

УДК 350.338.2.550.385

МОДЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В СРЕДНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Л.А. Щепкин[†], Г.М. Кузнецова, Г.П. Кушнаренко

MODEL DESCRIPTION OF ELECTRON DENSITY IN THE MIDDLE IONOSPHERE

L.A. Shchepkin[†], G.M. Kuznetsova, G.P. Kushnarenko

Приводятся и обсуждаются результаты сравнения модельных расчетов электронной концентрации N на высотах ионосферы 120–200 км с экспериментальными данными, полученными в ряде географических пунктов при различных уровнях солнечной активности в разные сезоны года в спокойных и возмущенных условиях. Расчеты были проведены с помощью разработанной авторами полуэмпирической модели (ПЭМ), дающей в общем виде связь N с характеристиками нейтрального газа термосферы и индексом солнечной активности. Приведенные в статье данные свидетельствуют о том, что расчеты по обсуждаемой ПЭМ в большинстве случаев хорошо согласуются с экспериментом (различие между ними составляет 10–20 %). Авторы полагают, что результаты сравнительного анализа, приведенные в статье, свидетельствуют о высокой степени универсальности обсуждаемой ПЭМ.

In this paper, we present and discuss results of a comparison between model calculations of electron density (N) at ionospheric heights of 120–200 km and experimental data obtained in a number of geographic points during various solar activity levels in different seasons under quiet and disturbed conditions. The calculations have been made using the authors' semiempirical model (SEM) that provides a general relation of N with thermospheric neutral gas characteristics and solar activity index. The data given in this paper suggest that in most cases the SEM calculations accord well with the experiment (the difference between them is within 10–20 %). Hence the authors assume that the comparison results presented here bear witness to a high degree of universality of the model under discussion.

Введение

В 1997 г. авторами была опубликована полуэмпирическая модель средней ионосферы (ПЭМ) [1], которая дает связь электронной концентрации N с характеристиками термосферы и индексом солнечной активности. Модель разработана для высот 120–200 км, где в дневное время, как правило, выполняется условие фотохимического равновесия. Многочисленные расчеты, проведенные с помощью модели, подтверждают основную идею, заложенную в нее, идею об универсальном характере модели для среднеширотной ионосферы. Естественно, возникает вопрос о рамках применимости такого типа ПЭМ, о степени точности описания реальных значений N . В какой-то мере ответ можно получить из анализа сравнения модельных расчетов с экспериментальными N . В работе [1] кратко были описаны в общей форме результаты сравнения модельных расчетов с экспериментальными данными. Они свидетельствуют о том, что полученные коэффициенты дают возможность использования ПЭМ в широком диапазоне условий, характеризующихся различием в географическом положении, сезоном года, уровнем солнечной активности в спокойных и возмущенных периодах. Однако вопрос о рамках применимости обсуждаемой ПЭМ неоднократно возникал, поскольку обычно проводимые с ее помощью расчеты относятся к условиям, существенно отличающимся от тех, при которых были получены экспериментальные данные по N , использованные для определения коэффициентов уравнения модели. Такие вопросы возникали потому, что ПЭМ – модель регрессионного типа. Однако при этом упускалось из виду, что здесь используется регрессия особого типа. Дело в том, что промежуточным звеном является опора на характеристики термосферы, очень хорошо описываемые в большинстве случаев ее моделью [2]. Конечно, основой построения ПЭМ явилась разработка уравнения, описывающего в общей форме связь N с

параметрами нейтрального газа термосферы и индексом солнечной активности.

Другим обстоятельством, послужившим причиной постановки вопроса о написании настоящей статьи, служит развитие возможностей использования обсуждаемого типа ПЭМ для решения своего рода обратной задачи аэронавтики – оценки характеристик газового состава при использовании ионосферных измерений N [3].

Учитывая вышесказанное, мы решили представить более подробное описание результатов сравнительного анализа расчетов с экспериментом при различных условиях x , чем это было сделано в работе [1].

Для этой цели использованы полученные модельные расчеты в сравнении их с экспериментом по данным $N(h)$ -профилей для разных обсерваторий при разных уровнях солнечной активности. Данные по $N(h)$ -профилям были взяты, в основном, из архивов МЦД-Б2.

Уравнение регрессии в разных версиях ПЭМ

Поскольку упомянутое уравнение описывает связь N с параметрами термосферы в общем виде, то представляется справедливой идея об универсальности разрабатываемых на основе этого уравнения версий ПЭМ. Эти версии могут быть разнообразными, в зависимости от выбора рабочей модели термосферы, характера исходных экспериментальных данных по N , полученных теми или иными методами, а также в зависимости от применения некоторых модификаций уравнения регрессии. Во всех версиях ПЭМ в качестве рабочей используется модель термосферы МСИС-86 [2].

Разные модификации уравнения регрессии связаны с различиями в описании непосредственной зависимости N от индекса солнечной активности. Эта зависимость описывается двояко: во-первых, через зависимость концентраций нейтральных газо-

вых частиц и их температуры от индекса $F_{10.7}$ (эта зависимость определяется моделью термосферы); во-вторых, в уравнение введены члены, учитывающие непосредственную связь N с индексом $F_{10.7}$. Эта часть зависимости N ($F_{10.7}$), которая обусловлена эффектом фотоионизации. В первой версии [1] уравнение имело вид

$$N/N_{av} = X_1 + X_2 [n_1/(5n_2+n_3)]^{1.5} + X_3(n_1/n_3) + 0.5 (\cos\chi)^{0.5} + X_4 \exp[-(T_{ex} - 600)/600] + X_5(F - F_{av}) + X_6(F_{av} - 150) + X_7(F - 150)^2. \quad (1)$$

Здесь N – электронная концентрация; величина N_{av} определяет среднее значение N по всему объему использованных данных отдельно для каждой высоты; F – индекс солнечного излучения, представляющий собою множитель при величине потока радиоизлучения на волне 10.7 см (в единицах 10^{-22} Вт·м⁻² Гц⁻¹); F – ежесуточное значение; F_{av} – значение индекса, осредненного по интервалу 81 день (за три оборота Солнца) с центром в данный день; X_j – искомые коэффициенты уравнения модели; n_1, n_2, n_3 – концентрации частиц атомарного кислорода, молекул кислорода и азота соответственно на 120 км; T_{ex} – температура экзосферы, или асимптотическая температура термосферы; χ – зенитный угол Солнца.

Второй член уравнения (1) описывает зависимость N от атомных и молекулярных газовых частиц, третий член дает зависимость от $\cos\chi$, которая, в свою очередь, зависит от отношения (n_1/n_3) ; четвертый член описывает связь N с T_{ex} . Роль последних трех членов заключается в описании зависимости N от ионизирующего излучения Солнца.

Коэффициенты уравнения (1) были получены при использовании модели термосферы МСИС-86 для определения n_j, T_{ex} . Исходные экспериментальные данные по N получены в Регулярные мировые дни по наблюдениям методом вертикального зондирования ионосферы в 1957–1967 гг. в обсерватории Москва.

В работе [4] представлена версия ПЭМ, основанная на уравнении

$$N/N_{av} = X_1 + X_2 [n_1/(5n_2+n_3)]^{1.5} + X_3(n_1/n_3)^{0.5} (\cos\chi)^{0.5} + X_4 \exp[(T-600)/600] + X_5(E/E_0). \quad (2)$$

Вместо трех последних членов уравнения (1) здесь используется один член $X_5(E/E_0)$, дающий зависимость от относительной величины энергии потока ионизирующего излучения в диапазоне 5–105 нм по модели спектрального распределения интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца [5]. E_0 – величина E при максимуме солнечной активности, когда $F = F_{av} = 250$. Следует отметить, что значения E с помощью указанной модели могут быть вычислены при задании величин F и F_{av} .

Достоинством этой формы является возможность использования соответствующей версии ПЭМ для оценок интегральной интенсивности ионизирующего солнечного излучения в определенных условиях. В работе [4] показано, что использование уравнения (2) в качестве основы ПЭМ дает близкие, отличающиеся на единицы процентов, результаты расчетов N в сравнении с версиями, в которых непосредственная связь N с уровнем солнечной активности

описывается уравнением (1). В настоящее время наиболее общими в смысле охвата всего диапазона изменения солнечной активности являются те версии, в которых коэффициенты уравнения определяются с использованием экспериментальных данных по N , полученных как при очень высокой солнечной активности, когда F_{av} достигали значений, больших 240, так и при минимуме солнечной активности. Для этого были использованы данные по $N(h)$ -профилям, полученным в обсерватории Москва [1] в 1957–1958 гг., в 1964–1965 гг. и в некоторые промежуточные периоды.

Сравнение модельных и экспериментальных значений N

Большой объем модельных расчетов был выполнен с помощью первых версий ПЭМ. В нашем распоряжении имелись данные по $N(h)$ -профилям, полученным из ионограмм для ряда ионосферных обсерваторий, расположенных как в восточном, так и в западном полушариях. Наибольшее количество данных относится к периоду МГТ (Международный геофизический год) и после него – 1957–1960 гг.

Следует отметить, что, в основном, имеет место одинаковая степень согласия N экспериментальных (N_s) и N расчетных (N_p), несмотря на то, что расчеты $N(h)$ -профилей из ионограмм были выполнены разными методами и разными исследователями.

Поскольку расчеты по различным версиям ПЭМ дают практически совпадающие между собой результаты, то проводимый анализ согласованности между N_s и N_p может считаться представительным для типов ПЭМ, упомянутых во втором разделе настоящей статьи.

Рассмотрим вначале расчеты N в сравнении с экспериментальными данными на высоте 200 км, где отмечаются наиболее выраженные суточные и сезонные вариации в связи с изменениями солнечной и магнитной активностей (диапазон высот от 120 до 200 км). Имеются экспериментальные данные за период очень высокой солнечной активности в 1958 г. В табл. 1 приведены суточные вариации расчетных и экспериментальных значений N_{200} для разных месяцев указанного года для обсерватории Вашингтон (Washington) (39° N, 283° E) [6] по среднемесячным данным эксперимента (N_s) и с использованием для расчетов индексов $F_{10.7}$ и $A_p(N_p)$.

Из таблицы видно, что различие между расчетными и экспериментальными N на высоте 200 км в дневные часы составляет единицы процентов. При этом интересно отметить, что значения N_p на высоте 200 км

Таблица 1
Среднемесячные значения N_{200} (10^{10} , м⁻³) по станции Вашингтон, (1958 г.) в сравнении с расчетами

Мес.	N_{LT}	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	F_{av}
Апр.	N_p	25	34	40	45	49	51	53	53	51	48	43	36	26	240
	N_s	17	33	43	54	54	52	52	50	48	45	40	37	18	
Май	N_p	24	31	35	39	43	45	47	47	44	40	34	27	225	
	N_s	22	32	38	42	44	44.5	45	45	43	40	38	32	22	
Июнь	N_p	21	27	31	34	37	40	42	42	41	38	35	30	23	215
	N_s	26	32	38	42	42	44	44	41	40	39	36	30	25	
Авг.	N_p	23	30	35	39	42	45	46	47	45	42	38	32	24	236
	N_s	20	32	41	42	43	44	43	43	42	40	37	32	22	
Дек.	N_p				51	56	58	58	57	54	48				268
	N_s				49	56	60	62	60	51	43				

лучше согласуются с экспериментом, чем на более низких высотах. Это можно видеть и в табл. 2, где представлены высотные изменения N в разные часы местного времени для июля 1958 г. В среднем отклонение N_p от экспериментальных $dN = [(N_p - N_s)/N_s]100\%$ на 200 км в период с 8 до 16 ч LT составило 1 %. В то же время на высотах 120–180 км dN меняется в пределах 6–9 %. Однако в некоторые периоды (начало года, сентябрь, октябрь) отмечались значения N_s , существенно превышающие (на 20–35 %) величины N_p . Можно предположить, что они обусловлены отличием реальных значений параметров термосферы в эти периоды от их модельных значений.

Приведем также данные по обсерватории Эдак (Adak) ($52^\circ N, 183^\circ E$) для периода максимума солнечной активности – июля и августа 1959 г., когда $F_{av}=218$ и $F_{av}=206$, соответственно. В табл. 3 показаны для трех часов LT значения dN (%).

Таблица 2
Высотно-временные изменения величин N_p и N_s ($10^{10}, m^{-3}$) в июле 1958 г. по станции Вашингтон

LT	N	Высота, км				
		120	140	160	180	200
6	N_p	10	12	15	18	22
	N_s	6	9	11	17	20
8	N_p	16	20	25	29	32
	N_s	15	20	25	30	34
10	N_p	19	24	30	35	38
	N_s	21	27	33	36	39
12	N_p	20	25	32	38	42
	N_s	22	30	36	38	40
14	N_p	19	24	30	36	41
	N_s	21	29	35	37	39
16	N_p	16	20	25	30	35
	N_s	18	23	30	34	35
18	N_p	10	12	15	19	24
	N_s	9	11	17	20	26

Таблица 3
Значения dN (%) по обсерватории Эдак (1959 г.)

Высота, км	июль			август		
	LT			LT		
	8	12	16	8	12	16
120	-9	-6	1	-4	-5	2
130	-9	-10	-1	-4	-7	1
140	-11	-10	-2	-6	-9	0
150	-10	-10	-3	-6	-9	0
160	-10	-10	-3	-7	-9	-2
170	-10	-8	-3	-8	-8	-3
180	-12	-8	-5	-11	-9	-6
190	-20	-13	-9	-18	-12	-10
200	-27	-18	-12	-21	-14	-12

Можно отметить большое расхождение расчетов с экспериментом на высотах 190 и 200 км, где сильнее роль содержания атомов кислорода. Может быть, это связано с тем, что в рассматриваемый период на долготе 180° было пониженное в сравнении с моделью МСИС-86 [2] содержание атомарного кислорода.

Продолжая рассмотрение условий при очень высокой солнечной активности, приведем в табл. 4 значения N_p и N_s в период с 6 до 18 ч LT для высот 160 и 180 км в июле 1959 г. для обсерваторий

Таблица 4
Суточные изменения значений N_{160} и N_{180} по станциям Св. Джона и Монмут для июля 1959 г.

H, км	Святой Джон (St. John's)																	
	LT	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
160	N_p	12	18	26	29	30	31	31	30	30	26	22	18	7				
	N_s	10	16	23	26	28	28	30	29	28	26	24	20	10				
180	N_p		26	30	34	34	35	35	34	34	31	28	22	6				
	N_s		22	26	28	32	33	34	34	32	30	27	22	8				
Монмут (Monmouth)																		
160	N_p	14	19	24	29	32	32	32	32	30	27	24	21	9				
	N_s	16	20	24	27	29	30	30	30	30	27	24	21	10				
180	N_p	18	24	29	33	36	37	37	37	34	32	28	12	10				
	N_s	18	24	28	31	34	36	37	37	35	38	29	19	10				

Св. Джона (St. John's) ($48^\circ N, 307^\circ E$) и Форт Монмут (Ft. Monmouth) ($40^\circ N, 286^\circ E$). Из этой таблицы также видно хорошее согласие модельных расчетов с экспериментом как по временному ходу, так и по абсолютным значениям N .

Рассмотрим далее условия, характерные для периода умеренно повышенной и низкой солнечной активности, по экспериментальным N , полученным в обсерватории Слау (Slough) ($51.5^\circ N, 0^\circ E$) в 1950 и 1953 гг. [7]. В табл. 5 приведены величины dN на четырех высотах для 8, 12, и 16 ч LT в июле ($F_{av}=128$) и сентябре ($F_{av}=106$) 1950 г. и в июне ($F_{av}=70$) 1953 г. Можно отметить очень хорошее согласие N_p и N_s летом 1950 г. по данным обсерватории Ватероо (Watheroo) ($30^\circ S, 116^\circ E$), расположенной в Южном полушарии (Австралия). Сравнение приведено в табл. 6.

Таблица 5
Величины dN (%) для станции Слау.

H, км	Июль 1950 г.			Сентябрь 1950 г.			Июнь 1953 г.		
	8 ч LT	12 ч LT	16 ч LT	8 ч LT	12 ч LT	16 ч LT	8 ч LT	12 ч LT	16 ч LT
140	4	0	-1	20	10	15	8	8	6
160	-2	0	-3	20	11	17	0	1	0
180	-7	-3	-5	24	8	8	-8	-1	-4
200	-18	-5	-8	9	1	1	-30	-5	0

Таблица 6
Сравнение расчетных и экспериментальных N ($10^{10}, m^{-3}$) для станции Ватероо в июле 1950 г.

H, км	8 ч LT		12 ч LT		16 ч LT	
	N_p	N_s	N_p	N_s	N_p	N_s
140	16	15	21	21	15	15
160	20	20	26	26	19	19
180	24	24	31	30	23	23
200	28	28	35	33	30	29

Хорошо согласуются N_p с N_s во многие конкретные дни при различной степени геомагнитной возмущенности. В табл. 7 показаны результаты расчетов N_{200} для 18 возмущенных дней в апреле–августе 1960 г. в сравнении с N_s для обсерватории Форт Монмут по работе [8]. Всего рассмотрено 140 случаев. Различия между N_p и N_s в среднем составляет 7 %. В семи случаях это различие превышает 20 %, а в 37 случаях 10 %. Хорошее согласие N_p с N_s в эти дни является подтверждением того, что модель МСИС-86 [2] корректно описывала реакцию газового состава и температуры термосферы на изменение геомагнитной возмущенности.

Существенные различия между N_p и N_s отмечаются почти во все зимние дни 1959 г. по данным

Таблица 7

Отношение N_s/N_p (апрель–август 1960 г., Форт Монмут.

Дата	A_p	9 LT	12 LT	15 LT
29.04	55	0,89	0,68	–
6.05	60	–	0,94	–
7.05	55	1,03	0,96	0,93
11.05	42	0,83	0,89	0,84
5.06	52	0,97	1,06	1,00
7.06	25	1,02	1,00	1,00
9.06	24	1,13	1,00	0,94–
28.06	65	1,04	1,10	–
29.06	36	1,15	1,19	1,10
30.06	36	–	–	1,03
1.07	55	1,09	–	1,07
5.07	20	1,00	0,98	0,98
15.07	40	1,09	–	0,97
18.07	24	–	–	0,99
20.07	35	–	0,99	0,98
21.07	26	1,07	1,18	1,04
17.08	52	1,11	1,05	1,04
18.07	106	–	–	1,00

обсерваторий Эдак и Форт Монмут, когда N_s превышало N_p в 1.2–2 раза. Столь же существенные превышения N_s над N_p наблюдались и в некоторые дни зимних месяцев и вблизи равноденствий. Часто они связаны с «положительными» ионосферными возмущениями. Следует отметить, что сравнение N_p с N_s в такие дни может служить индикатором такого рода возмущений на высотах нижней части области F. Вопрос этот заслуживает особого рассмотрения.

Был также рассмотрен вопрос о том, в какой мере модельные расчеты по версии ПЭМ с «московскими» коэффициентами соответствуют экспериментальным N , полученным в Иркутске, в Институте солнечно-земной физики СО РАН, с помощью цифрового ионозонда. Расчеты проведены для всех дней летних периодов (май–август) 2003–2005 гг., в которые проводились измерения. В среднем, по всему сезонному периоду каждого года получено, что dN в 2003 г. равнялось -4% , а в 2004 и 2005 гг. $dN = 4-5\%$.

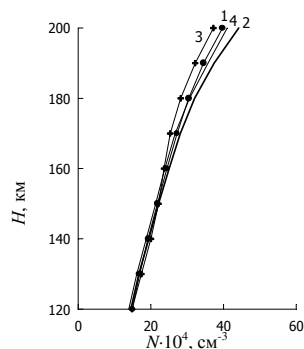
На рисунке приведены высотные профили $N(h)$ по среднемесячным экспериментальным и расчетным значениям N для трех месяцев двух лет. Видно хорошее согласие расчетов с экспериментом во всем рассматриваемом высотном диапазоне.

Заключение

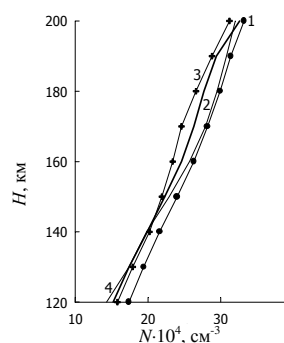
Модельные расчеты электронной концентрации на высотах 120–200 км с помощью развиваемой авторами полуэмпирической модели хорошо согласуются с экспериментальными данными на средних широтах в восточном и западном полушариях. Имеющиеся расхождения обычно лежат в пределах 10% . Выявлены случаи, когда расхождение существенно увеличивается. Это относится к некоторым зимним месяцам и периодов вблизи равноденствий года очень высокой солнечной активности (1959 г.). В случаях выраженных положительных возмущений в течение части освещенного периода суток отмечаются большие различия между величинами N_s и N_p . По-видимому, в эти периоды имеет место заметное отклонение условий от фотохимического равновесия.

Отмеченное хорошее согласие расчетов с экспериментом, наблюдающееся в разные сезоны при раз-

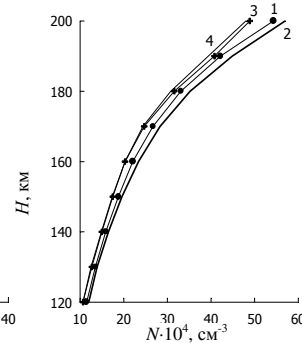
апрель 2003, 2006 гг.



июнь 2003, 2007 гг.



октябрь 2003, 2006 гг.



Высотные профили $N(h)$ для трех месяцев 2003 и 2006 г.: апреля, июня и октября. Эксперимент (кривая 1) – 2003 г. Расчет по модели (кривая 2) – 2003 г. Эксперимент (кривая 3) – 2006 г. Расчет по модели (кривая 4) – 2006 г. Эти обозначения относятся ко всем трем месяцам.

личных условиях солнечной активности и геомагнитной возмущенности, говорит о достаточно высокой прогностической ценности обсуждаемой модели. В целом можно констатировать оптимальную структуру базового уравнения регрессии модели. Отмеченные различия между величинами N_s и N_p в значительной мере могут быть обусловлены отличием газового состава в конкретных условиях от его описания рабочей моделью MSIS-86. При этом согласие расчетов с экспериментом в разнообразных гео- и гелиофизических условиях обязано качествам используемой модели термосферы.

Все изложенное дает основания заключить, что обсуждаемая модель ионосферы может использоваться для оценок отклонений от модельного описания характеристик газового состава в конкретных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. 1987. V. 92, N A5. P. 4649–4662.
- Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Возможности оценок относительного содержания атомов и молекул кислорода по данным измерений электронной концентрации в средней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2008. Т. 48, № 1. С. 1–5.
- Щепкин Л.А., Кушнаренко Г.П., Кузнецова Г.М. Уравнение модели связи электронной концентрации с характеристиками термосферы с учетом потока ионизи-

рующего излучения // Геомagnetизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 1. С. 119–122.

5. 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.

6. Ionospheric Electron Densities for Washington, Panama, Talara and Huancayo // The Pennsylvania State University: Ionosphere Res. Labs. USNC-IGY – Projects № 7–18. 1960. N 6. P. 9.

7. Thomas J.U., Haselgrove J., Robbins A.R. Tables of ionospheric electron density Slough (England). England: Cavendish Laboratory. Dec 1957, ser. B, N 1. 183 p.

8. Shchepkin L.A., Kushnarenko G.P., Freizon I.A. Disturbance effect on electron densities at 200 km // Adv. Space Res. 1997. V. 20, N 9. P. 1713–1715.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск