

## КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ В НЕСКОЛЬКИХ ВЫСОТНЫХ ОБЛАСТЯХ

Е.М. Вдовин, В.И. Сажин, В.А. Голыгин, М.К. Ивельская

## CORRECTION OF THE IONOSPHERE MODEL FOR SOME HEIGHT REGIONS

E.M. Vdovin, V.I. Sazhin, V.A. Golygin, M.K. Ivelskaya

Используемая модель ионосферы допускает возможность уточнения формы профиля  $N(h)$  в областях максимумов слоев E и F2, а также на участке высот, значительно большем высоты максимума. В работе приводятся примеры коррекции модели на текущую ситуацию. Для оценки эффективности коррекции использованы значения ПЭС, измеряемые в системе GPS, и размещаемые в виде карт в сети Интернет.

The model allows us to clarify  $N(h)$  profile in the region of maxima of E and F2 layers, as well as at heights much greater than the maximum height. This paper provides examples of the model correction to the current situation. To assess the effectiveness of the correction, we used TEC values used measured in GPS system. The results are available in Internet as maps.

В настоящее время разработан ряд глобальных ионосферных моделей, достаточно адекватно описывающих среднемесячные вариации высотного профиля электронной концентрации  $N(h)$ . Однако разработка моделей таких вариаций для конкретного дня встречает известные трудности, связанные с большой сложностью ионосферных процессов и многообразием факторов, влияющих на их протекание. Продвинувшись в определенной степени в описании ионосферных условий для распространения декаметровых радиоволн в текущей ситуации позволяет корреляция параметров среднемесячной модели по оперативно получаемой информации. Выполняется уточнение в моделях параметров максимума электронной концентрации, и это приводит к повышению точности описания характеристик распространяющегося в наземном ионосферном радиоканале сигнала [Сажин, 2001; Котович, Михайлов, 2003]. Вместе с тем, для трансionoсферного распространения важно иметь возможность коррекции модели и на участках выше максимума в области верхней ионосферы. Отличия формы профиля  $N(h)$  от среднемесячной для отдельных дней могут быть в этой области весьма значительными [Мальцева и др., 2005; Nouminer, Soicher, 1996]. В настоящей работе реализована среднемесячная модель ионосферы, допускающая возможность коррекции на текущую ситуацию в нескольких высотных областях, в том числе и на верхнем участке. При описании формы профиля  $N(h)$  от максимума и ниже за основу взята модель ПЭМИ [Поляков и др., 1986], хорошо апробированная для наземного распространения. В ПЭМИ заложена возможность уточнения по оперативным данным критических частот слоев E и F2, а также высоты максимума слоя F2. Нами было выполнено дополнение ПЭМИ на участке выше максимума. Форма профиля  $N(h)$  на этом участке задается также аналитически, но с помощью двух, а не одной аппроксимирующих кривых. Параметры кривых и точка их сопряжения определяется на основе использования данных модели IRI2007 [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri07.html]. Первая кривая имеет вид функции Чапмена (1), где  $N_{\max}$  – максимум электронной концентрации,  $h$  – высота,  $h_{\max}$  – высота  $N_{\max}$ . Известный параметр функции Чапмена – шкала высот однородной ионосферы  $H_1(h)$  (2) – не остается при аппроксимации по-

стоянным, а меняется с высотой. В формуле (2)  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура взаимодействующих частиц,  $M_1$  – масса взаимодействующих частиц (в данном случае она равна массе иона кислорода),  $g(h)$  – ускорение свободного падения.

$$N(h) = N_{\max} \exp(1 - z_1 - e^{-z_1}), \quad (1)$$

$$\text{где } z_1 = \frac{h - h_{\max}}{H_1(h)},$$

$$H_1(h) = \frac{kT}{M_1 g(h)}. \quad (2)$$

Вторая кривая представляет собой экспоненциальную зависимость (3), где  $N_{\text{rav}}$  – электронная концентрация на  $h_{\text{rav}}$  – высоте, для которой доминирующее влияние ионов атомарного кислорода сменяется на влияние ионов атомарного водорода. Шкала высот однородной ионосферы  $H_2(h)$  для этой кривой вычисляется по формуле, аналогичной (2), но с подставлением в  $M_1$  массы иона водорода:

$$N(h) = N_{\text{rav}} \exp(-z_2), \quad (3)$$

$$\text{где } z_2 = \frac{h - h_{\text{rav}}}{H_2(h)}$$

Первая кривая описывает форму  $N_e(h)$  от точки  $h_{\max}$  до  $h_{\text{rav}}$ , вторая – от  $h_{\text{rav}}$  до высоты, равной 2000 км. Температура взаимодействующих частиц  $T$  рассчитывается с помощью модели IRI2007. Сшивка ПЭМИ и IRI происходит в точке максимума электронной концентрации путем задания одинаковых значений  $foF2$  и  $H_mF2$ . Проведенная нами для большого массива проверка данных по  $foF2$  с использованием станций вертикального зондирования для средних широт показала, что по точности описания среднемесячных значений  $foF2$  модели ПЭМИ и IRI2007 практически идентичны.

Основной задачей данной работы было определение степени влияния того или иного параметра на изменение ПЭС в нашей модели. Нами были выбраны следующие параметры:  $foE$ ,  $foF2$ ,  $H_mF2$  и  $N_{\text{rav}}$ . Известно что вариации параметров  $foE$ ,  $foF2$  и  $H_mF2$  составляют примерно  $\pm 20\%$  [Голыгин и др., 2003]. Для того чтобы вычислить среднегодовые вариации  $N_{\text{rav}}$ , был построен годовой ход (рис. 1) значений  $N_{\text{rav}}$  для нескольких периодов суток (6:00, 12:00, 18:00, 0:00 LT). При анализе полученных данных было уста-

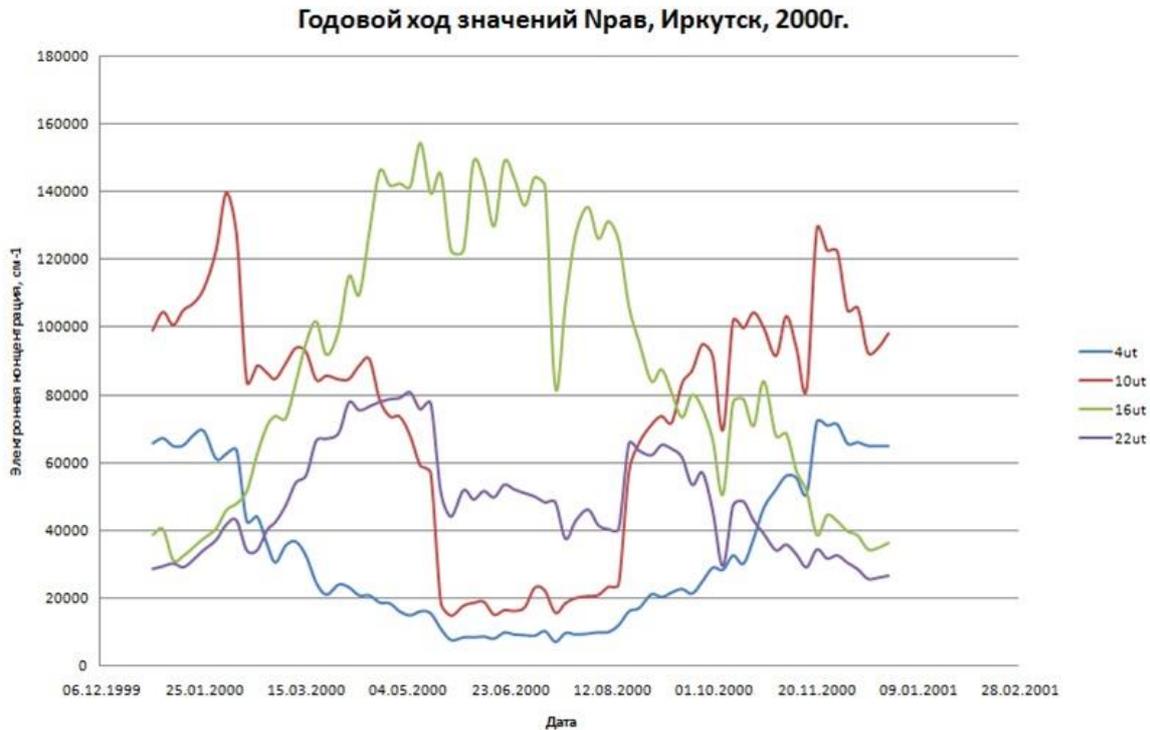


Рис. 1. Годовой ход значений  $N_{\text{рав}}$ .

новлено, что отклонение  $N_{\text{рав}}$  относительно среднего значения составляет  $\pm 36\%$  для 06:00,  $\pm 32\%$  для 12:00,  $\pm 30\%$  для 18:00 и  $\pm 27\%$  для 06:00 LT, что в среднем составляет  $\pm 30\%$ .

Затем нами были оценено влияние каждого из этих параметров на относительное изменение ПЭС. Для этого мы изменяли параметры  $f_oE$ ,  $f_oF2$  и  $H_mF2$  на величину их средних естественных вариаций от  $-20$  до  $+20\%$  с шагом  $5\%$ , а параметр  $N_{\text{рав}}$  от  $-30$  до  $+30\%$  с шагом  $7.5\%$ . Полученные относительные изменения ПЭС показаны на рис. 2. При анализе данных получено, что наибольшее влияние оказывают вариации  $f_oF2$ , степень этого влияния в несколько раз больше степени влияния вариаций  $h_m$  и  $N_{\text{рав}}$  и примерно на порядок превышает степень влияния для  $f_oE$ . Также выявлена следующая зависимость: чем меньше значение параметра  $f_oF2$ , тем большее относительное влияние на значение ПЭС оказывает параметр  $N_{\text{рав}}$ . Это связано с увеличением вклада в ПЭС высотной области вблизи высоты  $h_{\text{рав}}$ . Ниже приведена таблица 1, в которой показаны вклады трех высотных областей в ПЭС в процентном соотношении. Первая высотная область от 0 до  $H_mF2-100$  км – зона влияния  $f_oE$ , вторая зона от  $H_mF2-100$  км до  $H_mF2+100$  км – зона влияния  $f_oF2$  и третья зона от  $H_mF2+100$  км до 2000 км – зона влияния  $N_{\text{рав}}$ .

Проанализировав полученные результаты, мы выбрали два корректирующих параметра –  $f_oF2$  в качестве основного и  $N_{\text{рав}}$  в качестве дополнительного. При выполнении коррекции в реальных ситуациях в модели корректируется величина  $f_oF2$  с помощью подстановки значений, определяемых из данных ВЗ в этом пункте. Если при этом не достигается хорошее согласие расчетных и измеренных значений

Таблица 1

Вклады высотных областей в ПЭС в процентном соотношении (время в LT)

Высота слоя	01.01.2000 г. Иркутск				01.07.2000 г. Иркутск			
	6:00	12:00	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	0:00
От 0 до $H_mF2-100$ км	6 %	4 %	2 %	18 %	9 %	17 %	11 %	4 %
От $H_mF2-100$ км до $H_mF2+100$ км	47 %	58 %	47 %	34 %	65 %	58 %	59 %	50 %
От $H_mF2+100$ км до 2000км	47 %	38 %	51 %	48 %	27 %	25 %	30 %	47 %

ПЭС, коррекция заканчивается. Когда же различия в значениях ПЭС снижаются после коррекции  $f_oF2$ , но остаются при этом еще заметными, выполняется второй этап коррекции – уточнение формы  $N(h)$  на верхнем участке с помощью подбора значения  $N_{\text{рав}}$ .

Для проведения проверки нами были отобраны 17 точек, для которых ПЭМИМ давала плохое совпадение ПЭС с измеряемыми в системе GPS и размещаемыми в виде карт в сети Интернет, а также с величиной  $f_oF2$ , определяемой из данных ВЗ в этом пункте. На первом этапе была проведена коррекция модели по значениям  $f_oF2$ , определяемой из данных ВЗ. Для девяти точек удалось добиться совпадения ПЭС, полученного с помощью ПЭМИМ, и данными карт IONEX лаборатории CODG в пределах погрешности  $10\%$ . Эти данные можно видеть в таблице 2.

Для пяти точек удалось добиться совпадения ПЭС с погрешностью  $10\%$  после второго этапа коррекции с помощью подбора значения  $N_{\text{рав}}$ . Эти данные можно видеть в таблице 3.

Для трех точек не удалось добиться совпадения ПЭС с погрешностью  $10\%$  после второго этапа коррекции, но значения ПЭС, полученные с помощью

Коррекция модели ионосферы в нескольких высотных областях

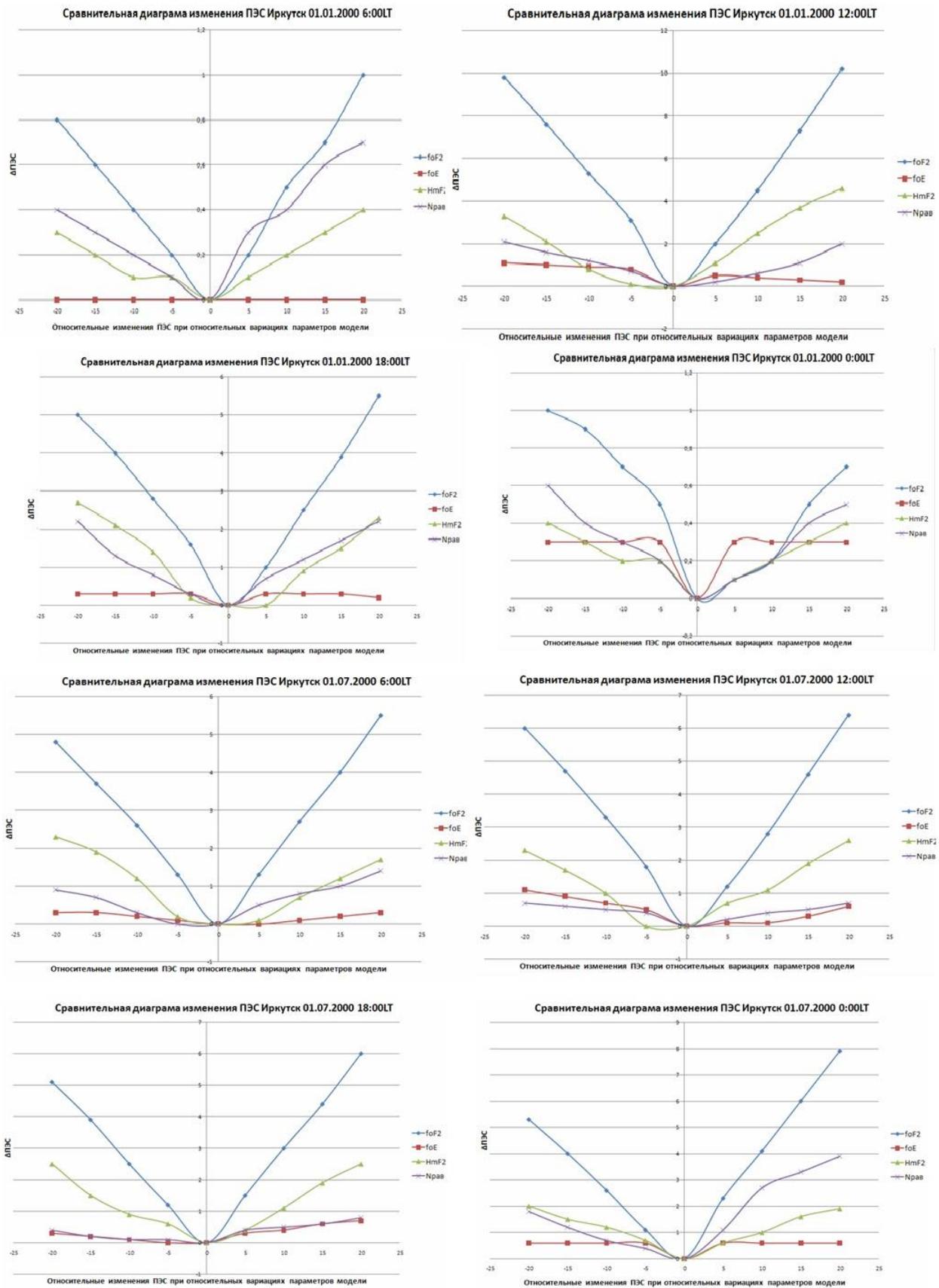


Рис. 2. Относительные изменения ПЭС при относительных вариациях параметров модели.

модели, значительно приблизились к данным карт IONEX. Эти данные можно видеть в таблице 4.

Как показало моделирование, при выполнении

такой дополнительной коррекции удается в ряде случаев улучшить согласие модельных и измеренных значений ПЭС.

Таблица 2

Успешная коррекция на первом этапе

Станция	Дата	LT	$f_oF2$ ПЭМИм	$f_oF2$ ВЗ	ПЭС ПЭМИм	ПЭС ПЭМИм Скор	ПЭС IONEX	Ошибка ТЕС
Новосибирск	15.01.2000	6:00	3.68	2.9	6.1	4.8	5	0.2
Новосибирск	25.01.2000	6:00	3.92	2.2	6.8	3.1	3.1	0
Москва	10.01.2000	0:00	3.31	2.2	5.7	4.3	4.4	0.1
Москва	15.01.2000	12:00	10.49	8.2	37.5	28	28.7	0.7
Новосибирск	05.07.2000	0:00	7.06	7.6	16.4	18.4	18.8	0.4
Иркутск	10.01.2003	8:00	8.51	12.34	21	41.6	41.4	-0.2
Иркутск	05.07.2003	20:00	4.97	5.9	8.5	10.7	10.5	-0.2
Иркутск	10.01.2006	20:00	4.72	5.11	7.4	10.1	10.2	0.1
Иркутск	05.07.2006	8:00	2.73	4.08	3	7.1	6,9	-0.2

Таблица 3

Успешная коррекция на втором этапе

Станция	Дата	LT	$f_oF2$ ПЭМИм	$f_oF2$ ВЗ	ПЭС ПЭМИм	ПЭС ПЭМИм Скор1	Кор-я $N_{rav}$	ПЭС ПЭМИм Скор2	ПЭС IONEX	Ошибка ТЕС
Москва	20.01.2000	18:00	6.71	7.1	14.8	16	+25 %	17	18.6	1.6
Новосибирск	10.07.2000	6:00	7.01	8.1	20.7	25.3	+15 %	25.6	28.4	2.8
Иркутск	20.07.2003	20:00	5.25	4.65	14.1	13.2	-25 %	12.7	11.6	-1.1
Иркутск	05.01.2006	20:00	5.6	4.73	14.2	13.6	-20 %	13.2	12	-1.2
Иркутск	05.07.2006	20:00	3.67	4.58	4.5	7	+15 %	7.4	8.2	0.8

Таблица 4

Недостаточно эффективная коррекция на втором этапе

Станция	Дата	LT	$f_oF2$ ПЭМИм	$f_oF2$ ВЗ	ПЭС ПЭМИм	ПЭС ПЭМИм скор 1	Кор-я $N_{rav}$	ПЭС ПЭМИм скор 2	ПЭС IONEX	Ошибка ТЕС
Новосибирск	20.01.2000	18:00	6.71	7.5	16.3	20.9	+30 %	22.4	25.5	3.1
Новосибирск	20.07.2000	18:00	7.24	8.1	21.1	24.1	+30 %	27.1	31.1	4
Иркутск	25.01.2003	20:00	6.88	5.96	27.1	23.1	-30 %	20.9	18.8	-2.1

Таким образом, предварительные результаты говорят о том, что двухэтапная коррекция в большинстве случаев может обеспечить хорошее согласие полученных с помощью модели и измеряемых текущих значений ПЭС. Естественно, что в дальнейшем необходимо привлечение независимых оперативных данных по значениям  $N_{rav}$  в моменты коррекции для уточнения эффективности ее второго этапа.

Интерес представляет также выяснение геофизических условий ситуаций, когда двухэтапная коррекция недостаточно эффективна.

Работа выполнена при поддержке ФЦП соглашения № 8388.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голыгин В.А., Ивельская М.И., Сажин В.И. и др. Аппроксимация формы профиля электронной концентрации для высот выше максимума в полуэмперической модели ионосферы // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VI сес-

сии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды», Иркутск, ИСЗФ СО РАН. 2003. С. 72–74.

Котович Г.В., Михайлов С.Я. Адаптационные возможности модели IRI в прогнозировании характеристик декаметровых радиотрасс // Геомагнетизм и аэронавигация. 2003. Т. 43, № 1. С. 88–91.

Мальцева О.А., Родионова В.Т., Шлюпкин А.С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала // Там же. 2005. Т. 45, № 4. С. 480–486.

Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмперическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. М.: МЦД-Б, 1986. 136 с.

Сажин В.И. Гибридное моделирование распространения декаметровых радиоволн: автореф. дис. ... д.ф.-м.н. Иркутск: Иркут. ун-т, 2001. 30 с.

Houminer Z., Soicher H. Improved short-term predictions of  $f_oF2$  using GPS time delay measurements // Radio Sci. 1996. V. 31. N 5. P. 1099–1108.

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri07.html>.

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия