

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], χ — 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 Ap [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.

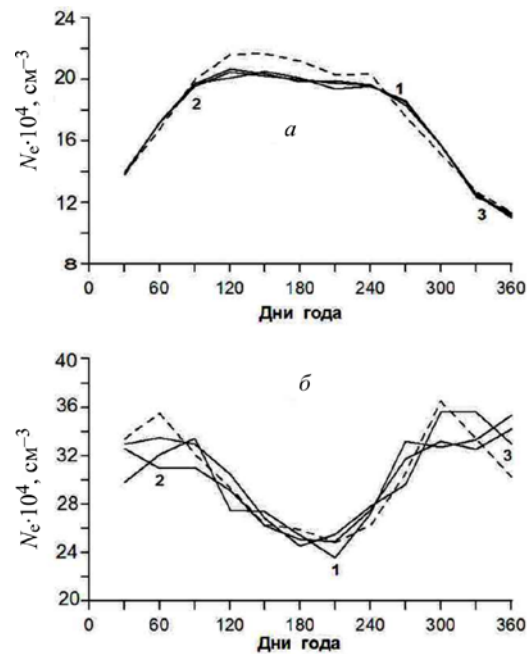


Рис. 1. Годовые изменения рассчитанных N_p на высотах 150 км (а) и 190 км (б) для трех лет: 1 — 2007 г., 2 — 2008 г., 3 — 2009 г. Штриховые кривые — экспериментальные значения (2007 г.)

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° . 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 (± 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

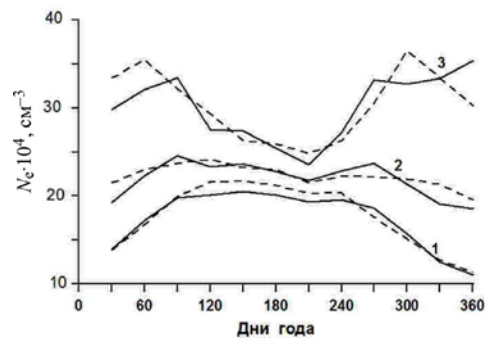


Рис. 2. Годовое изменение рассчитанных в 2007 г. полуденных N_p на высотах 150 км (1), 170 км (2), 190 км (3). Штриховые кривые — экспериментальные N_{21} для каждой высоты

Таблица 2, а

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

| 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⁻³)

| 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° 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).