

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

О.Е. Яковлева, Г.П. Кушнаренко, Г.М. Кузнецова

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
yakovleva@iszf.irk.ru

ELECTRON DENSITY AT HEIGHTS OF THE F1 LAYER ABOVE NORILSK DURING THE SOLAR MINIMUM

O.E. Yakovleva, G.P. Kushnarenko, G.M. Kuznetsova

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Проведено обобщение массива экспериментальных измерений электронной концентрации на высотах 120–200 км с помощью полуэмпирической модели ПЭМ, ранее разработанной авторами. Данные получены по результатам измерений цифрового ионозонда Норильска (69.4° N; 88.1° E). Исследование результатов показало вполне удовлетворительную степень описания значений N_e в годы минимума солнечной активности. Полученные результаты свидетельствуют о хорошей степени приемлемости уравнения модели ПЭМ для задач по обобщению экспериментального материала в различных гелиогеофизических условиях.

Ключевые слова: электронная концентрация, годовое поведение, полуэмпирическая модель (ПЭМ)

Abstract. We made generalization of the measurement set of electron concentration N_e at the heights 120–200 km using the semi-empirical model (SEM), earlier developed by the authors. The N_e data were obtained by digital ionosonde in Norilsk (69.4° N; 88.1° E) during solar activity minimum (2007–2009). Examination of the N_e approximation results showed quite a satisfactory level of describing N_e values in the years of solar activity minimum. The obtained results testify a good acceptability degree of used model equation for problems on generalization of the experimental data in different helio-geophysical conditions.

Keywords: electron density, annual variation, semiempirical model (SEM)

Введение

На высотах средней ионосферы 120–200 км в дневное время электронная концентрация контролируется состоянием нейтрального газа термосферы при определенной величине энергии ионизирующего излучения [Щепкин, Климов, 1980]. На этих высотах в дневной ионосфере в большинстве случаев хорошо выполняется условие фотохимического равновесия. Это позволяет сравнительно просто описать связь N_e с газовым составом и его температурой. Структура полуэмпирической модели (ПЭМ), описывающей в виде аналитической зависимости эту связь, была разработана авторами ранее [Щепкин и др., 1997].

Важным условием получения такого рода оценок является регулярность измерений N_e . В последнее время в связи с получением детальных данных по N_e ниже максимума слоя F2 с помощью дигизонда в Норильске появилась возможность аппроксимировать этот массив данных с помощью ПЭМ в условиях последнего минимума (2007–2009 гг.).

В работе проведен анализ поведения N_e в годичном цикле на высотах ионосферного слоя F1 (140–200 км) в течение минимума солнечной активности 2007–2009 гг. на ст. Норильск.

Модельные расчеты

На фиксированных высотах слоя F1 в освещенной Солнцем ионосфере N_e можно описать с помощью аналитического соотношения [Щепкин и др., 1997]:

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

Здесь N_{av} определяет среднее значение N_e по всему объему данных отдельно для каждой высоты. x_j — коэффициенты данного уравнения. Концентрации нейтральных частиц [O], [O₂] и [N₂] и температура T вычисляются по модели термосферы [Picone et al., 2002], χ — зенитный угол Солнца, E_0 — значение энергии потока ионизирующего излучения E при максимуме солнечной активности. Величины E рассчитаны по модели [Tobiska, Eparvier, 1998]. Для получения коэффициентов x_j был выбран массив ежедневных ежечасных значений N_e , измеренных Норильским дигизондом на высотах 120, 130, ..., 190, 200 км. Период измерений: 2003–2009 гг., моменты времени — с 7 до 18 LT. Значения индексов F10.7, Ap брались из базы данных WDC-C2 в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. В результате получены коэффициенты уравнения аппроксимации для ст. Норильск в период минимума солнечной активности, что является новым вкладом в существующую версию модели ПЭМ (см. табл. 1).

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–

Таблица 1

Коэффициенты уравнения аппроксимации (ст. Норильск)

h , км	$N_{ev} \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
120	7.44	-0.2807	-6.961	5.181	0.0000	0.9730
130	8.55	-0.4443	-7.650	5.591	0.2339	0.9150
140	10.15	-0.4079	-7.809	5.645	0.2364	0.7881
150	11.95	-0.4228	-7.562	5.426	0.4184	0.6943
160	13.65	-0.4310	-6.802	4.991	0.5861	0.6898
170	15.19	-0.4360	-5.372	4.417	0.7240	0.7395
180	16.85	-0.4130	-2.816	3.708	0.8129	0.7495
190	18.99	-0.3937	0.890	2.944	0.8740	0.7261
200	21.56	-0.4291	4.602	2.284	0.9369	0.7868

200 км показаны на рис. 1 для одного года минимума (2009 г.). Для сравнения на каждой высоте приведены экспериментальные величины N_{21} , т. е. осредненные за 21 день полуденные N_s по всему массиву данных (± 10 дней с центром в данной точке). Очевидно хорошее соответствие кривых, описывающих годовое поведение N_p и N_{21} , как в величинах, так и по форме.

Высотные вариации годовых изменений N_p и N_{21} в 2007 и 2008 гг., аналогичны представленным на рис. 1. Значения N_p , соответствующие определенным высотам (150, 170, 190 км) довольно близки друг другу во все годы минимума. Экспериментальные значения N_{21} достаточно хорошо соответствуют рассчитанным. Отметим, что максимальные значения N_e отчетливо просматриваются на всех высотах в летние месяцы и минимальные — в зимние. Форма кривых, описывающих годовое поведение N_p на верхних уровнях 190 и 200 км несколько отлична от нижних высот. На рис. 2 в годовом изменении N_p (2007 г.) просматриваются два горба в равноденственные периоды. В 2008 г. эти горбы становятся менее заметны, а к следующему 2009 г. остается лишь небольшое превышение в весеннее равноденствие над летними значениями N_p . Таким образом, исследование массива N_e в Норильске в годы минимума показывает, что на всех высотах ниже максимума слоя F1 максимальные значения N_e отмечались в летний период, минимальные — в зимний.

Отсутствие данных на всех высотах в конце года ($D=300, 330, 360$) можно объяснить тем, что при низкой солнечной активности зимой, когда минимальные значения N_e приходится на зимний период, на вы-

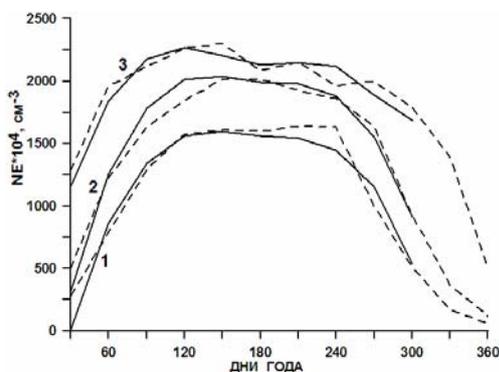


Рис. 1. Годовые изменения N_p (12 LT) на высотах 150 (1), 170 (2) и 190 км (3) в 2009 г. Штриховые линии — экспериментальные N_{21} на соответствующих высотах

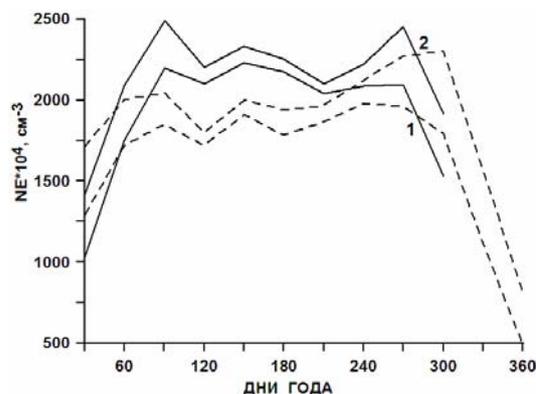


Рис. 2. Поведение N_p (12 LT) на высотах 190 км (1) и 200 км (2) в 2007 г. Штриховые линии — экспериментальные N_{21}

сотах рассматриваемого интервала, они становятся малыми и ненадежными. Можно также отметить, что многочисленные пропуски и отсутствие данных в исследуемых массивах N_e в годы минимума приводят к тому, что при расчетах коэффициентов уравнения аппроксимации для этого периода были получены коэффициенты корреляции между массивами рассчитанных и экспериментальных данных N_e в пределах 0.9–0.6, причем наибольшее значение соответствует высоте 120 км, а наименьшее — высоте 200 км. Следствием этого является некоторое различие в значениях N_p и N_{21} на верхних высотах 190 и 200 км (см. рис. 2).

В целом можно говорить о хорошей степени аппроксимации большей части экспериментального материала. Для сравнения приведем таблицу рассчитанных значений (дневные часы) N_p и экспериментальных среднемесячных N_{21} (апрель и июнь 2007–2009 гг.).

Данные в табл. 2 показывают, что между экспериментальными и рассчитанными N_e имеется вполне разумное соответствие. Рассмотрим отклонения dN , вычисленные по среднемесячным значениям N_p , полученным осреднением ежедневных вычислений для каждого часа LT, от экспериментальных по формуле: $dN = (N_p - N_s) / N_s$. Отклонения dN (в процентах) в 2007 г. на высотах 150 и 190 км показаны в таблице 3.

Отметим превышение N_p над N_s в дополуночные часы на высотах 150 и 190 км во все рассмотренные в табл. 3 месяца. После полудня и в вечерние часы преобладает превышение экспериментальных

Таблица 2

Среднемесячные N_{21} и рассчитанные N_p на высотах 150 и 190 км ($N \cdot 10^4$, см $^{-3}$)

150 км		апрель						июнь					
год	LT	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14	16	18
2007	Ncl	12	15	16	15	12	10	14	16	18	17	15	12
	N21	10	13	15	16	14	10	13	16	18	17	16	14
2008	Ncl	10	12	14	15	12	10	14	16	17	17	15	12
	N21	10	13	14	14	12	10	14	16	18	18	16	14
2009	Ncl	12	15	16	15	12	10	15	17	18	17	15	12
	N21	10	13	15	15	14	10	14	18	19	19	18	15
190 км													
год	LT	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14	16	18
2007	Ncl	18	21	22	22	19	15	19	21	22	22	20	17
	N21	15	18	20	22	21	18	18	20	22	21	20	20
2008	Ncl	18	21	22	22	19	15	19	21	22	22	20	18
	N21	14	16	17	19	19	16	17	17	19	19	20	19
2009	Ncl	19	21	22	22	19	15	20	21	22	22	20	18
	N21	14	17	20	21	21	18	18	21	22	23	22	21

Таблица 3

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

величин N_e над расчетными. Эти явления могут быть связаны с погрешностями расчетов при больших ($>70^\circ$) зенитных углах Солнца для ранних утренних и вечерних часов. Возможна также связь их с особенностями отклонения в газовом составе от его модельного описания. Так вечерний эффект может быть обусловлен повышенной по сравнению с моделью концентрацией атомарного кислорода [Щепкин и др., 1997].

Заключение

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 электронной концентрации в этот период. В частности показала, что на всех высотах ниже максимума слоя F1 максимальные значения N_e отмечаются в летний период, минимальные — в зимний.

Список литературы

Щепкин Л.А., Климов Н.Н. Термосфера Земли. М.: Наука, 1980. 220 с.
 Щепкин Л.А., Кушнаренко 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., Кушнаренко Г.П., Ратовский К.Г. Аппроксимация данных по измерениям электронной концентрации в средней ионосфере при низкой солнечной активности // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 11. С. 66–69.
 Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Годовые вариации электронной концентрации в области F1 ионосферы // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 7. С. 62–65.
 Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. (GTD7-2000) NRLMSIS-00 Empirical model of the atmosphere; statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Research. 2002. V. 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>