

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

© 2021 г. М. Г. Деминов¹, *, Г. Ф. Деминова¹

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

*e-mail: deminov@izmiran.ru

Поступила в редакцию 03.06.2020 г.

После доработки 11.07.2020 г.

Принята к публикации 24.09.2020 г.

На основе ежедневных данных о полуденных значениях концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ на паре ионосферных станций Боулдер–Хобарт за 1963–2002 гг. проведен анализ зависимости локального индекса годовой асимметрии AI от солнечной активности. Этот индекс характеризует относительную разницу в суммарной концентрации $NmF2$ в январе и июле для данной пары станций. Для анализа использован средневзвешенный индекс геомагнитной активности $ap(\tau)$ при $\tau = 0.8$. Выделены низкая ($ap(\tau) < 9$) и умеренная ($9 < ap(\tau) < 20$) геомагнитные активности. Впервые установлено, что для низкой геомагнитной активности индекс AI увеличивается от 0.08 при низкой солнечной активности до 0.11–0.12 при умеренно высокой и высокой солнечной активности. Индекс AI для умеренной геомагнитной активности больше, чем для низкой геомагнитной активности, на величину $\Delta AI = 0.04$ – 0.05 , почти не зависящую от уровня солнечной активности. Индекс AI для медиан $NmF2$ увеличивается от 0.08 при низкой солнечной активности до 0.15–0.16 при высокой солнечной активности, что указывает на важную роль геомагнитной активности в зависимости этого индекса от солнечной активности. Дана качественная интерпретация этих закономерностей.

DOI: 10.31857/S001679402102005X

1. ВВЕДЕНИЕ

Годовая асимметрия (годовая аномалия, декабрьская аномалия) – это ионосферные явления, в которых глобально усредненная концентрация электронов в январе больше, чем в июле [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. Для выделения этой асимметрии используют концентрацию максимума $F2$ -слоя $NmF2$ по данным сети ионосферных станций [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018b], внешнего зондирования ионосферы [Gulyaeva et al., 2014] или по данным радиозатменных измерений на спутниках FORMOSAT-3/COSMIC [Zeng et al., 2008; Sai Gowtam and Tulas 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 Tulas Ram, 2017b]. В качестве характеристики этой асимметрии, например, 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., 2018b]. Ниже использован индекс AI , поскольку он применялся для анализа достаточно часто [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Zeng et al., 2008; Sai Gowtam and Tulas Ram, 2017a; Brown et al., 2018b]. Для оценки величины R по известному индексу AI можно использовать соотношение $R = (1 + AI)/(1 - AI)$.

Для получения индекса AI 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. По данным этих станций последовательно вычисляют локальные индексы AI для каждой пары станций и среднее по всем выбранным парам станций значение AI . Это среднее значение AI и есть глобаль-

ный индекс AI по данным ионосферных станций. Для получения корректной оценки AI обычно требуют, чтобы $NmF2$ соответствовали фиксированному уровню (или интервалу) солнечной активности. На фазах роста и спада солнечного цикла это требование редко удовлетворяется, поскольку за интервал в половину года (с января по июль) 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 январе и июле в эти годы [Sai Gowtam and Tulası Ram, 2017b]. Один из способов уменьшить влияние этой особенности индекса AI основан на использовании в уравнении (1) для января данного года величины $NmF2(N + S)_{Jan}$ в этот год и среднего за предыдущий и последующий годы значения $NmF2(N + S)_{July}$. Аналогично, для июля данного года в уравнении (1) используют $NmF2(N + S)_{July}$ и среднее за предыдущий и последующий годы значение $NmF2(N + S)_{Jan}$ [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. 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]. Другой способ учета солнечной активности при определении индекса AI основан на усреднении данных пар ионосферных станций для определенных интервалов солнечной активности [Brown et al., 2018b]. Результаты, полученные таким способом, показали, что средние значения AI совпали для низкой и высокой солнечной активности [Brown et al., 2018b]. Следовательно, вопрос о зависимости индекса AI от солнечной активности остается в значительной степени открытым. Вопрос о выделении вклада геомагнитной активности в индекс AI даже не ставился.

Проблема годовой асимметрии в $NmF2$ хорошо известна. Учет только разницы в скорости ионизации атмосферы в декабрьское и июньское солнцестояния из-за эллиптичности орбиты Земли вокруг Солнца дает $AI = 0.034$ в полдень. Данные ионосферных станций [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Mikhailov and Perrone, 2015; Brown et al., 2018b] и радиозатменных измерений ионосферы на спутниках FORMOSAT-3/COSMIC [Zeng et al., 2008; Sai Gowtam and Tulası Ram, 2017a] показали, что индекс AI изменяется в пределах от 0.06 до 0.20, т.е. учета только разницы в скорости ионизации атмосферы недостаточно для объяснения экспериментально наблюдаемых значений AI . На основе решения обратных задач и моделирования были предложены различные объяснения годовой асимметрии $NmF2$, в кото-

рых отмечалась важная роль фотохимических и динамических процессов в атмосфере [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006; Zeng et al., 2008; Mikhailov and Perrone, 2015; Lei et al., 2016; Dang et al., 2017]. Тем не менее, проблему годовой асимметрии в $NmF2$ нельзя считать полностью решенной. Это обусловлено, в частности, отсутствием надежных знаний о зависимости AI от солнечной активности. Поэтому основная доля работ по анализу причин годовой асимметрии в $NmF2$ была выполнена для периодов продолжительной низкой солнечной активности, когда индексы солнечной активности не сильно различаются [Zeng et al., 2008; Mikhailov and Perrone, 2015; Lei et al., 2016; Dang et al., 2017].

Выше отмечалось, что годовая асимметрия в ионосфере анализировалась по средним за месяц или медианам $NmF2$ для каждой из пар станций на близких геомагнитных широтах в северном и южном полушариях [Rishbeth and Müller-Wodarg, 2006]. Средние за месяц и медианы $NmF2$ зависят от геомагнитной активности, и изменчивость этой активности достаточно большая [Деминов и Деминова, 2016]. Это не позволяет по медианам $NmF2$ получать корректные оценки зависимости индекса AI от солнечной активности для определенного интервала геомагнитной активности. Один из путей решения этой проблемы, предлагаемый нами, связан с использованием достаточно большого массива данных ежедневных значений $NmF2$ для фиксированного местного времени с целью получения эмпирических зависимостей $NmF2$ от солнечной активности в декабре и июле для каждой из пар анализируемых станций, например, для низкой геомагнитной активности. В результате может быть определена зависимость AI от солнечной активности для данного часа местного времени и данного интервала геомагнитной активности. При этом исчезает проблема разных уровней солнечной активности в январе и июле в конкретный год, поскольку в данном случае зависимость AI от солнечной активности означает, что индекс AI определен для каждого фиксированного значения этой активности.

Целью данной работы был предварительный анализ возможности использования предлагаемого метода на примере получения зависимости от солнечной активности локального индекса AI для конкретной пары ионосферных станций для двух интервалов геомагнитной активности: низкой и умеренной. Следует отметить, что элементы этого метода использовались для определения: а) регулярных изменений критической частоты $F2$ -слоя $foF2$ при низкой геомагнитной активности [Деминов и др., 2009]; б) свойств изменчивости $NmF2$ при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности [Деминов и др., 2015]; в) геомагнитной активности, которая соответствует медиане $foF2$ [Деминов и Деминова, 2016];

з) зависимости медианы $foF2$ от геомагнитной активности [Деминов и др., 2017].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Для анализа использованы данные $foF2$ станций Боулдер (Boulder, 40.0° N, 254.7° E, $\Phi = 48.7^\circ$ N, $\Phi^* = 49.2^\circ$ N) и Хобарт (Hobart, 42.9° S, 147.3° E, $\Phi = 51.1^\circ$ S, $\Phi^* = 54.2^\circ$ S) в полдень для января и июля в интервале 1963–2002 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 1980 г., что соответствует середине анализируемого интервала времени. Эти широты получены с помощью моделей, приведенных в Интернете (wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/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. Кроме того, не менее важным был достаточно большой объем данных $foF2$ в интервале 1963–2002 гг. 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., 2018b].

В качестве индикатора солнечной активности для $NmF2$ использован индекс

$$F = 0.5(F_1 + F_{81}), \quad (3)$$

где F_1 – измеренная величина потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см за предыдущий день, F_{81} – среднее за 81 день значение этого потока, которое центрировано на предыдущий день. В качестве индикатора геомагнитной активности для $NmF2$ использован индекс $ap(\tau)$ – средневзвешенное значение ap -индекса с характерным временем $T = 14$ ч или $\tau = \exp(-3/T) = 0.8$:

$$ap(\tau) = (1 - \tau)(ap_0 + ap_{-1}\tau + ap_{-2}\tau^2 + \dots), \quad (4)$$

где ap_0 , ap_{-1} и т.д. – значения ap -индекса в данный, предыдущий и т.д. трехчасовые интервалы [Wrenn, 1987]. Принято, что условия низкой или умеренной геомагнитной активности определяются первым или вторым из неравенств:

$$ap(\tau) < 9, \quad 9 < ap(\tau) < 20. \quad (5)$$

Выбор индекса F связан с тем, что аналогичный индекс использовался как достаточно адекватный индикатор солнечной активности для ежедневных значений солнечного ультрафиолетового излучения [Richards et al., 1994, 2006] и электронной концентрации максимума $F2$ -слоя [Lei et al., 2005; Liu et al., 2006; Ma et al., 2009, Деминов и др., 2015].

Индекс $ap(\tau)$ и его аналоги использовались как индикаторы вклада геомагнитной активности в параметры термосферы [Picone et al., 2002] и $foF2$ [Wrenn and Rodger, 1989; Fuller-Rowell et al., 2000; Kutiev and Muhtarov, 2003; Pietrella, 2012; Деминов и др., 2015; Деминов и Деминова, 2019; Шубин и Деминов, 2019] в периоды геомагнитных бурь. В этих работах значения τ изменялись в пределах от 0.7 до 0.9, и принятое нами значение $\tau = 0.8$ соответствует среднему из них. Критерий $ap(\tau) < 9$ для низкой геомагнитной активности практически не отличается от критерия, принятого в эмпирической модели STORM: поправка к $foF2$ на геомагнитную бурю отсутствует, если $ap(\tau) \leq 9$ нТл [Fuller-Rowell et al., 2000; Araujo-Pradere et al., 2002]. Критерий $9 < ap(\tau) < 20$ для умеренной геомагнитной активности почти не отличается от критерия, приведенного например, в работе [Pietrella, 2012].

Для определения зависимости $NmF2$ от солнечной активности для каждой из станций в январе или июле в полдень для низкой или умеренной геомагнитной активности использовалось уравнение регрессии

$$NmF2 = a_0 + a_1F + a_2F^2. \quad (6)$$

Коэффициенты этого уравнения определились по массиву данных $foF2$ за 1963–2002 гг. для выбранных условий. На этот массив были наложены дополнительные условия. В нем были оставлены только случаи, которые удовлетворяли условиям

$$2 < foF2 < 20 \text{ МГц}, \quad 80 < F < 220. \quad (7)$$

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 уравнения регрессии (6), т.е. получения эмпирической модели зависимости $NmF2$ от солнечной активности для выбранных условий.

Некоторые статистические характеристики уравнений регрессии (6) приведены в таблице 1. Из данных в таблице 1 видно, что число измерений N для рассмотренных случаев было достаточно большим и изменялось от 224 до 384. Коэффициент корреляции K местной зимой больше, чем местным летом, из-за более сильной зависимости $NmF2$ от F местной зимой. Из приведенных значений N и K следует, что зависимости (6) значимы для всех рассмотренных случаев при доверитель-

Таблица 1. Статистические характеристики уравнений регрессии (6) для анализируемых условий в январе ($nm = 1$) и июле ($nm = 7$): стандартное отклонение σ (в 10^{11} м^{-3}), коэффициент корреляции K , число измерений N

nm	Боулдер			Хобарт		
	σ	K	N	σ	K	N
Низкая геомагнитная активность						
1	2.0	0.91	347	1.2	0.76	290
7	1.4	0.64	384	1.4	0.88	365
Умеренная геомагнитная активность						
1	2.1	0.92	245	1.2	0.67	224
7	1.3	0.65	243	1.3	0.91	268
Медиана $NmF2$ за месяц						
1	0.9	0.98	25	0.7	0.87	24
7	0.6	0.86	30	0.9	0.96	28

ном уровне 99% [Ramachandran and Tsokos, 2009]. Стандартное отклонение модели (6) максимально для Боулдера в январе ($\sigma = 2 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$), для остальных случаев $\sigma = 1.2\text{--}1.4 \times 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Это связано с относительно высокими значениями $NmF2$ для Боулдера в январе.

Дополнительно была определена зависимость медиан $NmF2$ от солнечной активности по известным медианам $foF2$ за месяц для станций Боулдер и Хобарт за 1963–2002 гг. Для этого использовались уравнения регрессии, аналогичные уравнению (6), в которых $F = F_{81}$ и индекс F_{81} центрирован на середину месяца. На медианы $foF2$ и индексы F накладывались условия, которые совпадали с условиями (7) для ежедневных значений

этих величин. Статистические характеристики уравнений регрессии (6) для медиан $NmF2$ приведены в нижней части таблицы. Они показывают, что число измерений N для рассмотренных случаев изменялось от 24 до 30. Коэффициенты корреляции K и стандартные отклонения σ местной зимой были больше, чем местным летом, по аналогии с закономерностями изменения этих величин для ежедневных значений $NmF2$.

Уравнения регрессии (6) с известными коэффициентами позволяют по уравнению (1) получить зависимость локального индекса AI от солнечной активности для анализируемой пары станций в полдень. Результат показан на рис. 1 для низкой и умеренной геомагнитной активности, который основан на ежедневных значениях $NmF2$. Там же показана зависимость AI от солнечной активности для медиан $NmF2$. Из данных на этом рисунке можно видеть, что для низкой геомагнитной активности индекс $AI = 0.084$ для $F = 80$, достигает широкого максимума $AI = 0.117\text{--}0.119$ в интервале $F = 130\text{--}180$, далее плавно уменьшается до 0.11 для $F = 220$. Опуская некоторые детали, эту закономерность можно представить как увеличение индекса AI с ростом солнечной активности от $AI = 0.08$ при низкой солнечной активности до $AI = 0.11\text{--}0.12$ при умеренно высокой и высокой солнечной активности. Индекс AI для умеренной геомагнитной активности больше, чем для низкой геомагнитной активности, и разница между ними $\Delta AI = 0.04\text{--}0.05$ почти независимо от уровня солнечной активности. Для медиан $NmF2$ индекс AI увеличивается от 0.08 при низкой солнечной активности до 0.15–0.16 при высокой солнечной активности. Следовательно, индекс AI для медиан $NmF2$ при низкой и высокой солнечной активности почти не отличается от AI для ежедневных значений $NmF2$ для низкой и умеренной геомагнитной активности соответственно. Это указывает на важную роль геомагнитной активности в зависимости AI от солнечной активности для медиан $NmF2$.

На рисунке 2 приведены зависимости $NmF2$ от солнечной активности, полученные по уравнениям регрессии (6) в полдень в декабре и июле при низкой и умеренной геомагнитной активности для анализируемых станций. Они были получены по ежедневным значениям $NmF2$. Эти зависимости позволяют определить дополнительные свойства локального индекса AI , поскольку являются элементами этого индекса. Из данных на этом рисунке можно видеть, что для низкой геомагнитной активности ($ap(\tau) < 9$) местным летом концентрации $NmF2$ почти совпадают для анализируемой пары станций при любом уровне солнечной активности. Летом зависимость $NmF2$ от солнечной активности слабее, чем зимой. Местной зимой концентрация $NmF2$ для Боулдера больше, чем для Хобарта, при любом уровне сол-

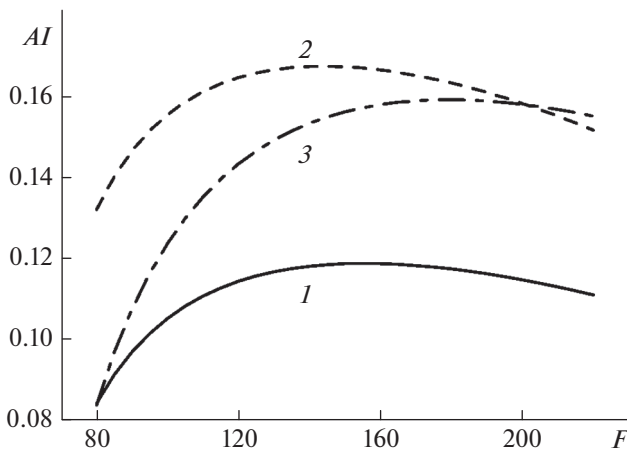


Рис. 1. Зависимости локального (Боулдер–Хобарт) индекса годовой асимметрии AI в полдень от индекса солнечной активности F для ежедневных значений $NmF2$ при низкой (1) и умеренной (2) геомагнитной активности и для медиан $NmF2$ (3).

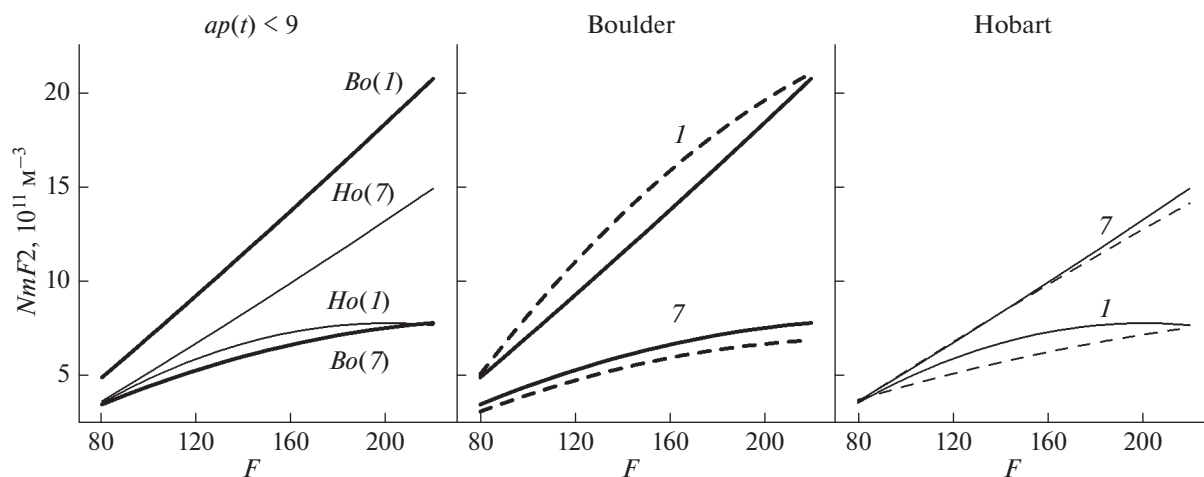


Рис. 2. Зависимости $NmF2$ от индекса солнечной активности F в полдень в январе (1) и июле (7) для станций Боулдер (Bo , толстые линии) и Хобарт (Ho , тонкие линии) при низкой (сплошные линии) и умеренной (штриховые линии) геомагнитной активности.

нечной активности, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Для умеренной геомагнитной активности ($9 < ap(\tau) < 20$) местным летом $NmF2$ меньше, чем при низкой геомагнитной активности, но эта разница незначительна. Для умеренной геомагнитной активности $NmF2$ в январе в Боулдере больше, чем для низкой геомагнитной активности. В Хобарте в июле значения $NmF2$ почти совпадают при низкой и умеренной геомагнитной активности.

Следовательно, положительные значения индекса AI и увеличение этого индекса с ростом солнечной активности обусловлены в основном тем, что $NmF2$ в январе в Боулдере больше, чем в июле в Хобарте, и эта разница увеличивается с ростом солнечной активности. Более высокие значения индекса AI для умеренной геомагнитной активности, чем для низкой, также обусловлены в основном увеличением $NmF2$ в январе в Боулдере.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Использование уравнения регрессии в виде полинома второй степени (6) для учета зависимости $NmF2$ от индекса F приводит к зависимости индекса AI от F с одним максимумом для всех приведенных на рис. 1 случаев. Дополнительный анализ показал, что увеличение степени полинома в этом уравнении регрессии приводит к более сложной зависимости AI от F , но общая картина этой зависимости сохраняется. Разница в концентрациях $NmF2$, от которых зависит индекс AI , минимальна при низкой солнечной и геомагнитной активности (см. рис. 2), что может приводить к заметным флуктуациям AI даже при относительно слабых изменениях $NmF2$. Анализ показал, что это может влиять на абсолютные значе-

ния AI при низкой солнечной активности без изменения характера зависимости AI от солнечной активности.

Вывод о том, что локальный индекс AI для умеренной геомагнитной активности больше, чем для низкой геомагнитной активности, по-видимому, является самым важным результатом данной работы. Но он получен только для данной пары станций Боулдер–Хобарт. Анализ возможности существования этого эффекта для других пар станций и, тем более, для глобального индекса AI может быть предметом будущих исследований. Тем не менее, даже данные станций Боулдер–Хобарт позволяют дать качественные оценки возможной причины этого эффекта. Выше отмечалось, что основная формальная причина увеличенного индекса AI для умеренной геомагнитной активности обусловлена тем, что для станции Боулдер в январе в полдень $NmF2$ для умеренной геомагнитной активности больше, чем для низкой геомагнитной активности. Можно предположить, что такое увеличение $NmF2$ обусловлено генерацией крупномасштабных внутренних гравитационных волн (ВГВ) токами авроральных электроструй в периоды магнитосферных суббурь [Hunsucker, 1982; Hocke and Schlegel, 1996]. Для частоты появления суббурь характерны полугодовой и годовой компоненты. Годовой компонент имеет максимум в зимнем полушарии [Tanskanen et al., 2011]. Эта закономерность согласуется с данными измерений потоков ускоренных электронов, с которыми связаны дискретные полярные сияния: такие потоки возникают главным образом в темноте (зимнее полушарие предпочтительнее летнего и ночь благоприятнее дня), подтверждая важную роль ионосферной проводимости в возникновении

дискретных сияний [Newell et al., 2001, 2010]. Крупномасштабные ВГВ, распространяясь от высоких к средним широтам, затухают. Это затухание обусловлено в основном молекулярной вязкостью (см., например, [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]). Коэффициент молекулярной вязкости обратно пропорционален плотности термосферы [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Поэтому, при прочих равных условиях, увеличение плотности термосферы приводит к увеличению амплитуды крупномасштабных ВГВ на средних широтах. Для плотности термосферы характерна годовая асимметрия (декабрьская аномалия). Например, по данным спутников CHAMP и GRACE при низкой солнечной активности ($F = 80$) глобальная средняя плотность термосферы на высоте 400 км в декабрьское солнцестояние на 47% больше, чем в июньское солнцестояние [Lei et al., 2013]. С крупномасштабными ВГВ обычно связаны увеличения $NmF2$ в дневные часы на средних широтах [Брюнелли и Намгаладзе, 1988]. Следует отметить, что суббури возникают часто. Например, по данным измерений в северном полушарии в интервале 1993–2008 гг. в среднем наблюдалось 550 суббурь в год [Taskanen et al., 2011]. Поэтому умеренная геомагнитная активность обычно ассоциируется с суббуриями как наиболее частой причиной геомагнитных возмущений. Итак, индекс AI при умеренной геомагнитной активности больше, чем при низкой активности, из-за двух основных причин – асимметрии зима/лето в частоте возникновения суббурь и годовой асимметрии в плотности термосферы. Этот вывод является скорее предположением, и необходимы более детальные оценки для его обоснования. Достаточно важной может быть и северная асимметрия геомагнитного поля, включая разницу в смещении между магнитными и географическими полюсами и различия в напряженности магнитного поля в магнитно-сопряженных областях [Laundal et al., 2017].

Умеренная геомагнитная активность является типичной средней активностью за продолжительный период времени. Например, среднее значение индекса $Ap = 14$ для анализируемого интервала 1963–2002 гг. Связь между индексами солнечной и геомагнитной активности может носить сложный характер [Feunpan, 1982; Du, 2011]. Тем не менее, обычно низкая геомагнитная активность соответствует низкой солнечной активности. Например, $Ap = 7$ для продолжительного минимума солнечной активности 2007–2008 гг. Поэтому медиана $NmF2$ для низкой солнечной активности обычно соответствует низкой геомагнитной активности, для средней и высокой солнечной активности она соответствует умеренной геомагнитной активности. В результате, индекс AI для медиан $NmF2$ для низкой солнечной активности соответствует низкой геомагнитной актив-

ности, этот индекс для высокой солнечной активности соответствует умеренной геомагнитной активности (см. рис. 1). Это определяет аналогию в причинах повышенных значений AI для умеренной геомагнитной активности как для ежедневных значений $NmF2$, так и для медиан $NmF2$.

Для медианы $NmF2$ (и $foF2$) в качестве индикатора солнечной активности может быть использован ионосферный индекс солнечной активности, например, IG [Brown et al., 2018a]. Индекс IG основан на данных медиан ряда ионосферных станций, поэтому он косвенно учитывает вклад геомагнитной активности в $NmF2$. Традиционно этот индекс используют для любого пункта, т.е. он считается глобальным индексом. Недавно был введен индекс IG^{NS} , который состоит из двух индексов, полученных по ионосферным данным каждого полушария в отдельности [Brown et al., 2018a]. На основе анализа было получено, что индекс IG^{NS} гораздо точнее индекса IG для вычисления глобального или локального индексов AI [Brown et al., 2018b]. Это может быть связано с асимметрией зима/лето в частоте возникновения суббурь и с годовой асимметрией в плотности термосферы по отмеченным выше причинам.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе ежедневных данных концентрации максимума $F2$ -слоя $NmF2$ в полдень пары ионосферных станций Боулдер–Хобарт за 1963–2002 гг. проведен анализ зависимости локального индекса годовой асимметрии AI от солнечной активности. Для анализа выделены низкая ($ap(\tau) < 9$) и умеренная ($9 < ap(\tau) < 20$) геомагнитные активности, где $ap(\tau)$ – средневзвешенный индекс этой активности и $\tau = 0.8$. Дополнительно рассмотрен индекс AI для медиан $NmF2$ этих станций. Получены следующие выводы.

1. Для низкой геомагнитной активности индекс AI увеличивается от 0.08 при низкой солнечной активности до 0.11–0.12 при умеренно высокой и высокой солнечной активности. Индекс AI для умеренной геомагнитной активности больше, чем для низкой геомагнитной активности, на величину $\Delta AI = 0.04$ –0.05, почти не зависящую от уровня солнечной активности. Повышенные значения AI для умеренной геомагнитной активности обусловлены в основном увеличенными значениями $NmF2$ в январе в Боулдере.

2. Индекс AI для медиан $NmF2$ увеличивается от 0.08 при низкой солнечной активности до 0.15–0.16 при высокой солнечной активности. На основе сопоставления индексов AI для медиан и ежедневных значений $NmF2$ получено, что индекс AI для медиан $NmF2$ для низкой солнечной активности соответствует низкой геомагнитной активности, этот индекс для высокой солнечной

активности соответствует умеренной геомагнитной активности. Это указывает на важную роль геомагнитной активности в зависимости индекса AI для медиан $NmF2$ от солнечной активности.

3. Возможной причиной того, что индекс AI при умеренной геомагнитной активности больше, чем при низкой активности, является асимметрия зима/лето в частоте возникновения суббурь и годовая асимметрия в плотности термосферы. Первый фактор определяет более высокую частоту суббурь местной зимой, с которыми связана генерация крупномасштабных ВГВ в авроральной области. Второй фактор обеспечивает увеличенные амплитуды ВГВ на средних широтах в декабре–январе как наиболее частой причины увеличенных значений $NmF2$ на средних широтах в полдень.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят WDC for Solar-Terrestrial Physics, Великобритания, за данные $foF2$ станций Боулдер и Хобарт и индексы солнечной активности (<http://www.ukssdc.ac.uk/wdccc1/>); WDC for Geomagnetism, Япония, за данные Ap -индекса (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00050.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 528 с. 1988.
- Деминов М.Г., Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Шубин В.Н. Регулярные изменения критической частоты $F2$ -слоя спокойной ионосферы средних широт // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 49. № 3. С. 393–399. 2009.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А., Полех Н.М. Свойства изменчивости концентрации максимума $F2$ -слоя над Иркутском при разных уровнях солнечной и геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. Т. 1. № 1. С. 56–62. 2015.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Какой геомагнитной активности соответствует медиана критической частоты $F2$ -слоя на разных широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 5. С. 606–611. 2016.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Денуева А.Х., Денуев В.Х. Зависимость медианы критической частоты $F2$ -слоя на средних широтах от геомагнитной активности // Солнечно-земная физика. Т. 3. № 4. С. 74–81. 2017.
- Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Свойства ионосферы в период экстремальной бури // Космич. исслед. Т. 57. № 6. С. 469–476. 2019.
- Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты $F2$ -слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical Storm-Time Ionospheric Correction Model. 1. Model description // Radio Sci. V. 37. P. 1070. 2002. <https://doi.org/10.1029/2001RS002467>
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Ionosonde-based indices for improved representation of solar cycle variation in the International Reference Ionosphere model // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 171. P. 137–146. 2018a.
- Brown S., Bilitza D., Yigit E. Improvements to predictions of the ionospheric annual anomaly by the international reference ionosphere model // Ann. Geophysicae. Discuss., 2018b. <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. P. 6727–6736. 2017.
- Du Z.L. The correlation between solar and geomagnetic activity Part 3: An integral response model // Ann. Geophysicae. V. 29. N 6. P. 1005–1018. 2011.
- Feynman J. Geomagnetic and solar wind cycles, 1900–1975 // J. Geophys. Res. V. 87. № A8. P. 6153–6162. 1982.
- Fuller-Rowell T.J., Araujo-Pradere E., Codrescu M.V. An empirical ionospheric storm-time correction model // Adv. Space Res. V. 25. P. 139–146. 2000.
- 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.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1985 // Ann. Geophysicae. V. 14. № 9. P. 917–940. 1996.
- Hunsucker K. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. P. 293–315. 1982.
- Kutiev I., Muhtarov P. Empirical modeling of global ionospheric $foF2$ response to geomagnetic activity // J. Geophys. Res. V. 108. № A1. P. 1021. 2003. <https://doi.org/10.1029/2001JA009134>
- Laundal K.M., Cnossen I., Milan S.E. et al. North–South asymmetries in Earth’s magnetic field. Effects on high-latitude geospace // Space Sci. Rev. V. 206. P. 225–257. 2017.
- Lei J., Liu L., Wan W., Zhang S.-R. Variations of electron density based on long-term incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill // Radio Sci. V. 40. RS2008. 2005. <https://doi.org/10.1029/2004RS003106>
- 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.
- 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. P. 7238–7244. 2016.
- Liu L., Wan W., Ning B. et al. Solar activity variations of the ionospheric peak electron density // J. Geophys. Res. V. 111. A08304. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006JA011598>.
- Ma R., Xu J., Wang W., Yuan W. Seasonal and latitudinal differences of the saturation effect between ionospheric $NmF2$ and solar activity indices // J. Geophys. Res. V. 114.

- A10303. 2009.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014353>
- 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.
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. № A12. 1468. 2002.
<https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- Pietrella M. A short-term ionospheric forecasting empirical regional model (IFERM) to predict the critical frequency of the F2 layer during moderate, disturbed, and very disturbed geomagnetic conditions over the European area // Ann. Geophysicae. V. 30. № 2. P. 343–355. 2012.
- Newell P.T., Greenwald R.A., Ruohoniemi J.M. The role of the ionosphere in aurora and space weather // Rev. Geophys. V. 39. № 2. P. 137–149. 2001.
- Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // J. Geophys. Res. V. 115. A03216. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2009JA014805>
- Ramachandran K.M., Tsokos C.P. Mathematical statistics with applications. Oxford: Elsevier Academic Press, 824 p. 2009.
- Richards P.G., Fennelly J.A., Torr D.G. EUVAC: A solar EUV flux model for aeronomic calculations // J. Geophys. Res. V. 99. P. 8981–8992. 1994.
- Richards P.G., Woods T.N., Peterson W.K. HEUVAC: A new high resolution solar EUV proxy model // Adv. Space Res. V. 37. P. 315–322. 2006.
- 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.
- Sai Gowtam V., Tulası Ram S. Ionospheric annual anomaly – New insights to the physical mechanisms // J. Geophys. Res. Space. V. 122. P. 8816–8830. 2017a.
- Sai Gowtam V., Tulası 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>
- Wrenn G.L. Time-weighted accumulations $ap(\tau)$ and $Kp(\tau)$ // J. Geophys. Res. V. 92. P. 10125–10129. 1987.
- Wrenn G.L., Rodger A.S. Geomagnetic modification of the mid-latitude ionosphere – Toward a strategy for the improved forecasting of $foF2$ // Radio Sci. V. 24. P. 99–111. 1989.
- 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>