

## ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F1 В ПОСЛЕДНЕМ МИНИМУМЕ (2007–2009 гг.) ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

### ELECTRON DENSITY AT F1-LAYER HEIGHTS IN THE LAST SOLAR MINIMUM (2007–2009)

**Г.П. Кушнаренко**

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

**О.Е. Яковлева**

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

**Г.М. Кузнецова**

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

**G.P. Kushnarenko**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kusch@iszf.irk.ru*

**O.E. Yakovleva**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, yakovleva@iszf.irk.ru*

**G.M. Kuznetsova**

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kuz@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты анализа годовых изменений дневной электронной концентрации  $N$  на высотах 140–200 км для последнего минимума солнечного цикла (2007–2009 гг.) по измерениям Иркутского дигизонда (52 °N, 104 °E). Для выделения закономерностей этих изменений определены новые коэффициенты известной авторской полуэмпирической модели (ПЭМ), описывающей связь  $N$  с характеристиками термосферы. Получено, что характерной особенностью годовых вариаций  $N$  в период минимума солнечного цикла является изменение их фазы на 180° в относительно узком интервале высот (170–180 км). Эти результаты, включая новые коэффициенты ПЭМ, являются оригинальными и представляют интерес для физики атмосферы и ионосферы.

**Ключевые слова:** полуэмпирическая модель электронной концентрации, годовые вариации, высоты слоя F1.

**Abstract.** We present the results of the analysis of annual variations in daily electron density ( $N$ ) at heights 140–160 km for the last solar minimum (2007–2009) obtained from digisonde measurements at the ionospheric station Irkutsk (52 °N, 104 °E). New coefficients of the known semi-empirical model (SEM) describing the connection between  $N$  and thermospheric characteristics are calculated to identify regularities of these variations. We have revealed that a characteristic feature of the annual  $N$  variations during the solar minimum is a change in their phase by 180° in a relatively narrow altitude interval (170–180 km). These results and the new SEM coefficients are original and important for atmospheric and ionospheric physics.

**Keywords:** semi-empirical model of electron density, annual variations, F1-layer heights.

## ВВЕДЕНИЕ

Параметры профиля электронной концентрации  $N(h)$  на высотах ионосферного слоя F1 (120–200 км) жестко связаны с состоянием нейтрального газа термосферы [Щепкин, Климов, 1980], поэтому величины  $N$  в этом высотном интервале должны контролироваться не только зенитным углом Солнца, но и концентрациями основных газовых частиц и их температурами. На этих высотах происходит быстрое изменение аэрономических характеристик: отмечаются большие градиенты температуры нейтрального газа и быстрые изменения температур электронов и ионов. Особенности этой области высот проявляются в образовании слоя F1, своеобразном изменении формы  $N(h)$ -профиля во времени, а также зависимости от уровня солнечной активности и магнитной возмущенности. Удобно рассмотреть такого рода вариации  $N$ , используя расчеты с помощью разработанной авторами полуэмпирической модели (ПЭМ) [Щепкин и др., 1997], описывающей

электронную концентрацию в зависимости от состояния термосферы, при этом легко выделить вариации, связанные с временем года и суток, в условиях разной солнечной и магнитной активности.

Цель настоящей работы — анализ вариаций электронной концентрации  $N$  в годовом цикле на высотах ионосферного слоя F1 (140–200 км) в минимуме солнечной активности 2007–2009 гг. Рассматривались отклонения рассчитанных значений  $N$  от экспериментальных в разные месяцы этих лет и обсуждались возможные причины, их вызывающие. Отметим, что полученные результаты расчетов справедливы в рамках использованной в работе модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

## МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

На фиксированных высотах слоя F1 величины  $N$  можно описать с помощью аналитического соотношения [Щепкин и др., 2005, 2007]

$$\begin{aligned}
 N/N_{av} = & x_1 + x_2([O]/(5[O_2] + [N_2]))^{1.5} + \\
 & + x_3([O]/[N_2])^{0.5} \cos(\chi)^{0.5} + \\
 & + x_4 \exp(-(T-600)/600) + x_5(E/E_0).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $N_{av}$  определяет среднее значение  $N$  по всему объему данных отдельно для каждой высоты,  $x_j$  — коэффициенты уравнения (1). Концентрации нейтральных частиц  $[O]$ ,  $[O_2]$  и  $[N_2]$  и температура  $T$  вычисляются по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002],  $\chi$  — зенитный угол Солнца,  $E$  — значение интегральной интенсивности потока ионизирующего излучения,  $E_0$  соответствует значению  $E$  в максимуме солнечной активности. Величины  $E$  рассчитаны по модели [Tobiska, Eparvier, 1998]. Для получения коэффициентов  $x_j$  уравнения (1) был выбран массив ежедневных ежечасных значений  $N$ , измеренных с помощью Иркутского дигизонда на высотах 120, 130, ..., 190, 200 км в 2003–2009 гг. в моменты времени с 7 до 18 LT. Для вычисления характеристик термосферы и значений  $E$  использовались ежесуточные значения индекса  $F10.7$  и его значения, усредненные по 81 дню (3 оборота Солнца). Уровень геомагнитной активности учитывался с помощью ежедневных 3-часовых значений индекса  $A_p$  [http:// [wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp)]. В результате получены коэффициенты уравнения аппроксимации (1) для ст. Иркутск в минимуме солнечной активности, что является значительным вкладом в существующую версию ПЭМ (табл. 1).

Таблица 1  
Коэффициенты уравнения аппроксимации (1)

$h$ , км	$N_{av} \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
120	9.35	-0.1387	-7.245	4.261	0.0000	0.8025
130	10.70	-0.2776	-7.167	4.505	0.1869	0.7202
140	12.47	-0.3066	-6.225	4.458	0.1925	0.6873
150	14.42	-0.3814	-4.803	4.160	0.3468	0.7123
160	16.55	-0.4446	-2.760	3.710	0.4833	0.7606
170	19.24	-0.5073	0.565	3.168	0.5719	0.7501
180	23.06	-0.5759	4.977	2.627	0.5941	0.6790
190	27.95	-0.6901	8.793	2.199	0.5940	0.7681
200	32.92	-0.8756	10.967	1.972	0.6136	1.1206

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичные формы рассчитанных кривых годового хода полуденных величин  $N_p$  на нижнем и верхнем уровнях рассматриваемого высотного интервала 140–200 км показаны на рис. 1. Годовые изменения  $N_p$  для трех лет минимума солнечной активности (2007–2009 гг.) представлены отдельно для высот 150 и 190 км. Можно отметить, что рассчитанные значения  $N_p$ , соответствующие одной высоте, довольно близки друг другу во все три года минимума. Максимальные значения отчетливо просматриваются на нижних высотах (в частности, на 150 км) в летние месяцы, а минимальные — в зимние. Такая форма кривых  $N_p(D)$  ( $D$  — номер дня в году) характерна для высот 140–170 км. На высотах 190 и 200 км максимальные значения  $N_p$  имеют место, как правило, в зимние месяцы, а летом наблюдается минимум годового хода.

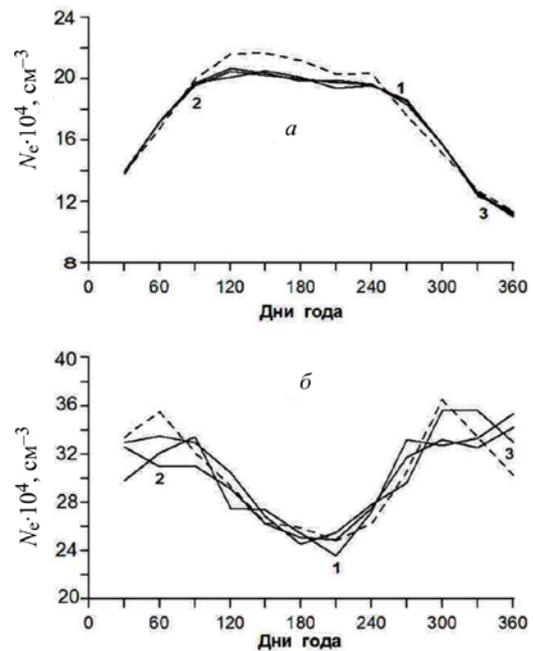


Рис. 1. Годовые изменения рассчитанных  $N_p$  на высотах 150 км (а) и 190 км (б) для трех лет: 1 — 2007 г., 2 — 2008 г., 3 — 2009 г. Штриховые кривые — экспериментальные значения (2007 г.)

Переход от одного типа кривых  $N_p(D)$  к другому происходит вблизи высоты 170 км. Вблизи этой высоты происходит изменение фазы годового хода  $N$  на  $180^\circ$ . Здесь отмечается самая маленькая амплитуда годовых вариаций. Описанные изменения формы годовых вариаций  $N_p$  обусловлены высотными вариациями газового состава, происходящими на фоне изменения зависимости скоростей процессов нейтрализации заряженных частиц ионосферы от электронной концентрации.

На рис. 2 показано годовое поведение (2007 г.) рассчитанных полуденных  $N_p$  на трех высотах — 150, 170 и 190 км. Для сравнения на каждой высоте приведены экспериментальные величины  $N_{21}$ , т. е.  $N$ , осредненные за 21 день по всему массиву данных ( $\pm 10$  дней с центром в данной точке). На всех высотах обнаруживается хорошее соответствие кривых, описывающих годовое поведение рассчитанных и экспериментальных  $N$ , как по величине, так и по форме. Сходство поведения  $N_{21}$  с обсуждаемыми рассчитанными вариациями  $N_p$  заключается в том, что на

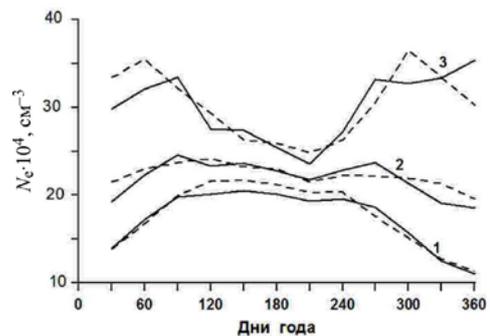


Рис. 2. Годовое изменение рассчитанных в 2007 г. полуденных  $N_p$  на высотах 150 км (1), 170 км (2), 190 км (3). Штриховые кривые — экспериментальные  $N_{21}$  для каждой высоты

Таблица 2, а

Рассчитанные  $N_p$  и величины  $N_{21}$  на высоте 150 км ( $N \cdot 10^4$ , см<sup>-3</sup>)

150 км	апрель							июнь					
год	LT	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14	16	18
2007	$N_p$	20	22	23	21	19	15	19	21	21	20	18	16
	$N_{21}$	14	19	21	19	14	7	15	20	21	21	17	11
2008	$N_p$	20	22	22	21	19	15	19	21	21	20	18	15
	$N_{21}$	14	18	19	18	14	6	15	19	20	19	16	11
2009	$N_p$	20	22	22	21	19	15	19	21	21	20	18	15
	$N_{21}$	14	19	20	19	14	7	15	20	21	20	17	10

Таблица 2, б

Рассчитанные  $N_p$  и величины  $N_{21}$  на высоте 190 км ( $N \cdot 10^4$ , см<sup>-3</sup>)

190 км	апрель							июнь					
год	LT	8	10	12	14	16	18	8	10	12	14	16	18
2007	$N_p$	33	35	35	33	31	26	25	27	28	27	25	22
	$N_{21}$	22	27	31	29	26	18	21	25	27	25	22	19
2008	$N_p$	33	35	34	33	30	26	25	27	27	27	25	22
	$N_{21}$	21	24	26	26	24	15	20	25	25	23	20	17
2009	$N_p$	33	35	35	33	31	26	25	27	28	27	25	22
	$N_{21}$	22	25	28	27	23	16	22	26	26	24	21	15

Таблица 3, а

$dN$  (%) в некоторые месяцы 2007 г. на высоте 150 км

LT	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
февраль	–	0	10	17	15	7	0	0	0	–	–	–
апрель	0	7	0	0	0	5	0	0	0	7	0	0
июнь	0	0	–5	–5	–5	–9	–5	–5	–5	–6	0	0
сентябрь	0	8	7	0	0	0	0	6	7	18	0	–
декабрь	–	–	–	0	0	9	8	0	–	–	–	–

Таблица 3, б

$dN$  (%) в некоторые месяцы 2007 г. на высоте 190 км

LT	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
февраль	60	19	0	0	3	3	3	0	7	5	–6	50
апрель	0	4	8	3	0	0	3	3	0	0	0	0
июнь	–10	0	–8	0	0	–3	4	0	4	0	0	5
сентябрь	0	4	0	4	3	0	3	0	–4	4	5	30
декабрь	–	–	7	3	6	0	3	3	9	–	–	–

150 км отмечается летний максимум, а на 190 км значения  $N$  зимой заметно большие, чем в равноденствия и в летние месяцы. Аналогичные рисунки, показывающие годовые вариации рассчитанных  $N_p$  в 2008 и 2009 г., вписываются в представленную выше схему.

На высотах 190 и 200 км минимум кривой  $N_p(D)$  устойчиво отмечается в июле. В то же время максимум наблюдается обычно зимой, в ноябре или декабре. Небольшое понижение  $N_p$  имеет место в декабре или январе по данным расчетов. В этом случае при минимальной солнечной активности характерна двугорбая форма кривой  $N_p(D)$  с максимумами в марте и октябре–ноябре. Минимальные значения  $N_p$  отмечаются ниже 190 км в зимние месяцы. В целом можно говорить о хорошей степени аппроксимации большей части экспериментального материала. Для сравнения приведем таблицу рассчитанных значений (дневные часы)  $N_p$  и экспериментальных  $N_{21}$  (апрель и июнь 2007–2009 гг.).

Данные табл. 2 (а, б) показывают, что между экспериментальными и рассчитанными  $N$  имеется вполне разумное соответствие. Рассмотрим откло-

нения  $dN$  (получены по среднемесячным значениям  $N_p$  осреднением ежедневных значений для каждого часа LT) от экспериментальных  $N_p$  по формуле

$$dN = (N_p - N_3) / N_3.$$

Отклонения  $dN$  для некоторых месяцев 2007 г. на высотах 150 и 190 км показаны в табл. 3 (а, б).

Отметим зимнее (февраль) превышение  $N_p$  над  $N_3$  в дополуденные часы на высоте 150 км, а также в утренние часы на 190 км. Эти явления могут быть связаны с погрешностями расчетов при больших (>70°) зенитных углах Солнца, но возможна также их связь с особенностями отклонения в газовом составе от его модельного описания [Щепкин и др., 2008]. На нижних высотах 140–160 км отсутствие данных можно объяснить тем, что при низкой солнечной активности, когда минимальные значения  $N$  приходится на зимний период, они становятся малыми и ненадежными.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПЭМ позволяет детально проанализировать поведение ионосферы на высотах ниже 200 км, где

днем соблюдается условие фотохимического равновесия.

Полученные в настоящей работе коэффициенты уравнения регрессии ПЭМ соответствуют конкретным условиям последнего минимума солнечной активности (2007–2009 гг.) и являются важным дополнением к ПЭМ. С помощью этих коэффициентов рассчитаны и проанализированы годовые вариации электронной концентрации  $N$  на высотах слоя F1 на ст. Иркутск.

Наиболее характерной особенностью поведения электронной концентрации в этот период является изменение фазы годовой вариации на  $180^\circ$  в относительно узком интервале высот (170–180 км), где отмечается наиболее слабая изменчивость дневных  $N$  в годовом цикле.

Дальнейшая работа с накопленным экспериментальным материалом позволит получить более полную ПЭМ для разных условий солнечной активности. Такая модель, в частности, важна для оценки газового состава термосферы на высотах слоя F1 по данным ионосферных измерений.

## 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 // Геоматизм и аэронавигация. 1997. Т. 37, № 5. С. 106–113.

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.

Щепкин Л.А., Кузнецова Г. М., Кушнаренко Г.П., Ратовский К.Г. Интерпретация измерений электронной концентрации с помощью полуэмпирической модели // Солнечно-земная физика. 2007. Вып. 10. С. 89–92.

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.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere; statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N A12. P. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/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>

## REFERENCES

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. (GTD7-2000) NRLMSISE-00 Empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, pp. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Shchepkin L.A., Klimov N.N. The Earth thermosphere. Moscow: Nauka Publ., 1980, 220 p.

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Freizon I.A., Kuznetsova G.M. The electron density connection with the thermospheric state in the middle ionosphere. *Geomagnetizm i aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 1997, vol. 37, no. 5, pp. 106–113. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Kuznetsova G.M. Annual electron density variations in F1 region of ionosphere. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys]. 2005, vol. 7, pp. 62–65. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P., Rатовский K.G. The interpretation of electron density measurements with using semiempirical model. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys]. 2007, vol. 10, pp. 89–92. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P., Rатовский K.G. Approximation of electron density measurements data in middle ionosphere during the low solar activity. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys]. 2008, vol. 11, pp. 66–69. (In Russian).

Tobiska W.K., Eparvier F.G. EUV97: Improvements to EUV irradiance modeling in the soft x-rays and EUV. *Solar Phys.* 1998, vol. 147, no. 1, pp. 147–159.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>

### Как цитировать эту статью

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Электронная концентрация на высотах ионосферного слоя F1 В последнем минимуме (2007–2009 гг.) цикла солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 1. С. 72–75. DOI: [10.12737/szf-41201806](https://doi.org/10.12737/szf-41201806).