}}$  и  $F_{\text{Ri}}$ . Уравнения (3), (7) и (8) являются эмпирическими моделями зависимости медиан  $NmF2$  от индексов  $F_{\text{obs}}$ ,  $F_{\text{adj}}$  и  $F_{\text{Ri}}$ , коэффициенты которых определены по массивам исходных данных  $NmF2$  и этих индексов. Для получения зависимости медиан  $NmF2$  от индекса  $cF_{\text{obs}}$  использовано уравнение (3) с известными коэффициентами  $a_j$ , полученными для зависимости  $NmF2$  от индекса  $F_{\text{obs}}$ , в котором произведена замена  $F_{\text{obs}}$  на  $cF_{\text{obs}}$ , т.е.

$$NmF2 = a_0 + a_1 cF_{\text{obs}} + a_2 (cF_{\text{obs}})^2, \quad (9)$$

где  $cF_{\text{obs}}$  определено уравнением (4).

Перечисленные уравнения регрессии с известными коэффициентами для станций Боулдер и Хобарт в январе и июле позволяют по уравнению (1) получить зависимости индекса годовой асимметрии  $R$  от каждого из рассмотренных индексов солнечной активности. Результат показан на рис. 1 в виде зависимостей локального индекса  $R$  от индекса  $F$ , где  $F = F_{\text{obs}}$ ,  $F = F_{\text{adj}}$  и  $F = F_{\text{Ri}}$  для уравнений (3), (7) и (8). В каждом из этих случаев индекс  $R$  вычислен при совпадающих значениях индекса  $F$  для станций Боулдер и Хобарт в январе и июле. Вариант  $cF_{\text{obs}}$  на этом рисунке соответствует случаю, когда  $F = F_{\text{obs}}$ , но вычисления проводятся по уравнениям (9) с учетом поправок (4) на индекс  $F_{\text{obs}}$  для января и июля. Из данных на этом рисунке следует, что индекс годовой асимметрии  $R$  минимален для  $F = F_{\text{obs}}$ . Этот вариант соответствует случаю, когда индекс  $R$  для заданного значения  $F_{\text{obs}}$  вычислен по уравнениям (3) для станций Боулдер и Хобарт в январе и июле для этого заданного значения  $F_{\text{obs}}$ . Индекс  $R$  для  $F = cF_{\text{obs}}$  больше, чем для  $F = F_{\text{obs}}$ , и эта разница примерно равна 0.1 для всего анализируемого интервала изменения  $F_{\text{obs}}$ . Следовательно, дополнительный учет влияния поправок (4) на индекс  $F_{\text{obs}}$  для января и июля из-за изменения расстояния Солнце–Земля приводит к отчетливому увеличению  $R$ .

Из рис. 1 видно, что индексы  $R$  для вариантов  $F = cF_{\text{obs}}$  и  $F = F_{\text{adj}}$  практически совпадают. Медиана  $NmF2$  соответствует значению  $NmF2$  в кон-

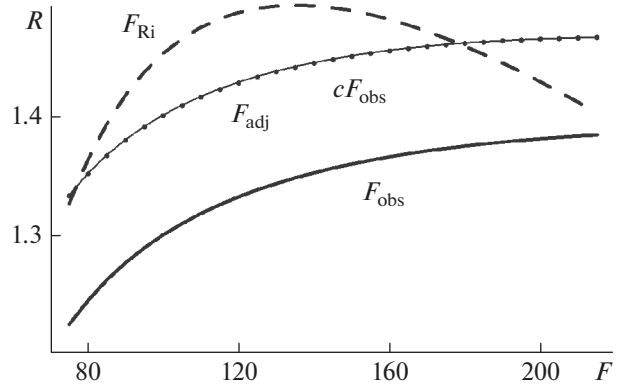


Рис. 1. Зависимости локального индекса годовой асимметрии  $R$  от индексов солнечной активности  $F_{\text{obs}}$  (толстая линия),  $cF_{\text{obs}}$  (тонкая линия),  $F_{\text{adj}}$  (точки) и  $F_{\text{Ri}}$ , (штриховая линия) полученные с помощью уравнений регрессии (3), (7)–(9).

кретный день данного месяца (для нечетного числа измерений  $NmF2$  в этот месяц), которому соответствует индекс  $F_{\text{adj}}$  для этого дня. Численные коэффициенты в уравнении (4) для  $cF_{\text{obs}}$  примерно равны отношению  $F_{\text{obs}}/F_{\text{adj}}$ , которые центрированы на середину данного месяца. В течение месяца величина  $F_{\text{obs}}/F_{\text{adj}}$  изменяется очень слабо. С этим, по-видимому, связано практическое совпадение индексов  $R$  для вариантов  $F = cF_{\text{obs}}$  и  $F = F_{\text{adj}}$  на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что индекс  $R$  для  $F = F_{\text{Ri}}$  больше, чем для  $F = F_{\text{obs}}$ . Индексы  $R$  для  $F_{\text{Ri}}$  и  $F_{\text{adj}}$  во многом подобны, поскольку они не зависят от времени года, но индекс  $F_{\text{Ri}}$  является менее точным индикатором солнечной активности, чем  $F_{\text{adj}}$ . Например, для ст. Боулдер в январе в полдень стандартные отклонения  $\sigma$  (в  $10^{11} \text{ м}^{-3}$ ) измеренных значений  $NmF2$  от вычисленных по уравнению (7) для  $F_{\text{adj}}$  составляют 0.8, а для уравнения (8) с индексом  $F_{\text{Ri}}$  величина  $\sigma$  равна 1.2. Следовательно, относительное число солнечных пятен  $Ri$  не является оптимальным индикатором солнечной активности для зависимости индекса годовой асимметрии  $R$  от этой активности.

На рис. 2 приведены зависимости медиан  $NmF2$  от солнечной активности в полдень в январе и июле, полученные без учета ( $F = F_{\text{obs}}$ ) и с учетом ( $F = cF_{\text{obs}}$ ) дополнительной поправки (4) на индекс  $F_{\text{obs}}$  из-за изменения расстояния Солнце–Земля в эти месяцы года. Учет этой поправки приводит к дополнительному увеличению  $NmF2$  в январе и уменьшению  $NmF2$  в июле. Из данных на рис. 2 следует, что зависимость  $NmF2$  от  $F_{\text{obs}}$  местной зимой гораздо сильнее, чем летом. Поэтому изменения  $NmF2$  при дополнительной учете поправки (4) максимальны местной зимой:

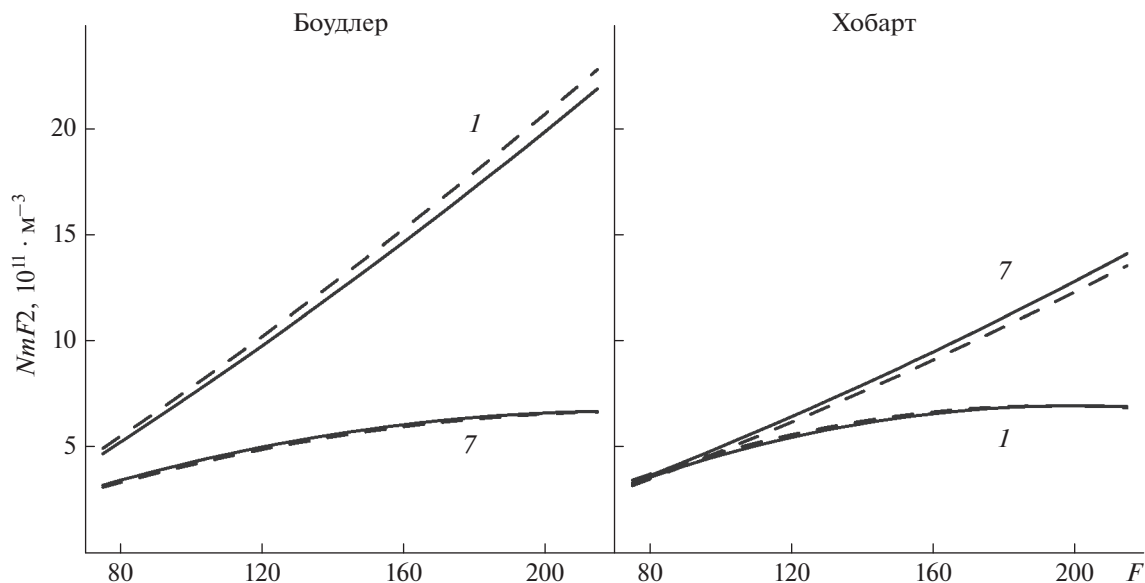


Рис. 2. Зависимости медиан  $NmF2$  в полдень от индексов  $F_{obs}$  (сплошные линии) и  $cF_{obs}$  (штриховые линии) в январе (1) и июле (7) для станций Боулдер и Хобарт.

увеличение  $NmF2$  в январе в Северном полушарии (Боулдер) и уменьшение  $NmF2$  в июле в Южном полушарии (Хобарт). Для местного лета такие изменения  $NmF2$  обычно можно не учитывать. Следовательно, увеличение индекса годовой асимметрии  $R$  при дополнительном учете поправки (4) на индекс  $F_{obs}$  обусловлено в основном изменениями  $NmF2$  местной зимой из-за относительной сильной зависимости  $NmF2$  от солнечной активности в этот сезон.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ

Для любой локальной ионосферной станции зависимость  $NmF2$  от  $F_{obs}$  точнее зависимости  $NmF2$  от  $F_{adj}$  или  $F_{Ri}$ , поскольку индекс  $F_{obs}$  в большей степени соответствует ионизации и нагреву атмосферы из-за ультрафиолетового излучения Солнца. При анализе годовых изменений  $NmF2$  необходимо дополнительно учесть среднее изменение  $F_{obs}$  в течение года с максимумом в январе и минимумом в июле из-за эллиптичности орбиты Земли относительно Солнца. Амплитуда этого изменения незначительна: для фиксированного индекса  $F_{adj}$  отношение  $(F_{obs})_{Jan}/(F_{obs})_{July} = 1.06$  (см. уравнение (4)). Этот эффект можно учесть в два этапа: построить эмпирическую зависимость  $NmF2$  от  $F_{obs}$  для каждого месяца года (аналогично уравнению (3)), затем в этой зависимости заменить  $F_{obs}$  на  $cF_{obs}$  аналогично уравнениям (4) и (9). Следует отметить, что такая замена целесообразна для анализа именно годовых изменений  $NmF2$ .

Другой вариант анализа годовых изменений  $NmF2$  связан с построением эмпирической зави-

симости  $NmF2$  от  $F_{adj}$ . В индексе  $F_{adj}$  исключена поправка на эллиптичность орбиты Земли, но экспериментальные значения  $NmF2$  зависят от этой эллиптичности через ионизацию и нагрев атмосферы, обеспечивая дополнительное увеличение  $NmF2$  в январе. Поэтому коэффициенты уравнения регрессии (7) для  $F_{adj}$  обеспечивают такое дополнительное увеличение  $NmF2$ . В результате, зависимости индекса годовой асимметрии  $R$  от индексов солнечной активности  $cF_{obs}$  и  $F_{adj}$  совпадают (рис. 1). Это означает, что в среднем годовые изменения  $F_{obs}$  действительно таковы, что они максимальны в январе и минимальны в июле при прочих равных условиях на Солнце, и эти изменения соответствуют уравнению (4) для любого фиксированного  $F_{obs}$ .

Аналогичным свойством обладает индекс  $F_{Ri}$ , т.е. в эмпирической зависимости  $NmF2$  от  $F_{Ri}$  эллиптичность орбиты Земли косвенно учтена через коэффициенты этой зависимости. Тем не менее, зависимость  $NmF2$  от  $F_{Ri}$  является менее точной, чем зависимость  $NmF2$  от  $F_{adj}$ . Этот вывод согласуется с полученными ранее результатами сопоставления крайнего ультрафиолетового (EUV) излучения Солнца как основного источника ионизации и нагрева термосферы с разными индексами солнечной активности: было получено, что индекс  $F107$  является лучшим индикатором солнечного EUV-излучения для исследования процессов с большими временными масштабами (больше 1.4 года) [Wintoft, 2011].

Годовая асимметрия в  $NmF2$  обусловлена эллиптичностью орбиты Земли относительно Солнца

через ионизацию термосферы и процессы нагрева термосферы, включая изменение температуры, плотности и состава термосферы (см., например, [Dang et al., 2017]). В данном случае приведенная на рис. 1 зависимость индекса  $R$  от  $F_{\text{obs}}$  косвенно соответствует учету процессов нагрева термосферы, зависимость индекса  $R$  от  $cF_{\text{obs}}$  — дополнительно учету ионизации термосферы. Из данных на рис. 1 следует, что вклад процессов нагрева термосферы в индекс  $R$  значителен:  $R$  изменяется от 1.22 при низкой до 1.38 при высокой солнечной активности по индексу  $F_{\text{obs}}$ . Дополнительный учет изменения скорости ионизации термосферы из-за эллиптичности орбиты Земли приводит к увеличению индекса  $R$  примерно на 0.1. Более наглядно об этих изменениях можно судить по индексу  $AI$  (см. уравнение (2)). В данном случае вклад процессов нагрева термосферы дает значения  $AI$  от 10% до 16% при низкой и высокой солнечной активности соответственно. Дополнительный учет изменения скорости ионизации термосферы из-за эллиптичности орбиты Земли приводит к увеличению индекса  $AI$  примерно на 5%, что в 2–3 раза меньше вклада процессов нагрева термосферы в годовую асимметрию  $NmF2$ . Этот вывод не противоречит результатам численного моделирования годовой асимметрии  $NmF2$  при низкой солнечной активности: вклад прямой ионизации атомного кислорода дает  $AI = 6\%$ , вклад рекомбинации с нейтральными частицами дает  $AI = 12–15\%$  [Dang et al., 2017].

#### 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  $R$  в полдень от солнечной активности, где индекс  $R$  — отношение январь/июль суммарной концентрации  $NmF2$  для этой пары станций. В качестве индикаторов солнечной активности для медианы  $NmF2$  за месяц использованы средние за 81 день индексы этой активности, которые центрированы на середину данного месяца:  $F_{\text{obs}}$  — плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, измеренная с помощью наземных радиотелескопов;  $F_{\text{adj}}$  — значения  $F_{\text{obs}}$ , приведенные к фиксированному расстоянию 1 астрономическая единица от Солнца;  $Ri$  — относительное число солнечных пятен, новая версия. Получены следующие выводы.

1. Уравнения регрессии, отражающие зависимости медиан  $NmF2$  от  $F_{\text{obs}}$ , позволяют получить индекс годовой асимметрии  $R$  для фиксированного  $F_{\text{obs}}$  с учетом замены  $F_{\text{obs}}$  на  $cF_{\text{obs}}$  в этих уравнениях регрессии, где коэффициент  $c$  равен 1.03 и 0.97 для января и июля. Вариант  $c = 1$  соответ-

ствует пренебрежению годовой асимметрией в индексе  $F_{\text{obs}}$  из-за эллиптичности орбиты Земли. Для варианта  $c = 1$  индекс  $R$  увеличивается с ростом солнечной активности от 1.2 при низкой до почти 1.4 при высокой активности. Дополнительный учет годовой асимметрии в  $F_{\text{obs}}$  приводит к увеличению индекса  $R$  примерно на 0.1 почти независимо от уровня солнечной активности. Этот вывод по экспериментальным данным  $NmF2$  получен, по-видимому, впервые.

2. Уравнения регрессии, отражающие зависимости медиан  $NmF2$  от  $F_{\text{adj}}$ , позволяют получить индекс  $R$  для фиксированного  $F_{\text{adj}}$ , в котором косвенно учтена годовая асимметрия в потоке солнечного излучения через асимметрию январь–июль в экспериментальных значениях  $NmF2$ . В результате, индекс  $R$  для фиксированного индекса  $F_{\text{obs}}$  с учетом замены  $F_{\text{obs}}$  на  $cF_{\text{obs}}$  и индекс  $R$  для фиксированного  $F_{\text{adj}} = F_{\text{obs}}$  практически совпадают.

3. Зависимость индекса  $R$  от относительного числа солнечных пятен  $Ri$  во многом подобна зависимости  $R$  от  $F_{\text{adj}}$ , но индекс  $Ri$  является менее точным индикатором солнечной активности, чем  $F_{\text{adj}}$ . Поэтому индекс  $Ri$  не является оптимальным индикатором солнечной активности для зависимости годовой асимметрии в  $NmF2$ .

#### 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/>) и Solar Influences Data Analysis Center (SIDC, <http://sidc.oma.be/silso/>).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для  $NmF2$  от солнечной активности // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 61. № 2. С. 224–231. 2021. <https://doi.org/10.31857/S001679402102005X>
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Зависимость локального индекса годовой асимметрии для  $NmF2$  от местного времени и солнечной активности // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 63. № 2. С. 147–153. 2023. <https://doi.org/10.31857/S0016794022600636>
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international ref-

- erence ionosphere model // *Ann. Geophys. Discuss.* 2018. <https://doi.org/doi: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>
- *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. № 7. P. 7238–7244. 2016. <https://doi.org/10.1002/2016JA022648>
- *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>
- *Wintoft P.* The variability of solar EUV: A multiscale comparison between sunspot number, 10.7 cm flux, LASP MgII index, and SOHO/SEM EUV flux // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* V. 73. № 13. P. 1708–1714. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.009>
- *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. – Space.* V. 113. A07305. 2008. <https://doi.org/doi:10.1029/2007JA012897>