

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

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

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

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 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: OUNBBC

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 [Демин и Демина, 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

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

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 [Демин и Демина, 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 Φ и исправленная геомагнитная широта Φ^* . Широты Φ и Φ^* 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, 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} ; R_i — относительное число солнечных пятен, новая версия. Отметим, что исходными для вычисления этих индексов были ежедневные значения $F107_{\text{obs}}$, $F107_{\text{adj}}$ и R_i . Дополнительно использован индекс

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

где численные коэффициенты примерно равны отношению $F_{\text{obs}}/F_{\text{adj}}$ 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:

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

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

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

где cF_{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_{obs} на этом рисунке соответствует случаю, когда $F = F_{\text{obs}}$, но вычисления проводятся по уравнениям (9) с учетом поправок (4) на индекс F_{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_{obs} вычислен по уравнениям (3) для станций Боулдер и Хобарт в январе и июле для этого заданного значения F_{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_{obs} . Следовательно, дополнительный учет влияния поправок (4) на индекс F_{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-

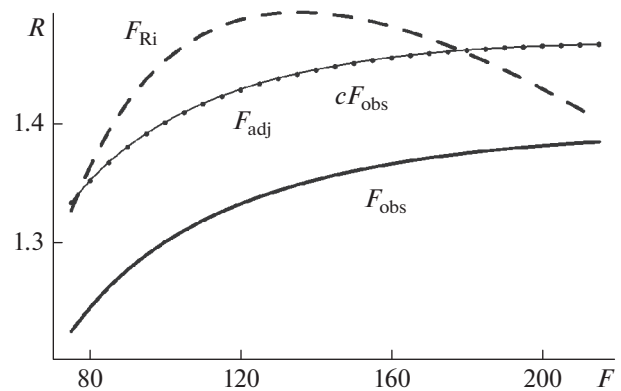


Рис. 1. Зависимости локального индекса годовой асимметрии R от индексов солнечной активности F_{obs} (толстая линия), cF_{obs} (тонкая линия), F_{adj} (точки) и F_{Ri} (штриховая линия) полученные с помощью уравнений регрессии (3), (7)–(9).

кретный день данного месяца (для нечетного числа измерений $NmF2$ в этот месяц), которому соответствует индекс F_{adj} для этого дня. Численные коэффициенты в уравнении (4) для cF_{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_{Ri} и F_{adj} во многом подобны, поскольку они не зависят от времени года, но индекс F_{Ri} является менее точным индикатором солнечной активности, чем F_{adj} . Например, для ст. Боулдер в январе в полдень стандартные отклонения σ (в 10^{11} м^{-3}) измеренных значений $NmF2$ от вычисленных по уравнению (7) для F_{adj} составляют 0.8, а для уравнения (8) с индексом F_{Ri} величина σ 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_{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_{obs} местной зимой гораздо сильнее, чем летом. Поэтому изменения $NmF2$ при дополнительном учете поправки (4) максимальны местной зимой:

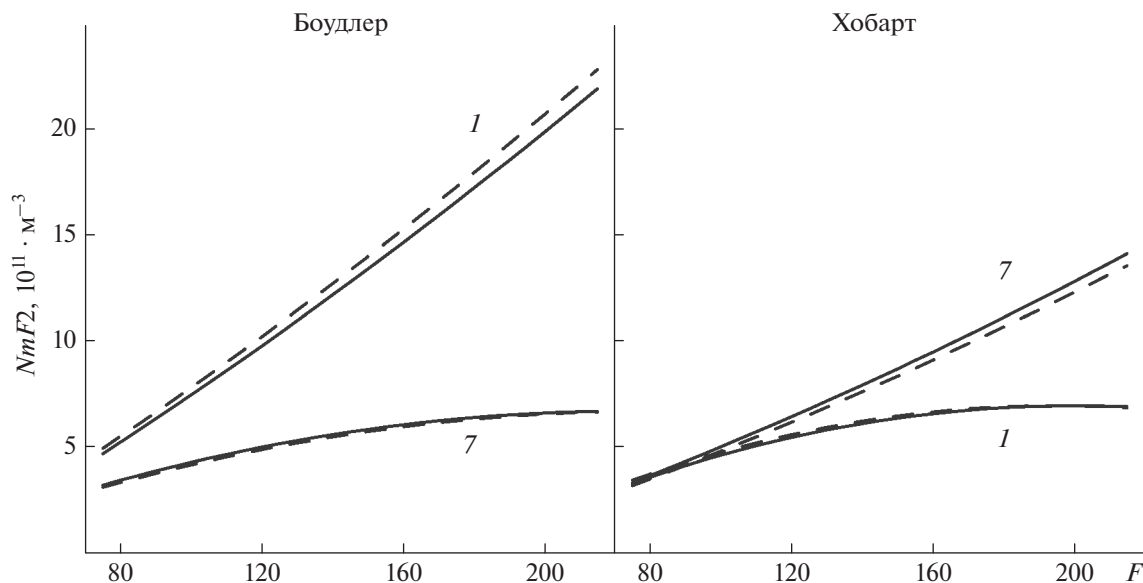


Рис. 2. Зависимости медиан $NmF2$ в полдень от индексов F_{obs} (сплошные линии) и cF_{obs} (штриховые линии) в январе (1) и июле (7) для станций Боулдер и Хобарт.

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 F_{107} 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_{obs} косвенно соответствует учету процессов нагрева термосферы, зависимость индекса R от cF_{obs} — дополнительному 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_{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_{obs} — плотность потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см, измеренная с помощью наземных радиотелескопов; F_{adj} — значения F_{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_{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 $c = 1$ соответ-

ствует 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 по экспериментальным данным $NmF2$ получен, по-видимому, впервые.

2. Уравнения регрессии, отражающие зависимости медиан $NmF2$ от F_{adj} , позволяют получить индекс R для фиксированного F_{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_{obs} с учетом замены F_{obs} на cF_{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_{adj} , но индекс Ri является менее точным индикатором солнечной активности, чем F_{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/wdccc1/>) 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>