

УДК 621.371

МОДЕЛЬ ФОНОВОЙ ИОНОСФЕРЫ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ КОРРЕКЦИИ НА ТЕКУЩУЮ СИТУАЦИЮ В НЕСКОЛЬКИХ ВЫСОТНЫХ ОБЛАСТЯХ

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

A BACKGROUND IONOSPHERE MODEL WITH THE POSSIBILITY OF CORRECTING FOR THE CURRENT SITUATION IN SEVERAL HEIGHT REGIONS

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

Высотный профиль среднемесячных значений электронной концентрации $N(h)$, даваемый моделью, состоит из нескольких участков. В точке максимума и на высотах ниже его для описания $N(h)$ используется полуэмпирическая модель ионосферы, разработанная в ИГУ. Этот участок профиля допускает задание текущих значений критических частот слоев E и F2, а также высоты максимума слоя F2. Участок выше максимума представлен в виде двух сопрягаемых кривых. Первая имеет вид функции Чепмена, в которой шкала высот однородной ионосферы не остается постоянной, а линейно меняется с высотой, рассчитываемой по данным модели IRI-07. Эта кривая описывает форму $N(h)$ до уровня h_{rav} замены доминирующего влияния ионов кислорода на влияние ионов водорода. Вторая кривая описывает форму $N(h)$ от этой высоты до высоты условного окончания ионосферы. Величина N на этой высоте выбрана как среднее значение по вариациям, даваемым моделью IRI-07. Таким образом, для участка $N(h)$ выше максимума в модели существует возможность коррекции значений N на уровне сопряжения двух рассматриваемых кривых. Оценка применимости модели проведена на основе усреднения величин полного электронного содержания (ПЭС), определяемых из данных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) и размещаемых в сети Интернет. Выполненное сравнение показывает, что разработанная модель удовлетворительно описывает средний тренд годовых вариаций ПЭС для отдельных часов и среднемесячные суточные зависимости этой величины в средних широтах.

Given by the model, height profile of the electron density average values $N(h)$ consists of several parts. Developed at ISU semi-empirical ionosphere model is used to describe $N(h)$ at the point of maximum and altitudes below one. This profile part assumes the specifying of current values of critical frequencies of E and F2 regions as well as the height of the maximum F2 region. Area above the maximum is presented in the form of two conjugated curves. The first curve has the form of Chapman function, in which the height scale of homogeneous ionosphere is not constant, and varies linearly with height calculated according to the model of IRI-07. The second curve describes the shape of $N(h)$ from this height to the height of a relative ionosphere ending. The value of N at this height is selected as the average in the variations given by the IRI-07 model. Thus, for the part $N(h)$ above the maximum in the model there is an ability to correct the values of N at the conjugation level of two examined curves. Evaluation the model applicability have been carried out on the base of averaging of the total electron content (TEC) determined from GNSS data and on the Internet. The comparison shows that the developed model describes the average annual trend of TEC variations for single hours.

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. Продвинуться в определенной степени при описании ионосферных условий распространения дециметровых радиоволн в текущей ситуации может позволить корреляция параметров среднемесячной модели по оперативно получаемой информации. Так, 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 [Nominer, Soicher, 1996; Мальцева и др., 2005]. 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 опи-

сании 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. Таким образом, эта возможность сохраняется и в представляемой нами модели. В работе [Голыгин и др., 2003] было выполнено ее дополнение на участке выше максимума $N(h)$ экспоненциальной аппроксимацией. Однако такая аппроксимация не учитывает наличие известного «колена» на участке высот, где доминирующее влияние ионов атомарного кислорода сменяется на влияние ионов атомарного водорода. Кроме того, ход $N(h)$ до этой области высот в ПЭМИ, как показали наши исследования, дает несколько заниженные значения электронной концентрации. Поэтому нами было выполнено другое дополнение ПЭМИ на участке выше максимума. Форма профиля $N(h)$ на этом участке задается также аналитическим образом, но с помощью двух, а не одной аппроксимирующих кривых. Параметры этих кривых и точка их сопряжения определяются на основе данных модели IRI [<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri01.html>]. Первая кривая имеет вид функции Чепмена (1), где N_{max} – максимум электронной концентрации, h – высота, h_{max} – высота N_{max} . Известный параметр функции Чепмена – шкала высот однородной ионосферы – $H_1(h)$ (2) не остается при аппрок-

симации постоянным, 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.

$$N(h) = N_{\max} \exp(1 - z_1 - e^{-z_1}), \text{ где } z_1 = \frac{h - h_{\max}}{H_1(h)}; \quad (1)$$

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

Вторая кривая представляет собой экспоненциальную зависимость (3), где N_{rav} – электронная концентрация на высоте h_{rav} , h_{rav} – высота, 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 подстановкой в M_1 массы иона водорода.

$$N(h) = N_{\text{rav}} \exp(-z_2), \text{ где } z_2 = \frac{h - h_{\text{rav}}}{H_2(h)}. \quad (3)$$

Первая кривая описывает форму $N_e(h)$ от точки h_{\max} , расположенной на высоте N_{\max} , до уровня h_{rav} , вторая – от h_{rav} до высоты 2000 км. Температура взаимодействующих частиц T рассчитывается с помощью модели IRI. Сшивка ПЭМИ и IRI происходит в точке максимума электронной концентрации путем задания одинаковых значений f_0F2 и $h_{\max}F2$. Проведенная нами для большого массива данных проверка по f_0F2 с использованием станций вертикального зондирования для средних широт показала, что по точности описания среднемесячных значений f_0F2 модели ПЭМИ и IRI практически не отличаются. Поэтому в средних широтах параметры максимума можно задавать из ПЭМИ, а во всех других областях земной поверхности брать их значение по модели IRI-01.

Чтобы уменьшить число параметров аппроксимации, нами проведено исследование зависимости $H(h)$ на участках выше максимума для различных гелиофизических условий. Получено, что эту зависимость можно довольно точно описывать прямой линией. На рис. 1 показаны зависимости $H(h)$ в различных условиях (кривые линии), рассчитанные с помощью модели IRI. Там же показаны прямые линии, представляющие собой линейную аппроксимацию этих зависимостей, полученную по методу наименьших квадратов. Можно видеть, что отличия незначительны, так как кривые практически сливаются. Таким образом, в рассматриваемой модели для задания $H(h)$ на участке высот до h_{rav} может быть использована данная линейная аппроксимация. Такое представление, как показали результаты проведенного моделирования, практически не изменяет на этом участке форму $N(h)$ в нашей модели по сравнению с IRI. Для примера на рис. 2 показано сравнение форм $N(h)$ в отдельной ситуации. Во второй экспоненциальной кривой для задания зависимости $H(h)$ используется также прямая линия, на нижнем ее участке для $H(h_{\text{rav}})$ выбирается значение из первой кривой, а на верхнем участке задается на основе

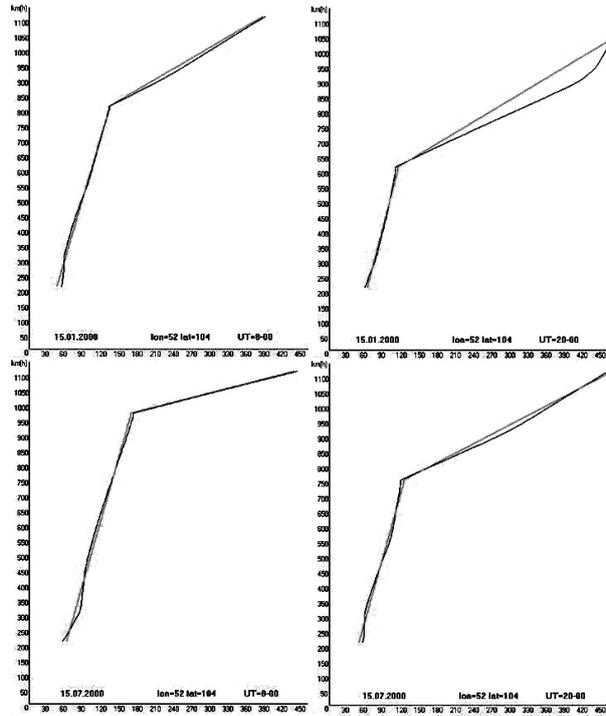


Рис. 1. Аппроксимация зависимости $H(h)$ в различных условиях.

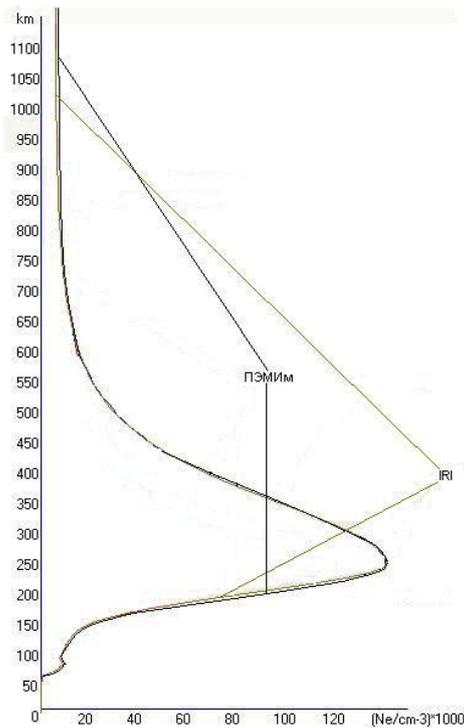


Рис. 2. Сравнение формы профилей $N(h)$ по модели IRI и модифицированной ПЭМИ (ПЭМИм).

проведенного моделирования следующим образом. Высота условного окончания ионосферы выбрана равной 2000 км. Вариации N на этой высоте в различных условиях были проанализированы на основе данных модели IRI-07 [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri07.html]. Для граничных значений диапазонов этих изменений были рассчитаны значения полного электронного содержания (ПЭС). Получено, что данные вариации N незначительно

(в пределах 1.5 %) изменяют значения ПЭС. Поэтому для N на высоте 2000 км выбрана одна средняя величина 3500 эл/см^3 и закреплено значение $H(h)$ на этой высоте. Проверка реализованной таким образом модели (модифицированной ПЭМИ – ПЭМИМ) была выполнена на основе проведения расчетов ПЭС по ней и IRI-01 и сравнения полученных значений с данными измерений ПЭС в спутниковой радионавигационной системе GPS, размещаемыми в сети Интернет (данные карт GIM варианта CODG [Komjathy, Langley, 1996]). На рис. 3, 4 приведены годовые вариации ПЭС в пункте Иркутск для двух закрепленных моментов времени 2003 и 2006 гг. Можно видеть, что наша модель удовлетворительно описывает средний тренд наблюдаемых годовых вариаций ПЭС, существенно превосходит модель IRI-01. Вместе с тем, обращает на себя внимание занижение значений ПЭС в модели для летнего периода, особенно заметное для дневных часов по местному времени. Подобное сравнение, выполненное для средне-

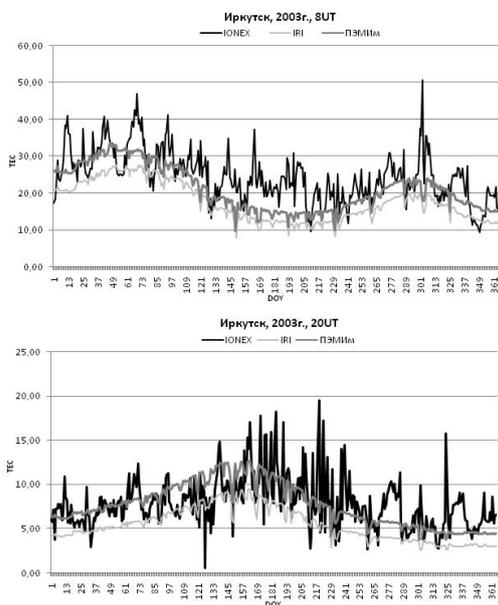


Рис. 3. Годовой ход ПЭС. Иркутск, 2003 г.

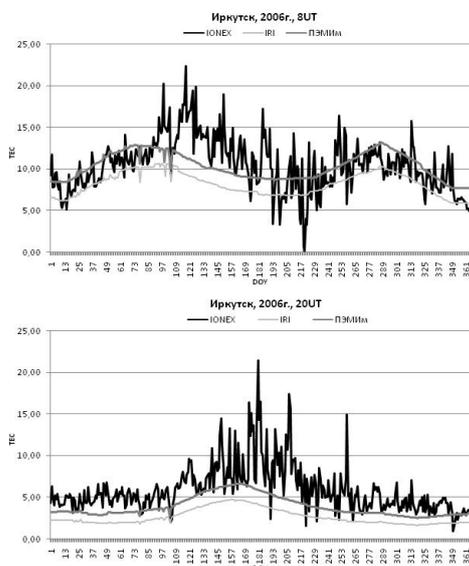


Рис. 4. Годовой ход ПЭС. Иркутск, 2006 г.

месячных суточных зависимостей ПЭС в двух среднелатitudных пунктах – Иркутске и Новосибирске, представленное на рис. 5, 6, также показывает, что в летние месяцы расхождения между модельными и наблюдаемыми величинами ПЭС значительны и увеличиваются для дневных часов.

Можно полагать, что реализованная модель ПЭМИМ удовлетворительно описывает средние вариации ПЭС и поэтому может быть эффективна при

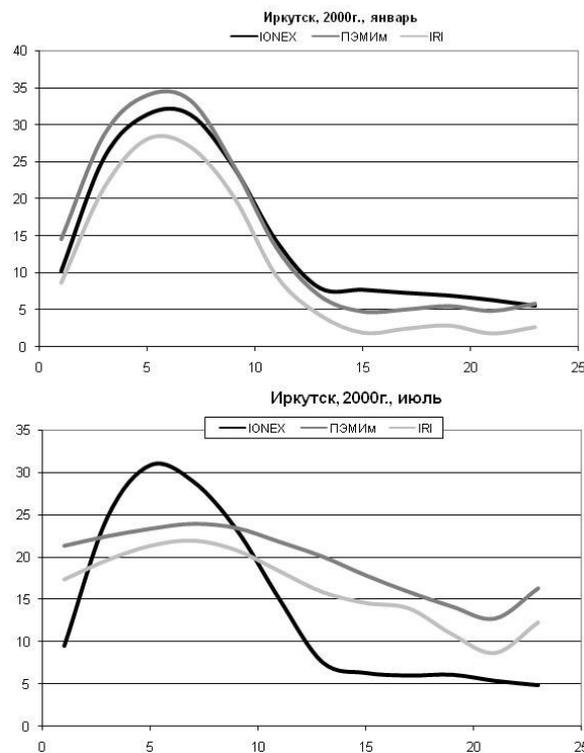


Рис. 5. Среднемесячный суточный ход. Станция Иркутск 2000 г.

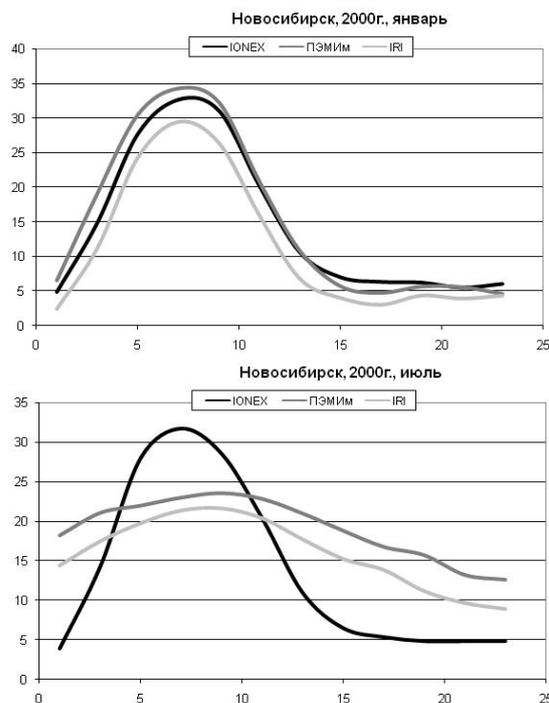


Рис. 6. Среднемесячный суточный ход. станция Новосибирск, 2000 г.

ее уточнении в соответствии с текущей ситуацией. Основным достоинством модели является возможность ее коррекции не только в области максимума и ниже его, но и на верхнем участке выше максимума. Выбор корректирующего параметра для этого участка может быть осуществлен на основе дальнейших исследований влияния вариаций параметров точки сопряжения двух аппроксимирующих $N(h)$ кривых на величину ПЭС.

Авторы признательны Ю.В. Ясюкевичу за помощь в получении данных ПЭС и полезное обсуждении работы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078 федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голыгин В.А., Ивельская М.И., Сажин В.И. и др. Аппроксимация формы профиля электронной концентрации для высот выше максимума в полуэмпирической модели ионосферы // Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды VI сессии молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». Иркутск, 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 // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 4. С. 480–486.

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

Сажин В.И. Гибридное моделирование распространения декаметровых радиоволн: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.И. Сажин. Иркутск: Иркутский государственный университет. 2001. 30 с.

Houminer Z., Soicher H. Improved short-term predictions of f_0F2 using GPS time delay measurements // Radio Sci. 1996. V. 31, N 5. P 1099–1108.

Komjathy A., Langley R.B. Improvement of a global ionospheric model to provide ionospheric range error correction for single-frequency // Presented at the ION 52nd Annual Meeting, Cambridge, MA, 19–21 June, 1996. P. 1–10.

<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/ionos/iri01.html>.

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

Иркутский государственный университет, Иркутск