

# Зимняя аномалия в $N_m F2$ и в полном электронном содержании. 2. Механизмы формирования долготной вариации зимней аномалии

КЛИМЕНКО М. В.<sup>1,2</sup>, КЛИМЕНКО В. В.<sup>1</sup>, ЯСЮКЕВИЧ Ю. В.<sup>3</sup>, РАТОВСКИЙ К. Г.<sup>3</sup>,  
ПОЛЯКОВА А. С.<sup>3</sup>, ЧИРИК Н. В.<sup>2</sup>, ЛУКЬЯНОВА Р. Ю.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>КФ ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкина г. Калининград, Россия

<sup>2</sup>БФУ им. Иммануила Канта г. Калининград, Россия

<sup>3</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН г. Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Геофизический Центр РАН г. Москва, Россия

<sup>5</sup>Институт космических исследований РАН г. Москва, Россия

email: maksim.klimenko@mail.ru vvk\_48@mail.ru yasukevich@iszf.irk.ru ratovsky@iszf.irk.ru  
annpol@iszf.irk.ru wsaad@mail.ru r.lukianova@gcras.ru

## Введение

Термин "ионосферная аномалия" означает любые отклонения от теории "слоя Чепмена" [1], т.е. отклонения от обратной зависимости электронной концентрации в максимуме  $F2$ -слоя,  $N_m F2$ , от зенитного угла Солнца  $\chi$ . Частным случаем такого вида аномалий является зимняя аномалия, заключающаяся в том, что зимние дневные значения  $N_m F2$  превышают соответствующие летние значения при примерно одном и том же уровне солнечной активности. Морфология, причины и механизмы формирования зимней аномалии в  $F2$  слое ионосферы начали обсуждаться достаточно давно [1-6]. Было показано, что основной причиной формирования зимней аномалии в  $F2$  слое являются сезонные изменения нейтрального состава термосферы, а именно, то, что отношение  $[O]/[N_2]$  зимой больше, чем летом). Torr and Torr [7], Павлов и Павлова [8] и Burns et al. [6] показали, что зимняя аномалия интенсивнее в годы максимума солнечной активности по сравнению с годами минимума солнечной активности. Это связано с большей разницей между зимними и летними отношениями  $[O]/[N_2]$  в годы максимума солнечной активности по сравнению с годами минимума солнечной активности [6].

Долготная вариация и межполушарная асимметрия зимней аномалии обсуждалась в работах [1, 4-9]. Rishbeth et al. [5] предложили гипотезу о том, что сезонные изменения нейтрального состава термосферы связаны с формированием в глобальной термосферной циркуляции зон восходящих потоков (уменьшение отношения  $[O]/[N_2]$ ) в летнем полушарии и нисходящих потоков (увеличение отношения  $[O]/[N_2]$ ) в зимнем полушарии, немного экваториальнее аврорального овала. Географическая широта зоны зимних нисходящих потоков зависит от геомагнитной долготы. На географических долготах наиболее близких к геомагнитному полюсу, геомагнитные широты соответствуют более низким географическим широтам (Американский долготный сектор в северном полушарии и Австралийский сектор – в южном полушарии), чем на географических долготах, наиболее удаленных от магнитного полюса (Восточная Сибирь в северном полушарии и Южная Америка – в южном полушарии). На более низких широтах в областях с большими значениями  $\cos\chi$  наблюдается больший рост  $N_m F2$  в приполюсных долготных секторах по сравнению с долготными секторами, наиболее удаленными от магнитного полюса. Данное объяснение долготной вариации зимней аномалии было успешно воспроизведено в результатах расчетов по модели СТІР (Coupled Thermosphere-Ionosphere-Plasmasphere) [4]. Отметим, что результаты расчетов по модели СТІР не воспроизводят усиления зимней аномалии с ростом солнечной активности так же, как и более сильную зимнюю аномалию в северном полушарии по сравнению с зимней аномалией в южном полушарии. Более сильная зимняя аномалия в северном полушарии по сравнению с аномалией в южном полушарии связана

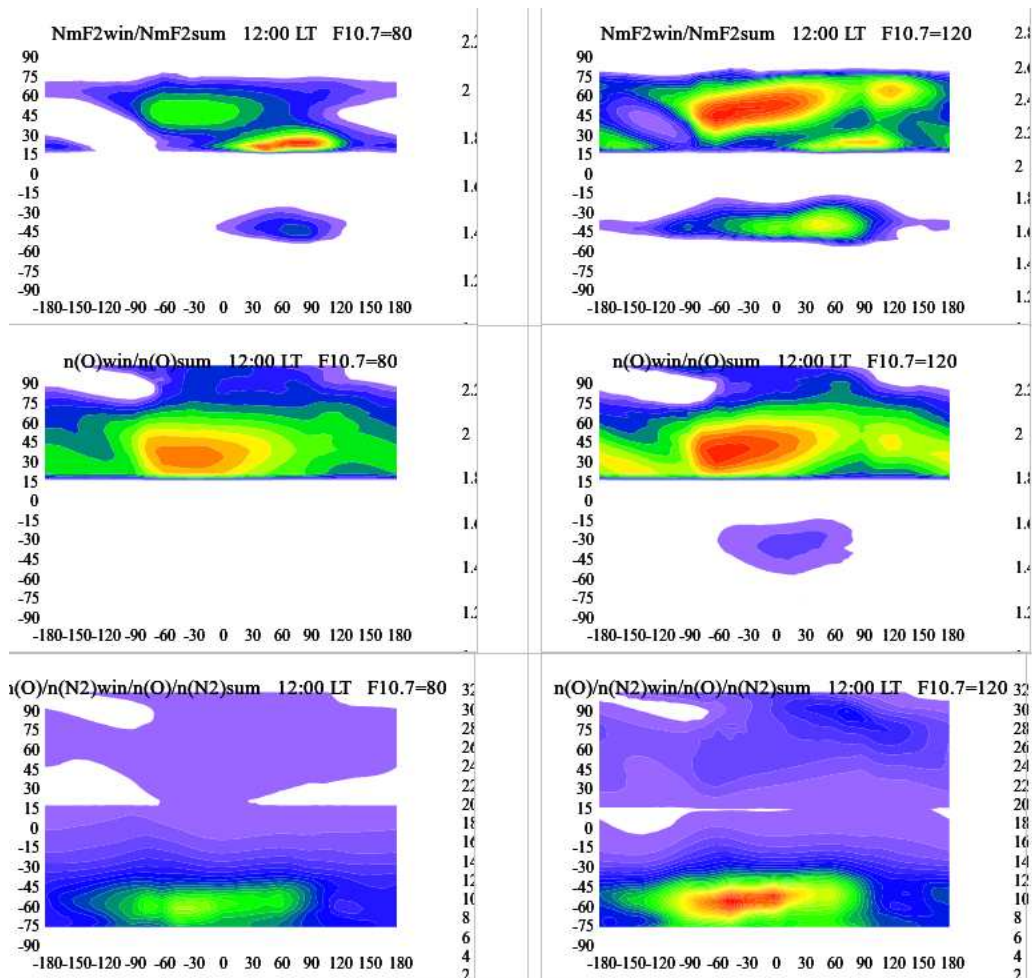


Рис. 1. Отношения зимних полуденных значений  $N_m F2$  (вверху),  $n(O)$  (посередине),  $n(O)/n(N_2)$  (внизу) к соответствующим летним, полученные в модели ГСМ ТИП. Слева – результаты расчетов для  $F_{10.7} = 80$ , справа – для  $F_{10.7} = 120$ .

с большими годовыми вариациями отношения  $[O]/[N_2]$  в северном полушарии, чем в южном [6]. Целью данного исследования является интерпретация наблюдаемых долготных вариаций и межполушарной асимметрии зимней аномалии на основе результатов расчетов, полученных с использованием Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП).

#### Методы и подходы

Для моделирования зимней аномалии в  $N_m F2$  и полном электронном содержании (ПЭС) мы использовали результаты расчетов Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) [10]. Моделирование осуществлялось на глобальной пространственной сетке с шагами  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе. В модели ГСМ ТИП используется дипольное приближение геомагнитного поля с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. Расчеты проводились продольными токами, рассчитываемыми по эмпирической модели, построенной по данным измерений спутников Magsat и Ørsted [11] для дней зимнего и летнего солнцестояния при низкой ( $F_{10.7} = 80$ ) и средней ( $F_{10.7} = 120$ ) солнечной активности. Как показано в статье Ясюкевича и др. (в этом сборнике), особенности проявления зимней аномалии в  $N_m F2$  и ПЭС, полученные по данным наблюдений и результатам расчетов с использованием модели ГСМ ТИП, выявили хорошее согласие. Это позволило нам провести исследование механизмов формирования долготной вариации и межполушарных различий зимней аномалии основываясь на результатах расчетов по модели ГСМ ТИП.

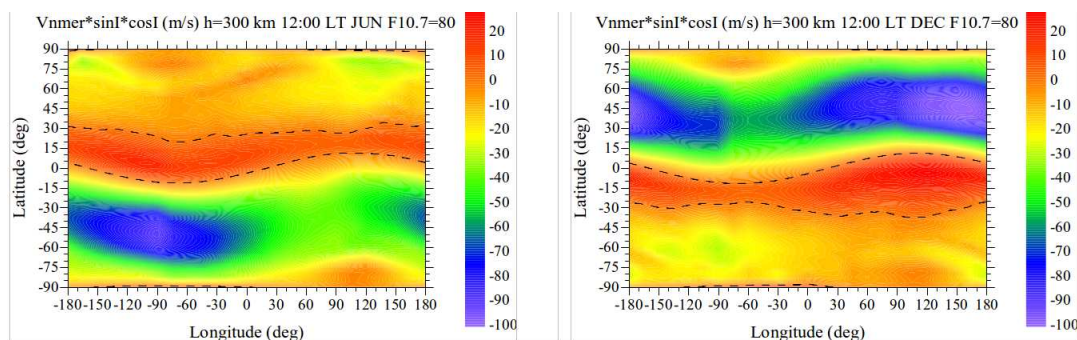


Рис. 2. Вертикальная (положительная вверх) компонента переноса ионосферной плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля под действием термосферного ветра на высоте 300 км для июньского (слева) и декабрьского (справа) солнцестояния при  $F_{10.7} = 80$ .

## Результаты расчетов

Рисунок 1 показывает полученную в модели ГСМ ТИП интенсивность зимней аномалии в  $N_m F2$  для низкой и средней солнечной активности в обоих полушариях, а также количественную оценку возможных механизмов формирования ( $n(O)$  и  $n(O)/n(N_2)$ ) долготной вариации и межполушарной асимметрии зимней аномалии. Согласно результатам расчетов по модели ГСМ ТИП долготная вариация  $n(O)/n(N_2)$  значительно отличается от представлений в [1]: (1) на широтах ниже  $45^\circ$  с.г.ш. долготная вариация по результатам наших модельных расчетов достаточно хорошо согласуется с долготной вариацией основанной на гипотезе Rishbeth [1]; (2) на более высоких широтах северного полушария распределение  $n(O)/n(N_2)$  более благоприятно для формирования зимней аномалии в восточно-сибирском долготном секторе. Следует отметить, что положения максимумов отношения зимних значений  $n(O)/n(N_2)$  к летним значениям в американском и восточно-сибирском долготных секторах северного полушария хоть и не идеально, но совпадают с максимумами зимней аномалии в  $N_m F2$ , тогда как в южном полушарии это не совсем так. Особенно хорошо это видно для среднего уровня солнечной активности. Долготная вариация  $n(O)$  в южном полушарии гораздо лучше объясняет долготную вариацию зимней аномалии в этом же полушарии.

Для объяснения причины того, почему зимняя аномалия в северном полушарии в американском долготном секторе сильнее, чем в восточно-сибирском долготном секторе, мы приводим рассчитанные в модели ГСМ ТИП карты скоростей вертикального переноса плазмы вдоль силовых линий магнитного поля под действиям меридионального термосферного ветра в полдень для декабря и июня в минимуме солнечной активности (Рис. 2). Ветер к полюсу (приводящий к уменьшению  $N_m F2$ ), сильнее в северном полушарии в восточно-сибирском регионе и в южном полушарии в Южной Америке, что и приводит к усилению зимней аномалии в американском долготном секторе северного полушария и в австралийском долготном секторе южного полушария, несмотря на пространственное распределение  $n(O)$  и  $n(O)/n(N_2)$  на широтах к полюсам от  $\pm 45^\circ$ . Долготная вариация термосферного ветра, полученная в модели ГСМ ТИП, хорошо согласуется с оценками, приведенными в [1].

Важно отметить, что долготная вариация термосферного ветра зимой определяет влияние ветра на долготную вариацию зимней аномалии из-за того, что долготная вариация ветра местным летом меньше, чем местной зимой. Согласно результатам модельных расчетов термосферный ветер наряду с изменениями состава нейтральной атмосферы является основной причиной долготных вариаций зимней аномалии. Это несколько противоречит выводам, сделанным в [1, 4, 5], согласно которым влияние ветров на зимнюю аномалию незначительное. Таким образом, влияние термосферного ветра на долготную вариацию

зимней аномалии в северном полушарии синфазно с влиянием  $[O]/[N_2]$  для широт ниже  $\pm 45^\circ$  и противофазно для широт выше  $\pm 45^\circ$ . Наиболее благоприятное распределение ветра для создания зимней аномалии в северном полушарии формируется в американском долготном секторе, а в южном полушарии – в австралийском долготном секторе, что согласуется с представлениями [1, 5].

### Заключение

Показано, что наряду с основным механизмом формирования зимней аномалии на средних широтах – распределением нейтрального состава термосферы важную роль в формировании ее долготных вариаций играет распределение вертикальной компоненты переноса плазмы на высотах  $F$  области ионосферы вдоль силовых линий геомагнитного поля под действием термосферного ветра. Долготная вариация  $n(O)$  в южном полушарии гораздо лучше объясняет долготную вариацию зимней аномалии в южном полушарии, чем долготная вариация  $n(O)/n(N_2)$  в этом же полушарии.

Работа поддержана грантами РФФИ № 16-35-60018 и 14-05-00788.

### Литература

1. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 1998. – V. 60. – P. 1385–1402.
2. Strobel D.F., McElroy M.B. The  $F_2$  layer at middle latitudes // Planet. Space Sci., – 1970. – V. 18. – P. 1181–1202.
3. Torr D.G., Torr M.R., Richards P.G. Causes of the  $F$  region winter anomaly // Geophys. Res. Lett. – 1980. – V. 7(5), – P. 301–304.
4. Zou L., Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Millward G.H., Fuller-Rowell T.J., Idenden D.W., Moffett R.J. Annual and semiannual variations in the ionospheric  $F_2$ -layer: I. Modelling // Ann. Geophys. – 2000. – V. 18. – P. 927–944.
5. Rishbeth H., Muller-Wodarg I.C.F., Zou L., Fuller-Rowell T.J., Millward G.H., Moffett R.J., Idenden D.W., Aylward A.D. Annual and semiannual variations in the ionospheric  $F_2$ -layer: II: physical discussion // Ann. Geophys. – 2000. – V. 18. – No 8. – P. 945–956.
6. Burns A.G., Wang W., Qian L., Solomon S.C., Zhang Y., Paxton L.J., Yue X. On the solar cycle variation of the winter anomaly // J. Geophys. Res. Space Physics. – 2014. – V. 119, doi:10.1002/2013JA019552.
7. Torr M.R., Torr D.G. The seasonal behaviour of the  $F_2$ -layer of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. – 1973. – V. 35. – P. 2237–2251.
8. Павлов А.В., Павлова Н.М. Вариации статистических параметров зимней аномалии  $N_m F_2$  с широтой и солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, – № 3. – С. 356–364.
9. Lee W.K., Kil H., Kwak Y.S., Wu Q., Cho S., Park J.U. The winter anomaly in the middle?latitude  $F$  region during the solar minimum period observed by the Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate // J. Geophys. Res. – 2011 – V. 116, A02302, doi:10.1029/2010JA015815.
10. Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1990. – Т. 30. – № 4. – С. 612–619.
11. Lukianova R., Christiansen F. Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field-aligned currents // J. Geophys. Res. – 2006. – V. 111. A03213. doi:10.1029/2005JA011465.