

**ЭЛЕКТРОННАЯ КОНЦЕНТРАЦИЯ НА ВЫСОТАХ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ F1  
В ПЕРИОД 2007–2014 гг. НАД НОРИЛЬСКОМ****ELECTRON DENSITY IN THE F1 LAYER OVER NORILSK  
IN 2007–2014****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 данных по электронной концентрации  $N$ , полученных с помощью дигизонда в годы минимума, роста и максимума солнечной активности (2007–2014) на ст. Норильск (69.4° N, 88.1° E). Расчеты выполнены с использованием авторской полуэмпирической модели, описывающей связь  $N$  с характеристиками термосферы. Рассчитаны новые коэффициенты аппроксимации, соответствующие указанным выше условиям конкретно для ст. Норильск. В результате получены высотные изменения годовых вариаций дневной  $N$  на высотах слоя F1 ионосферы 120–200 км. Аппроксимация экспериментальных данных вполне удовлетворительно описывает  $N$  на указанных высотах в дневные часы разных сезонов в условиях различной солнечной активности. Показано, что в годы минимума на всех высотах слоя F1 сохраняется тенденция к максимальным значениям  $N$  в летний период и к минимальным — в зимний. В последующие годы и в год максимума солнечной активности характерной особенностью поведения  $N$  является изменение фазы годовой вариации на 180° в интервале высот 170–180 км: максимальные величины наблюдаются зимой и минимальные — летом.

**Ключевые слова:** годовые вариации, электронная концентрация, полуэмпирическая модель.

**Abstract.** We report the results of the analysis of annual variations in daily electron density ( $N$ ) for various solar activity conditions — minimum, rise, and maximum (2007–2014) — obtained from digisonde measurements at the ionospheric station Norilsk (69.4° N, 88.1° E). New coefficients of the known semi-empirical model (SEM) describing the connection between  $N$  and thermosphere characteristics are calculated to identify regularities of these variations exactly at Norilsk station. The height changes of annual variations in the noon electron density  $N$  are obtained in the F1 region (120–200 km). The experimental data approximation describes  $N$  quite satisfactorily at these heights in the daytime of different seasons under different solar activity conditions. It is shown that in the years of solar minimum at all heights of the F1 layer the tendency remains for maximum  $N$  in summer and for minimum  $N$  in winter. In later years and in the year of maximum solar activity, a characteristic feature of the behavior of  $N$  is the change in the phase of the annual variation by 180° in the range of heights from 170 to 180 km: maximum  $N$  is observed in winter; and minimum, in summer.

**Keywords:** annual variations, electron density, semi-empirical model.

**ВВЕДЕНИЕ**

Структура полуэмпирической модели (ПЭМ), описывающей в аналитическом виде связь электронной концентрации  $N$  с характеристиками термосферы [Щепкин и др., 1997], была разработана авторами ранее. Многочисленные расчеты показали хорошее согласие модели с экспериментами. Следует отметить, что именно общий характер зависимости  $N$  от газового состава и температуры термосферы дает возможность применения обсуждаемой ПЭМ для описания поведения  $N$  на высотах 120–200 км в разных условиях солнечной и геомагнитной активности в различных географических пунктах, расположенных на средних и частично на высоких широтах

[Щепкин и др., 2005, 2007, 2008]. Удобно рассмотреть такого рода вариации  $N$ , используя расчеты с помощью полуэмпирической модели, благодаря чему можно легко выделить вариации, связанные со временем года, суток, обусловленные уровнем солнечной активности и магнитной возмущенности, а также отследить широтно-долготные изменения.

В связи с получением массива данных по  $N$  ниже максимума слоя F2 с помощью дигизонда на ст. Норильск появилась возможность проанализировать полученный экспериментальный материал. Работа базируется на регулярных ежедневных часовых значениях  $N$  в диапазоне высот 120–200 км, где в большинстве случаев в дневные часы выполняется условие фотохимического равновесия. Отметим, что под

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	7.51	-0.1844	-7.403	4.842	0.0000	0.9708
130	8.57	-0.4140	-7.960	5.459	0.2335	0.9473
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	19.19	-0.3267	1.388	2.659	0.8516	0.7008
200	22.32	-0.3604	5.298	1.983	0.9051	0.7580

определением «слой F1» следует понимать интервал высот 120–200 км, где в благоприятных условиях образуется слой F1.

Исследованы вариации полуденных величин электронной концентрации в годичном цикле на указанных высотах в периоды минимума, подъема и максимума солнечной активности (2007–2014). Рассмотрены отклонения рассчитанных значений  $N_p$  от экспериментальных  $N_s$  в разные месяцы этих лет, и приведены возможные причины, их вызывающие. Следует отметить, что полученные результаты справедливы в рамках, заданных соответствующими вариациями нейтрального газа в модели атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], использованной в работе.

### МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

На фиксированных высотах слоя F1 величины  $N$  можно описать с помощью аналитического соотношения [Щепкин и др., 2008]

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

Здесь  $N_{av}$  определяет среднее значение  $N$  по всему объему данных отдельно для каждой высоты;  $x_j$  — коэффициенты уравнения (1);  $\chi$  — зенитный угол Солнца;  $E_0$  — значение энергии потока ионизирующего излучения  $E$  при максимуме солнечной активности. Величины  $E$  рассчитаны по модели [Tobiska, Eparvier, 1998]. Концентрации нейтральных частиц  $[O]$ ,  $[O_2]$  и  $[N_2]$  и температура  $T$  вычисляются по модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002]. Для получения коэффициентов  $x_j$  уравнения (1) был выбран массив ежедневных ежечасных значений  $N$ , измеренных с помощью дигизонда на высотах 120, 130, ..., 190, 200 км на ст. Норильск. Период измерений — 2003–2014 гг., моменты времени — с 7 до 18 LT. Для вычисления характеристик термосферы и значений  $E$  использовались как ежесуточные значения индекса F10.7 (в единицах  $10^{-22} \text{ Вт м}^{-2} \text{ Гц}^{-1}$ ), так и усредненные по 81 дню (за три оборота Солнца). Уровень геомагнитной активности учитывался с помощью ежедневных 3-часовых значений индекса  $A_p$  [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp]. В результате получены коэффициенты уравнения аппроксимации (1) для периодов минимума, подъема и максимума солнечной активности, что явля-

ется вкладом в существующую версию модели ПЭМ. В табл. 1 приведены значения коэффициентов в условиях минимума для ст. Норильск.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Типичные кривые годового хода полуденных значений  $N_p$  на высотах 150, 180, 190 и 200 км для ст. Норильск (69.4° N, 88.1° E), рассчитанных за рассматриваемый период (2007–2014), показаны на рис. 1. В качестве примера был выбран год максимума — 2014 г. Для сравнения на каждой высоте приведены значения  $N_{21}$ , т. е. усредненные за 21 день полуденные экспериментальные величины  $N_s$  по всему массиву данных ( $\pm 10$  дней с центром в данной точке). Для всех высот присутствует достаточно хорошее соответствие между рассчитанными и экспериментальными кривыми  $N$  как по величинам, так и по форме.

На нижних высотах (150 км) отчетливо просматриваются максимальные значения  $N_p$  в летние месяцы и минимальные — в зимние. Такая форма кривых  $N(D)$  ( $D$  — 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.

Переход от одного типа кривых  $N(D)$  к другому происходит вблизи высоты 180 км. Здесь отмечается самая маленькая амплитуда годовых вариаций. Опи-

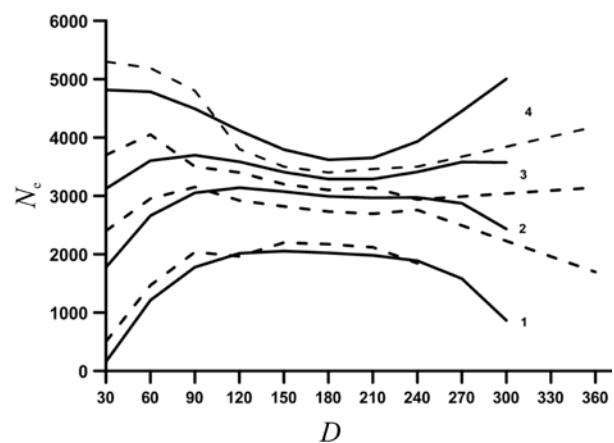


Рис. 1. Годовое изменение полуденных значений  $N_p$  в 2014 г. на нескольких высотах: 1 — 150 км; 2 — 180 км; 3 — 190 км; 4 — 200 км. Штриховая линия — усредненные экспериментальные значения  $N_{21}$ . По оси X отложены дни года

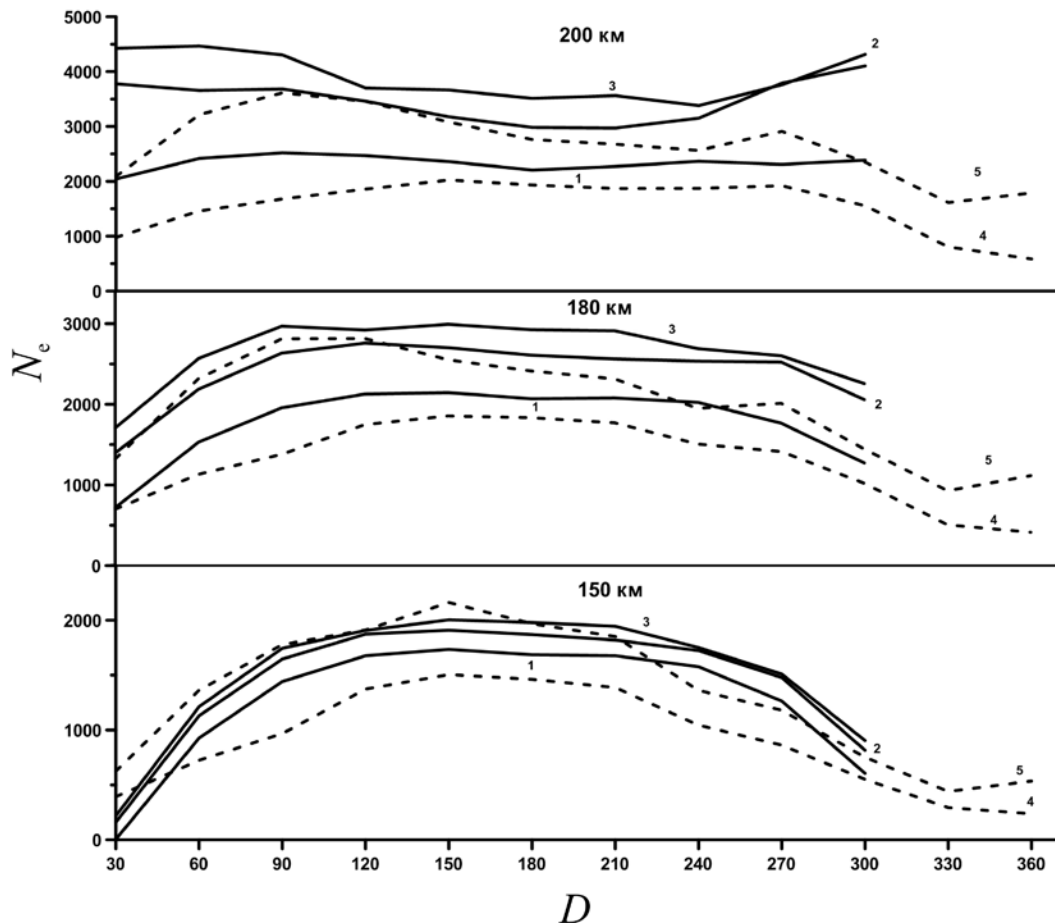


Рис. 2. Годовое изменение полуденных значений  $N_p$  на высотах 150 км, 180 км и 200 км для трех лет: 2009 г. (1), 2012 г. (2) и 2014 г. (3). Штриховые линии — значения  $N$  по модели IRI на каждой высоте для 2009 г. (4) и 2014 г. (5). По оси X отложены дни года

Таблица 2

Среднегодовые  $F_{10.7}$  в период 2007–2015 гг.

Год	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
$F_{10.7}$	74	69	71	80	113	120	123	146	118

саные изменения формы годовых вариаций  $N$  обусловлены высотными изменениями газового состава, происходящими на фоне изменения зависимости скоростей процессов нейтрализации заряженных частиц ионосферы от электронной концентрации.

Отсутствие данных на всех высотах в конце года ( $D=300, 330, 360$ ) объясняется тем, что в зимний период в рассматриваемом интервале высот экспериментальные значения  $N$  малы и ненадежны. Можно также отметить, что многочисленные пропуски и отсутствие данных в исследуемых массивах  $N$  в эти годы в Норильске приводят к тому, что коэффициенты корреляции между массивами рассчитанных и экспериментальных значений  $N$  для этого периода получены в пределах 0.94–0.70, 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.

Можно заметить некоторые различия в годовом поведении электронной концентрации в Норильске в годы минимума: в целом, по расчетам с помощью модели ПЭМ, на всех высотах сохраняется тенден-

ция к максимальным значениям  $N$  в летний период, что подтверждается и экспериментальными значениями. В другие годы (2010–2014) рассматриваемого периода изменение кривых  $N(D)$  соответствует описанному выше поведению в 2014 г.

На рис. 2 показаны годовые вариации полуденных значений  $N_p(D)$ , рассчитанных для высот 150, 180 и 200 км. Для каждой высоты значения  $N_p$  соответствуют трем выбранным годам: 2009 г. (минимум), 2012 г. (фаза роста) и 2014 г. (максимум солнечной активности). Значения для одной отдельно взятой высоты располагаются на рисунке в соответствии с изменением индекса солнечной активности  $F_{10.7}$ , возраставшего в период с 2010 по 2014 г. (см. табл. 2). Кривые  $N_p(D)$  для 2014 г. занимают на рисунке самое верхнее положение, а для 2009 г. — самое нижнее.

На рис. 2 также показаны вычисленные по модели IRI [Bilitza et al., 2017] для указанных высот годовые изменения полуденных значений  $N$  в 2009 и 2014 гг. Сходство с обсуждаемыми расчетными вариациями  $N$  заключается в том, что на высоте 150 км для всех рассмотренных лет отмечается летний максимум.

Таблица 3

Среднемесячные  $N_s$  и рассчитанные  $N_p$  на 150 и 190 км ( $N \cdot 10^4, \text{см}^{-3}$ ) для дневных часов местного времени

год	параметр	апрель						июнь					
		150 км											
		8 LT	10 LT	12 LT	14 LT	16 LT	18 LT	8 LT	10 LT	12 LT	14 LT	16 LT	18 LT
2007	$N_p$	12	15	16	15	12	10	14	16	18	17	15	12
	$N_s$	10	13	15	16	14	10	13	16	18	17	16	14
2012	$N_p$	13	16	18	17	14	10	15	18	19	18	16	13
	$N_s$	12	15	18	16	13	10	16	18	19	18	16	15
2014	$N_p$	14	17	19	18	15	10	16	19	20	19	17	14
	$N_s$	15	18	19	19	15	10	19	20	22	22	19	14
190 км													
2007	$N_p$	18	21	22	22	19	15	19	21	22	22	20	17
	$N_s$	15	18	20	22	21	18	18	20	22	21	20	20
2012	$N_p$	24	28	30	30	27	22	24	27	28	28	26	23
	$N_s$	20	25	28	27	25	17	24	26	28	27	28	22
2014	$N_p$	29	33	35	34	31	26	28	31	32	32	30	27
	$N_s$	23	27	29	29	26	20	26	27	29	28	27	24

Таблица 4

$dN$  (%) в 2007 г. на высотах 150 и 190 км

150 км												
месяц / 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												
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

Отличие же вариаций  $N$  по IRI от рассчитанных по ПЭМ — в наличии в кривых годового хода на 180 и 200 км двух максимумов в периоды равноденствий, причем весенний значительно выше осеннего. Такая форма кривых по IRI соответствует всем рассмотренным годам.

Этого не наблюдается при описании кривых  $N(D)$  моделью ПЭМ. Фаза в годовом цикле  $N$  изменяется на обратную на высотах около 180 км. Экспериментальные значения это подтверждают (см. рис. 1). В качестве расхождений с нашими результатами можно отметить более низкие рассчитанные по IRI значения  $N$  почти для всех рассмотренных высот исследуемого периода.

В целом можно говорить о хорошей степени аппроксимации большей части экспериментального материала. Для примера в табл. 3 приведены рассчитанные  $N_p$  и экспериментальные среднемесячные  $N_s$  (дневные часы) значения электронной концентрации для апреля и июня выбранных трех лет (2007, 2012 и 2014) на двух высотах (150 и 190 км). Данные (см. табл. 3) показывают, что между экспериментальными и рассчитанными величинами имеется вполне разумное соответствие. В то же время на высоте 190 км существует различие в значениях  $N_p$  и  $N_s$ , о причинах которого говорилось выше.

Отклонения  $dN$  вычисленных среднемесячных значений  $N_p$ , полученных усреднением ежедневных значений для каждого часа LT, от эксперименталь-

ных рассчитывались по формуле

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

В табл. 4 показаны отклонения  $dN$  (%) в некоторые месяцы 2007 г. на высотах 150 и 190 км.

В дополуночные часы наблюдается превышение  $N_p$  над  $N_s$  на высотах 150 и 190 км во все месяцы, после полудня и в вечерние часы экспериментальные величины выше расчетных. Причиной этого могут быть погрешности расчетов при больших ( $>70^\circ$ ) зенитных углах Солнца для ранних утренних и вечерних часов, а также особенности отклонения газового состава от его модельного описания [Щепкин и др., 2008]. В частности, зимой вечерний эффект на верхних высотах исследуемого интервала может быть обусловлен повышенной по сравнению с принятой в модели концентрацией атомарного кислорода.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование полуэмпирической модели, описывающей связь электронной концентрации с характеристиками термосферы, зенитным углом Солнца и интенсивностью потока ионизирующего излучения, позволило детально проанализировать поведение ионосферы на высотах ниже 200 км в условиях различной солнечной активности.

Полученные в этой работе коэффициенты уравнения регрессии ПЭМ для ст. Норильск соответствуют конкретным условиям минимума, максимума

и фазы роста солнечной активности на ст. Норильск и являются важными дополнениями модели.

Проведенная аппроксимация массива  $N$  позволила исследовать годовое изменение электронной концентрации в период 2007–2014 гг. на ст. Норильск. Показано, что в годы минимума на всех высотах слоя F1 сохраняется тенденция к максимальным значениям  $N$  в летний период и к минимальным — в зимний. В последующие годы и в год максимума солнечной активности характерной особенностью поведения  $N$  является изменение фазы годовой вариации на  $180^\circ$  в интервале высот 170–180 км: максимальные значения наблюдаются зимой и минимальные — летом.

Дальнейшее накопление экспериментального материала позволит разработать более полную версию ПЭМ для разных геогелиофизических условий. Такая модель, в частности, важна для оценки газового состава термосферы по данным ионосферных измерений.

Работа выполнена в рамках базового финансирования проекта П.16.1.1. «Исследование влияния солнечной активности и процессов в нижней атмосфере на изменения термодинамических характеристик атмосферы, Мирового океана и климат». Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. V. 15. P. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

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. 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. DOI: [10.1023/A:1004931416167](https://doi.org/10.1023/A:1004931416167).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (дата обращения 26 сентября 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 26 сентября 2018).

## REFERENCES

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017, vol. 15, pp. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

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. Res.* 2002, vol. 107, no. A12, p. 1469. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

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 variation of the electron density in the ionosphere F1 region. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2005, iss. 7, pp. 62–67. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P., Rатовский К.Г. The interpretation of the electron density measurements with the semiempirical model help. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2007, iss. 10, pp. 89–92. (In Russian).

Shchepkin L.A., Kuznetsova G.M., Kushnarenko G.P., Rатовский К.Г. Approximation of data on measurements of electron concentration in the middle ionosphere at low solar activity. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. 2008, no. 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. DOI: [10.1023/A:1004931416167](https://doi.org/10.1023/A:1004931416167).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed September 26, 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed September 26, 2018).

*Как цитировать эту статью:*

Кушнаренко Г.П., Яковлева О.Е., Кузнецова Г.М. Электронная концентрация на высотах ионосферного слоя F1 в период 2007–2014 гг. над Норильском. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 124–128. DOI: [10.12737/szf-52201915](https://doi.org/10.12737/szf-52201915).