



**ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ  
НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРНОГО  
СЛОЯ F1 В МИНИМУМЕ  
СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ  
НАД НОРИЛЬСКОМ**

**О.Е. Яковлева**

**Г.П. Кушнарченко**

**Г.М. Кузнецова**

Уравнение полуэмпирической модели ионосферы (ПЭМ) описывает связь электронной концентрации  $N_e$  с характеристиками нейтрального газа термосферы и индексом солнечной активности на высотах 120-200 км, где выполняется условие фотохимического равновесия. С помощью ПЭМ, используя данные по  $N_e$ , полученные из измерений норильского ионозонда, удобно рассмотреть вариации  $N_e$  со временем, а также связанные с изменением уровней солнечной и магнитной активностей:

$$\begin{aligned}
 N / N_{av} = & X_1 + X_2 \times \left[ n_1 / (5n_2 + n_3) \right]^{1.5} + \\
 & + X_3 (n_1 / n_3)^{0.5} \times (\cos \chi)^{0.5} + \\
 & + X_4 \exp \left[ - (T_{ex} - 600) / 600 \right] + X_5 (E / E_0)
 \end{aligned}$$

$N_{av}$  определяет среднее значение  $N$  по всему объему данных отдельно для каждой высоты,  $X_j$  - искомые коэффициенты уравнения,  $T_{ex}$  - температура экзосферы,  $\chi$  - зенитный угол Солнца,  $n_1, n_2, n_3$  - концентрации атомного кислорода, молекул кислорода и азота,  $E$  - энергия потока ионизирующего излучения,  $E_0$  - величина  $E$  при максимуме солнечной активности.

**Таблица 1. Коэффициенты уравнения  
аппроксимации (ст. Норильск)**

h, км	$N_{av} \cdot 10^4 \text{см}^{-3}$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
120	7,51	-0,1844	-7,403	4,842	0,0000	0,9708
130	8,57	-0,4140	-7,960	5,459	0,2335	0,9474
140	10,25	-0,3128	-8,238	5,310	0,2341	0,7888
150	12,07	-0,3352	-7,917	5,106	0,4142	0,7005
160	13,80	-0,3521	-7,048	4,688	0,5798	0,7009
170	15,39	-0,3646	-5,463	4,130	0,7145	0,7496
180	17,16	-0,3462	-2,644	3,430	0,7984	0,7455
190	19,49	-0,3267	1,388	2,659	0,8516	0,7008
200	22,32	-0,3604	5,298	1,983	0,9051	0,7580

С помощью полученных коэффициентов рассчитаны и проанализированы вариации  $N_e$  в годичном цикле на высотах слоя F1 в период последнего минимума на ст. Норильск.

## Результаты по ст. Норильск

Типичные формы рассчитанных кривых годового хода полуденных величин  $N_p$  на трех высотах (150, 170 и 190 км) рассматриваемого интервала 140-200 км показаны на рис.1 для одного года минимума (2009 г.). Для сравнения на каждой высоте приведены величины  $N_{\Sigma}$ .

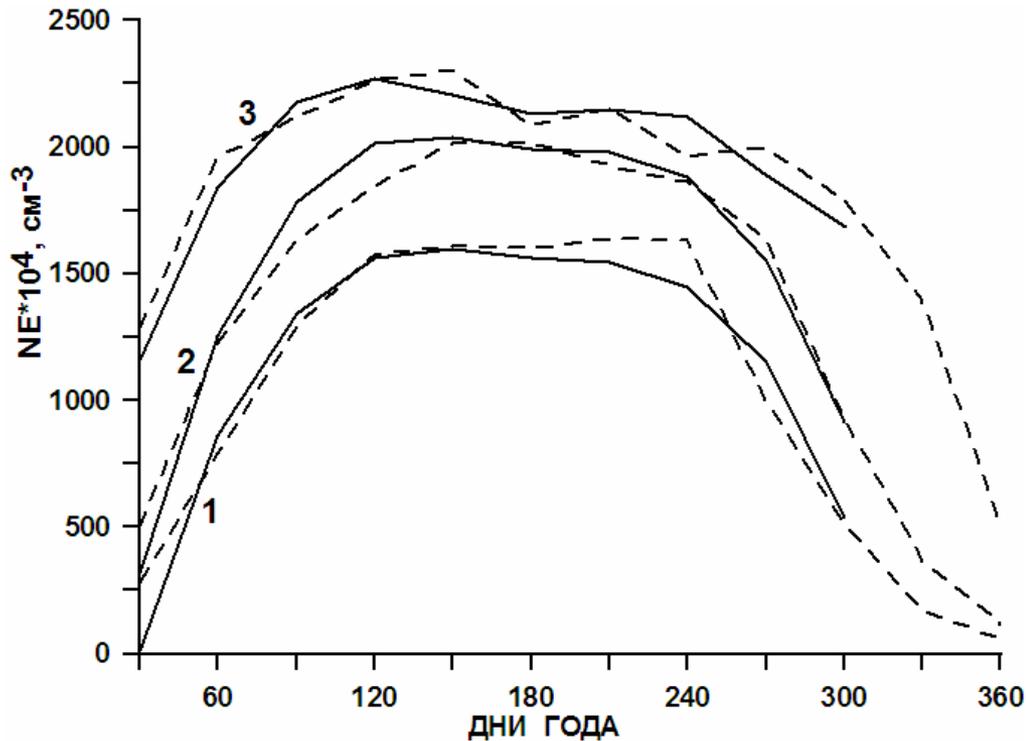
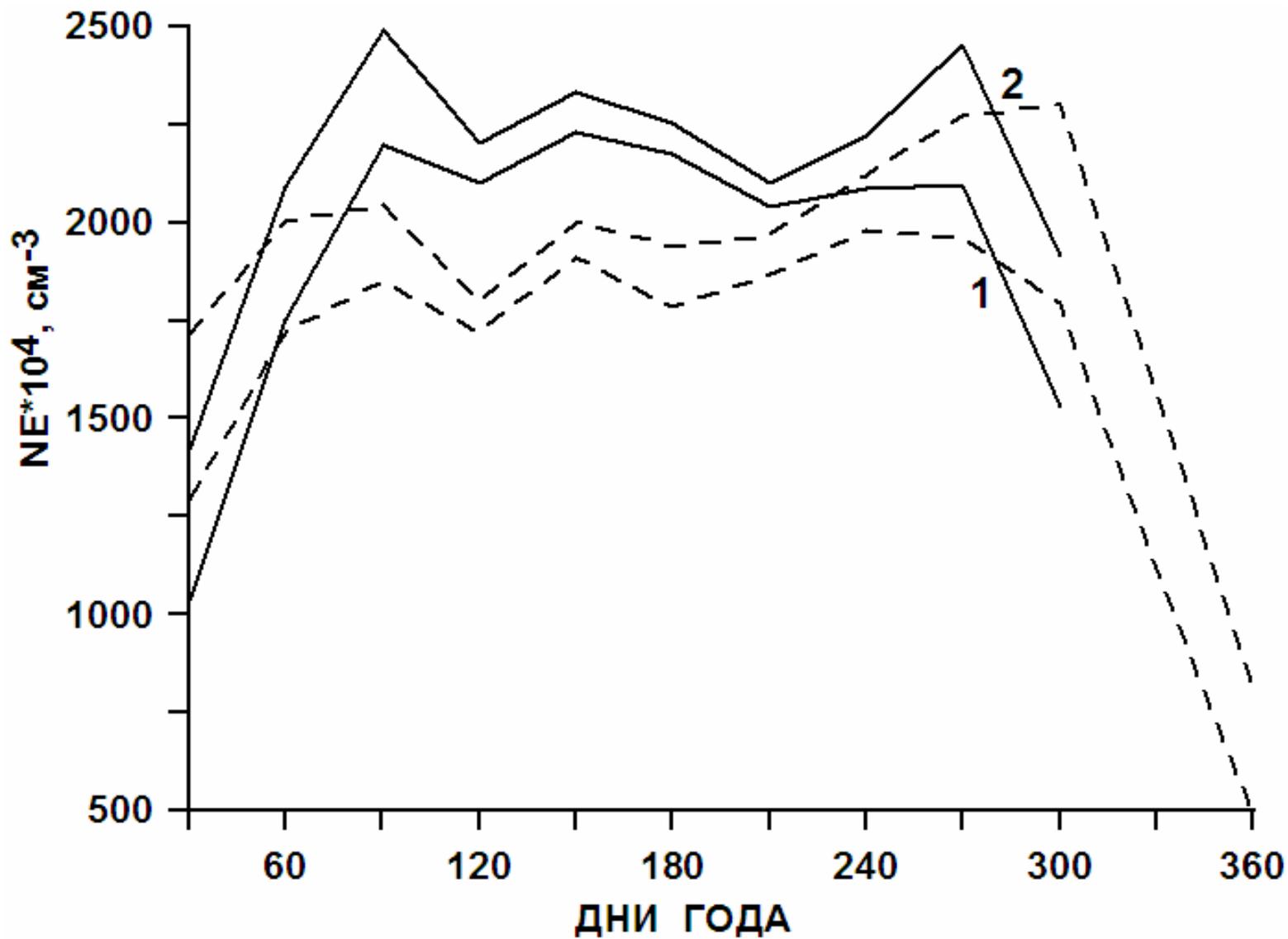


Рис. 1.  
Годовые изменения  $N_p$  (12 LT) на высотах 150 (1), 170 (2) и 190 км (3) в 2009 г. Пунктир - экспериментальные  $N$  на соответствующих высотах.

Исследование массива  $N_e$  в Норильске в годы минимума показывает, что на высотах ниже максимума слоя F1 максимальные значения  $N_e$  отмечались в летний период, минимальные – в зимний.

Рис. 2. Поведение  $N_p$  (12 LT) на высотах 190 км (1) и 200 км (2) в 2007 г. Пунктир – экспериментальные  $N$ .



Можно говорить о хорошей степени аппроксимации большей части экспериментального материала. Рассмотрим отклонения  $dN$ , вычисленные по среднемесячным значениям  $N_p$  полученным осреднением ежедневных вычислений для каждого часа LT, от экспериментальных по формуле:  $dN = (N_p - N_э) / N_э$ .

**Таблица 2.  $dN$  (%) в некоторые месяцы 2007 г. на высотах 150 и 190 км**

150 км												
LT	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Февраль	-	-	-	-	34	18	-11	-30	-41	-	-	-
Март	-	-	-	-	34	24	20	7	-4	-25	-33	-50
Апрель	-	33	25	16	9	4	1	-4	-7	-11	-11	-25
Июнь	18	9	7	2	-2	-5	-1	-2	-3	-7	-12	-12
Сентябрь	-	-	-	36	23	17	9	7	1	3	-14	-23
190 км												
LT	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Февраль	-	-	-	-	11	-6	-20	-31	-33	-36	13	-
Март	-	-	-	25	9	-	-5	-14	-17	-29	-29	-22
Апрель	30	18	17	16	12	8	4	-3	-8	-12	-14	-19
Июнь	11	9	8	7	5	2	2	2	1	-3	-7	-11
Сентябрь	-	45	21	17	13	4	-1	-7	-7	-10	-20	-21

Отметим превышение  $N_p$  над  $N_e$  в дополуночные часы на высотах 150 и 190 км во все рассмотренные месяцы. После полудня и в вечерние часы преобладает превышение экспериментальных величин  $N_e$  над расчетными. Эти явления могут быть связаны с погрешностями расчетов при больших ( $>70$ ) зенитных углах Солнца для ранних утренних и вечерних часов. Возможна также связь их с особенностями отклонения в газовом составе от его модельного описания.

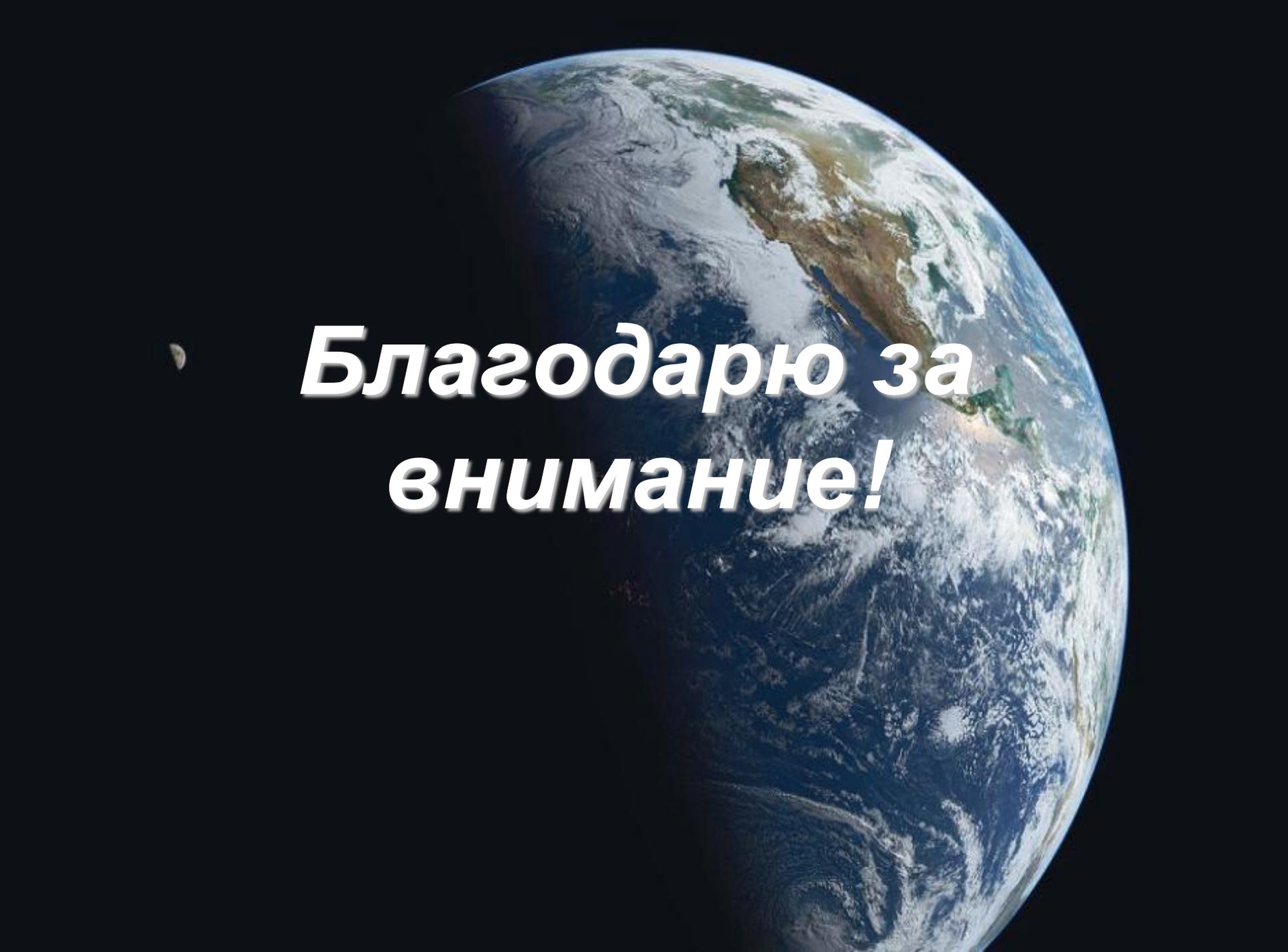
## **Заключение**

Использование ПЭМ, описывающей связь  $N_e$  с характеристиками нейтрального газа термосферы, зенитным углом Солнца и потоком ионизирующего излучения, позволяет детально проанализировать поведение ионосферы на высотах ниже 200 км, где днем соблюдается условие фотохимического равновесия.

Полученные в этой работе коэффициенты уравнения регрессии модели ПЭМ для станции Норильск соответствуют конкретным условиям последнего минимума солнечной активности и являются важным дополнительным штрихом к модели ПЭМ.

Проведенная аппроксимация массива  $N_e$  в годы минимума для ст. Норильск позволила проанализировать годовое изменение  $N_e$  в этот период.

Дальнейшая работа с накопленным экспериментальным материалом, позволит разработать более полную модель ПЭМ для разных условий солнечной активности. Такая модель, в частности, важна для оценки газового состава термосферы по данным ионосферных измерений.

A high-resolution photograph of Earth from space, showing the Americas and the Atlantic Ocean. The Earth is curved, with the horizon line visible. The colors are vibrant, with deep blues for the oceans, greens and browns for the continents, and white for the clouds. The background is a solid black, representing the vacuum of space. A small, crescent moon is visible in the upper left quadrant of the image.

***Благодарю за  
внимание!***

## Литература:

- Щепкин Л.А., Климов Н.Н. Термосфера Земли. М.: Наука, 1980. 220 с.
- Щепкин Л.А., Кушнарченко Г.П., Фрейзон И.А., Кузнецова Г.М. Связь электронной концентрации в средней ионосфере с состоянием термосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1997. Т. 37, №5. С. 106-113.
- Щепкин Л.А., Кузнецова Г.М., Кушнарченко Г.П., Ратовский К.Г. Аппроксимация данных по измерениям электронной концентрации в средней ионосфере при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. – Иркутск, 2008. Вып.11. С. 66-69.
- Щепкин Л.А., Кушнарченко Г.П., Кузнецова Г.М. Годовые вариации электронной концентрации в области F1 ионосферы // Солнечно-земная физика. – Иркутск, 2005. Вып.7. С. 62-65.
- Picone J.M., Hedin A.E., and Drob D.P., Aikin A.C. (GTD7-2000) NRLMSIS-00 Empirical model of the atmosphere; statistical comparisons and scientific issues // J.of Geophys. Research. 2002. Vol.107, N A12, P.1469, doi:10.1029/2002JA009430.
- Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft X-rays and EUV // Solar Phys. 1998. V. 147. N 1. P. 147–159.
- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

Для получения коэффициентов  $x_j$  был выбран массив ежедневных ежечасных значений  $N$ , измеренных с помощью Норильского дигизонда на высотах 120, 130, ..., 190, 200 км. Период измерений: 2003-2009гг., моменты времени - с 7 до 18 LT. Концентрации нейтральных частиц  $[O]$ ,  $[O_2]$  и  $[N_2]$  и температура  $T$  вычисляются по модели термосферы GTD7-2000 [Picone et al., 2002].

Величины  $E$  рассчитаны по модели [Tobiska, Eparvier, 1998]. В результате получены коэффициенты уравнения (1) для минимума солнечной активности (2007-2009 гг.), что является новым вкладом в существующую версию модели ПЭМ (табл. 1). С помощью полученных коэффициентов рассчитаны и проанализированы вариации электронной концентрации  $N_e$  в годичном цикле на высотах слоя F1 в период последнего минимума на ст. Норильск.

Обсуждены отклонения расчетных  $N_e$  от экспериментальных и возможные причины, их вызывающие. Результаты представлены в рисунках и таблицах.