

# Зимняя аномалия в $N_mF2$ и в полном электронном содержании. 1. Морфология явления по данным наблюдений и результатам модельных расчетов

Ясюкевич Ю. В.<sup>1</sup>, Ратовский К. Г.<sup>1</sup>, Чирик Н. В.<sup>2</sup>, Клименко М. В.<sup>2,3</sup>,  
Клименко В. В.<sup>3</sup>, Полякова А. С.<sup>1</sup>, Лукьянова Р. Ю.<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>КФ ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкина, 236017, г. Калининград, Россия

<sup>3</sup>БФУ им. Иммануила Канта, 236013, г. Калининград, Россия

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

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

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

## Введение

Явление зимней аномалии заключается в том, что значения электронной концентрации в максимуме  $F2$  слоя ( $N_mF2$ ) или критической частоты  $F2$  слоя ( $foF2$ ) в дневное время при одинаковых уровнях солнечной активности зимой больше, чем летом [2]. Пионерской работой в этой области является статья [3], в которой исследовалось проявление зимней аномалии в  $foF2$ . Механизм формирования зимней аномалии в  $N_mF2$  представлен в работе [4]. Согласно [4] на фиксированной географической широте зимняя аномалия сильнее развита в долготных секторах ионосферы, наиболее приближенных к геомагнитным полюсам, и слабее развита в долготных секторах ионосферы, наиболее удаленных от геомагнитных полюсов. В настоящей работе мы провели сопоставление проявления зимней аномалии в  $N_mF2$  и полном электронном содержании (ПЭС) по данным наблюдений и результатам расчетов глобальной самосогласованной модели верхней атмосферы Земли ГСМ ТИП и модели IRI-2012. Следует отметить, что термин “зимняя аномалия” в литературе применяется к средним широтам. В этой связи, мы оставляем рассмотрение превышений зимних значений  $N_mF2$  и ПЭС над летними в приэкваториальной и авроральной областях за рамками нашего исследования.

## Используемые данные и методология анализа

Для анализа зимней аномалии в  $N_mF2$  мы использовали данные, опубликованные в работе [1], а также данные радиозатменных наблюдений со спутников COSMIC, CHAMP и GRACE за 2001–2015 гг. Для анализа зимней аномалии в ПЭС мы использовали глобальные ионосферные карты (GIM) ПЭС лаборатории JPL [5] за 1998-2015 гг.

В качестве величины, характеризующей степень развития (или интенсивности) зимней аномалии, мы использовали отношение полуденных значений ПЭС и  $N_mF2$ , усредненных за зимний период, к полуденным значениям, усредненным за летний период, т.е. отношение зима/лето для полудня. Для Северного полушария летний и зимний периоды определялись как день соответствующего солнцестояния  $\pm 30$  дней. Для Южного полушария зимний период представлял собой июнь-июль, а летний – декабрь-январь.

Для построения карты развития аномалии мы произвели расчет регрессий полуденных значений ПЭС и  $N_mF2$  в зимний и летний периоды от индекса  $F10.7A$ , рассчитываемого как среднее между текущим значением  $F10.7$  и значением  $F10.7$ , усредненным за 81 день в окрестности текущего дня ( $\pm 40$  дней). На основе построенных регрессий проводился расчет отношения зима/лето для любого уровня  $F10.7A$ .

Для моделирования зимней аномалии в  $N_mF2$  и ПЭС мы использовали результаты расчетов Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы

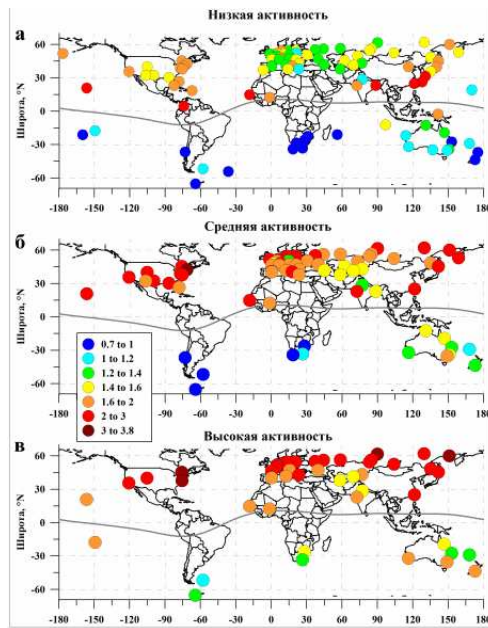


Рис. 1. Отношение зима/лето в  $N_m F2$  по данным [1] для низкой (а), средней (б) и высокой (в) солнечной активности.

(ГСМ ТИП) [6]. Моделирование осуществлялось на глобальной пространственной сетке с шагами  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе. Расчеты проводились с использованием эмпирической модели продольных токов, построенной по данным измерений спутников Magsat и Ørsted [7] для дней зимнего и летнего солнцестояния при низкой ( $F10.7 = 80$ ) и средней ( $F10.7 = 121$ ) солнечной активности. Также проводились расчеты с использованием международной справочной модели ионосферы IRI-2012 [8].

### Зимняя аномалия в $N_m F2$

На рис. 1 и 2 а-в показаны карты отношения зимних значений  $N_m F2$  к летним, построенные по данным работы [1] и по регрессионным кривым зимних и летних значений  $N_m F2$ , полученным по данным радиозатменных наблюдений при низкой ( $F10.7A = 90$ ), средней ( $F10.7A = 120$ ) и высокой ( $F10.7A = 240$ ) солнечной активности в зависимости от индекса  $F10.7$ . На рис. 3 представлены карты отношения зимних значений  $N_m F2$  к летним, построенные по результатам расчетов, модели ГСМ ТИП при низкой и средней солнечной активности. Как результаты модельных расчетов, так и данные наблюдений указывают на то, что отношение зима/лето существенно выше в Северном полушарии, чем в Южном. Этот результат согласуется с известными экспериментальными фактами [4, 5]. В то же время, он отличается от результатов, представленных в [6], где предложенный механизм формирования аномалии приводит к одинаковому характеру развития зимней аномалии в Северном и Южном полушариях.

Наибольшее отношение зима/лето наблюдается в североамериканском долготном секторе Северного полушария и в австралийском секторе Южного полушария, что согласуется с механизмом, предложенным в работе [6]. Наименьшее значение отношения зима/лето для Северного полушария наблюдается в Восточно-Европейском секторе, что не согласуется с механизмом, предложенным в работе [6], согласно которому наименьшее отношение ожидается в Восточно-Сибирском секторе. При этом результаты расчетов, полученные с использованием модели ГСМ ТИП, воспроизводят формирование локального максимума интенсивности зимней аномалии в регионе  $105^\circ - 150^\circ$  E в Северном полушарии.

Можно заметить, что формирование зимней аномалии в  $N_m F2$  в южном полушарии начинается уже при 90 с.е.п. При 240 с.е.п. область, в которой наблюдается зимняя ано-

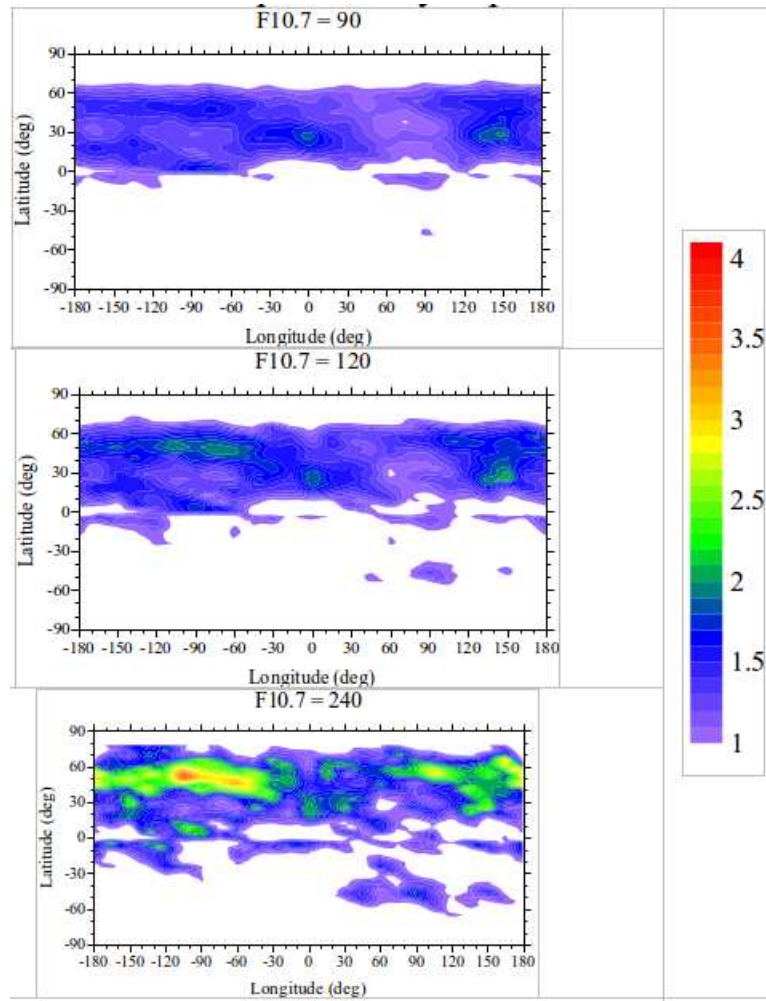


Рис. 2. Отношение зима/лето полуденных значений  $N_m F_2$ , полученное по данным радиозатменных наблюдений при низкой (90 с.е.п.), средней (120 с.е.п.) и высокой (240 с.е.п.) солнечной активности.

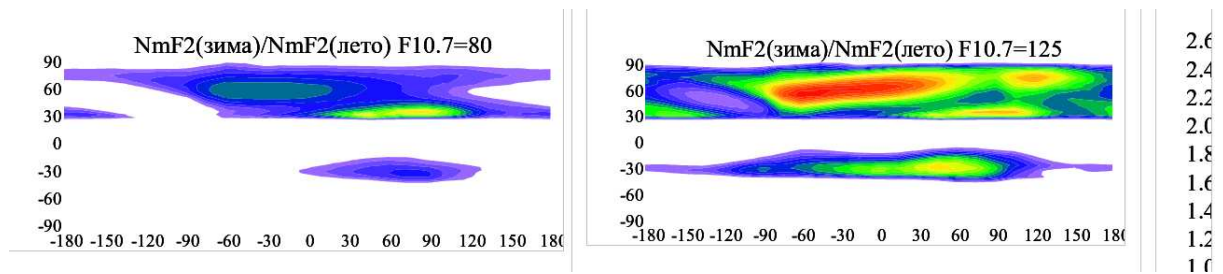


Рис. 3. Карты отношений зима/лето полуденных значений  $N_m F_2$ , полученных в модели ГСМ ТИП для низкой (F10.7=80 – слева) и средней (F10.7=120 – справа) солнечной активности.

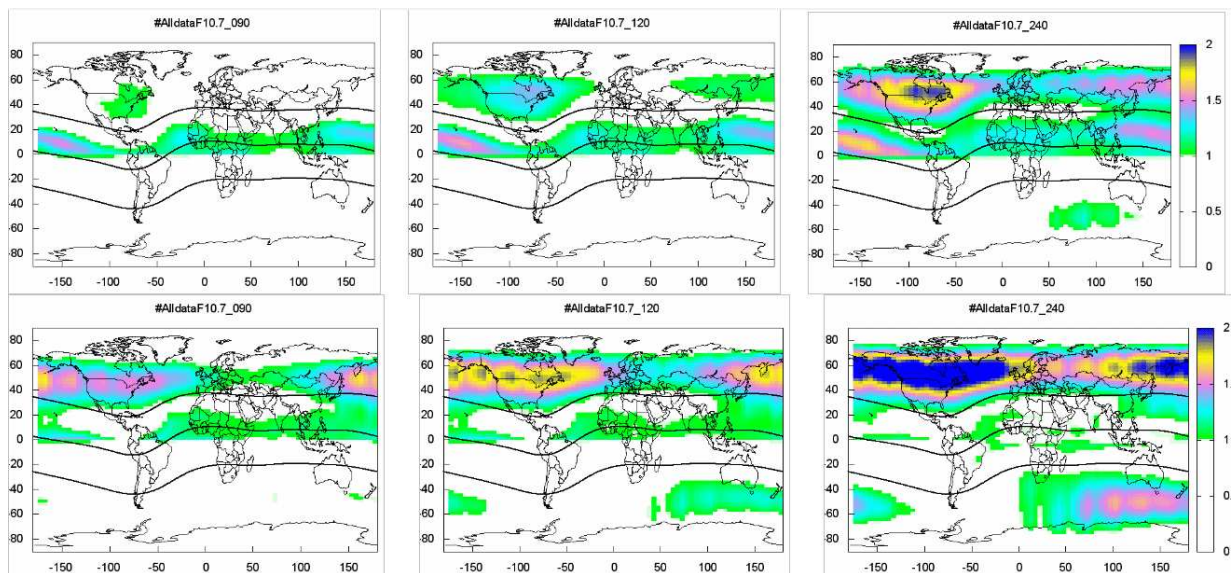


Рис. 4. Карты отношения зима/лето в ПЭС. Данные GIM (сверху) и модели IRI-2012 (снизу).

малия, охватывает долготный сектор 30-180° Е. При этом спутниковые данные не показывают аномалии в долготном секторе -180° -20° Е.

### Зимняя аномалия в полном электронном содержании

На рис. 4 показаны карты отношения зима/лето по данным наблюдений GPS ПЭС для трех уровней солнечной активности ( $F_{10.7A} = 90, 120$  и  $240$  с.е.п.), а также по модели IRI-2012. Видно, что появление зимней аномалии в северо-американском секторе регистрируется при  $F_{10.7A} = 90$  с.е.п., в восточносибирском секторе – при  $F_{10.7A} = 120$  с.е.п., в австралийском секторе – при  $F_{10.7A} = 240$  с.е.п. Зимняя аномалия в ПЭС проявляется гораздо слабее, чем в  $N_m F_2$ .

Из рис. 4 видно, что в модели IRI зимняя аномалия проявляется значительно сильнее, чем по данным наблюдений GIM. В южном полушарии зимняя аномалия по модели IRI-2012 наблюдается уже при 120 с.е.п. Следует отметить, что область максимального развития аномалии в модели IRI смещается восточнее относительно данных наблюдений.

На рис. 5 показаны карты интенсивности зимней аномалии в ПЭС при низкой и средней солнечной активности, построенные по результатам расчетов модели ГСМ ТИП. Можно заметить, что при  $F_{10.7} = 120$  с.е.п. аномалия в Южном полушарии еще не развита, а при 80 с.е.п. она практически отсутствует в обоих полушариях. При 120 с.е.п. зимняя аномалия начинает проявляться в северном полушарии. Наибольшая интенсивность зимней аномалии при умеренной активности как по данным наблюдений, так и по результатам модельных расчетов формируется в северо-американском регионе и составляет  $\sim 1.5$ . При этом географические широты максимума развития аномалии по данным наблюдений ( $45^\circ$  N) и по результатам модельных расчетов ( $30^\circ$  N) отличаются друг от друга.

### Заключение

Сопоставление особенностей проявления зимней аномалии в  $N_m F_2$  и ПЭС показало, что основные закономерности зимней аномалии (географическое положение и изменение с солнечной активностью) зимней аномалии для этих параметров совпадают. Однако зимняя аномалия в ПЭС развита заметно слабее, чем в  $N_m F_2$ , на что указывают как данные наблюдений, так и результаты модельных расчетов.

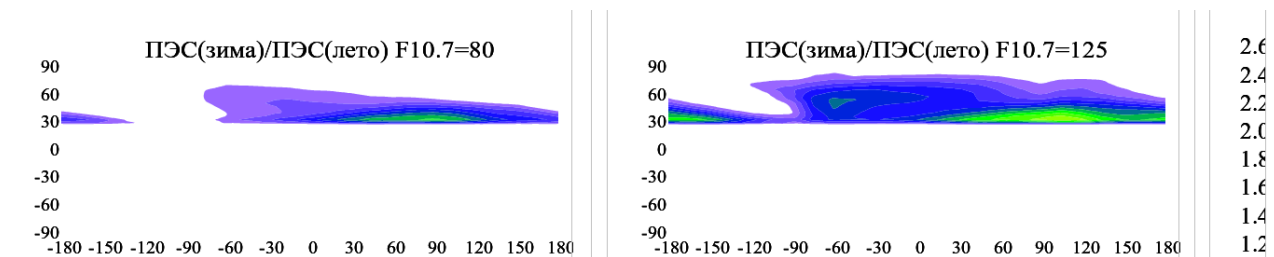


Рис. 5. Полученные в модели ГСМ ТИП карты отношений зима/лето полуденных значений ПЭС для низкой ( $F_{10.7}=80$  с.е.п. – слева) и средней ( $F_{10.7}=125$  с.е.п. – справа) солнечной активности.

Результаты расчетов, полученные с использованием модели ГСМ ТИП, воспроизводят асимметрию развития аномалии в  $N_m F_2$  и ПЭС в Северном и Южном полушариях и основные долготные особенности зимней аномалии. Как показывают данные наблюдений, наименьшее отношение зима/лето для Северного полушария наблюдается в восточно-европейском секторе, в то время как по результатам модельных расчетов эта область значительно смещена на восток – в сибирский регион. В модели IRI-2012 зимняя аномалия в ПЭС выражена значительно сильнее, чем по данным наблюдений.

Авторы выражают благодарность Лаборатории реактивного движения (JPL) за предоставление глобальных ионосферных карт GIM ПЭС, а также Павлову А.В. и Павловой Н.М., результаты работы которых были использованы в нашем исследовании. Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-35-60018 и 14-05-00788, а также гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

#### Литература

1. 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.
2. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionosphere // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 1998. V. 60. P. 1385–1402.
3. Torr M.R. and Torr D.G. The seasonal behaviour of the F2-layer of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 2237–2251.
4. 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 F2-layer: II: physical discussion // Ann. Geophys. 2000. V. 18, N 8. P. 945-956.
5. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C. H., Lindqwister U.J., Runge T. F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.
6. 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 протонсферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30. № 4. С. 612–619.
7. 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.
8. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. A07. DOI: 10.1051/swsc/2014004.