



Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой

И. Г. Захаров, М. В. Ляшенко¹

*Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина,
Украина, 61077, г. Харьков, пл. Свободы, 4,
E-mail: Ivan.G.Zakharov@univer.kharkov.ua*

*¹Институт ионосферы НАН и МОН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 16,
E-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 7 февраля 2003 г.

Проведено сравнение значений полного электронного содержания в ионосфере, полученных по измерениям сигналов спутников в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина и значений, рассчитанных по глобальным эмпирическим ионосферным моделям. Показано, что рассмотренные модели недостаточно точно отражают пространственно-временное распределение параметров ионосферы над Восточной Европой. Для анализа состояния ионосферы использованы данные Харьковского радара некогерентного рассеяния. Рассмотрены факторы, в наибольшей степени влияющие на точность моделей ионосферы, и возможные пути их учета.

Проведено порівняння значень повного електронного вмісту в іоносфері, отриманих за вимірами сигналів супутників у Радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна і значень, розрахованих за глобальними емпіричними іоносферними моделями. Показано, що розглянуті моделі не досить точно відображають просторово-часовий розподіл параметрів іоносфери над Східною Європою. Для аналізу стану іоносфери використано дані Харківського радара некогерентного розсіювання. Розглянуто фактори, що впливають найбільшою мірою на точність моделей іоносфери, і можливі шляхи їх урахування.

Введение

В настоящее время построение моделей ионосферы является одной из основных задач исследования околоземной космической плазмы. Наиболее часто используют эмпирические глобальные модели [1].

Несмотря на достигнутый прогресс в области моделирования состояния ионосферы, проблема повышения точности моделей оста-

ется актуальной. Ее решению посвящено большое число публикаций, в том числе с использованием данных N_0 – полного электронного содержания (ПЭС). Так, в работах [2, 3] сравнивались среднемесячные медианные значения ПЭС, полученные экспериментально по регистрациям сигналов спутниковых радиомаяков, и данные, рассчитанные по Международной справочной модели ионосферы – IRI (International Reference Ionosphere) – од-

ной из наиболее известных глобальных эмпирических моделей. Модель позволяет для заданных координат, времени суток и года рассчитывать по измеренному или прогнозируемому индексу солнечной активности электронную концентрацию ионосферы N в интервале высот $65 \div 1000$ км, т. е. практически во всей толще ионосферы. Значения ПЭС получают интегрированием N по высоте. Показано, что прогноз ПЭС по модели IRI занижен для летних месяцев при высокой и низкой солнечной активности. Для зимы в период высокой солнечной активности прогнозируемая величина ПЭС завышена по сравнению с экспериментом. Также показано, что IRI неверно отражает суточные вариации ПЭС для зимних месяцев.

Однако многие авторы ограничиваются констатацией сходства или различия экспериментальных и модельных значений исследуемых параметров, не уделяя внимания поиску оптимальных путей совершенствования ионосферных моделей.

Не отрицая важности создания и совершенствования глобальных моделей [4], в некоторых работах (см., например, [5, 6]) отмечают важную роль региональных моделей. Учитывая выводы [4, 7] о том, что вариации N подобны на расстояниях до ~ 1000 км (за исключением высокоширотной ионосферы), для создания региональной модели могут быть использованы продолжительные наблюдения в одном пункте. Последние, представляя самостоятельный интерес для решения практических задач в заданном регионе, могут оказаться полезными для корректировки глобальных моделей.

Целью настоящей работы является поиск причин расхождения экспериментальных и модельных значений ПЭС над территорией Восточной Европы и возможных путей их устранения.

Методика

Измерения полного электронного содержания проведены в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (49.7° с. ш.; 36.6° в. д.) с использованием измерительного комплекса

АДК-2 методом эффекта Доплера [8]. Регистрировались сигналы с интервалом 2 с на частотах 150 и 400 МГц от искусственного спутника Земли (ИСЗ) с полярной орбитой, близкой к круговой, на высотах ~ 1000 км. Орбитальные данные рассчитывались по прямоугольным координатам, которые передаются каждые 3 мин с ИСЗ. Расчет ПЭС по исходным значениям доплеровского смещения частоты выполнен по методике [9], которая, как было показано ранее [10], дает более высокую точность расчета N_0 по сравнению с другими методиками – погрешность не превышает $15 \div 20\%$ даже при наличии в ионосфере квазиволновых возмущений. Условия, снижающие точность расчетов (углы возвышения спутников на параметре менее 45 градусов), из рассмотрения исключались. Проведена обработка данных за 37 дней (от 1 до 5 регистраций в день, ночные условия не рассматривались) в период с июня 1998 по ноябрь 1999 гг. Данные разделены на два сезона: зима (ноябрь-февраль) и лето (июнь-сентябрь). 28 дней приходятся на магнитоспокойные условия, в остальные дни имели место умеренные магнитные бури (МБ). Широтные вариации ПЭС рассчитаны в интервале $40 \div 60^\circ$ с. ш.

Значения ПЭС, полученные в эксперименте, сравнивались со значениями, рассчитанными по моделям ГОСТ 25645.146-89 (модель глобального распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов) [11], IRI-90 [12] и IRI-2000 [13]. Модель ГОСТ, в целом, аналогична Международной справочной модели IRI, но в ней шире представлены результаты ионосферных измерений на территории бывшего СССР, что позволяет оценить возможное влияние исходного банка данных на точность расчета ионосферных параметров. Использование двух модификаций модели IRI позволяет оценить прогресс в ионосферном моделировании.

В нашей работе использованы данные некогерентного рассеяния (НР) для 5 временных интервалов, в течение которых имел место переход от спокойных к магнитовозмущенным условиям, полученные в 1997-1999 гг. с помощью Харьковского радара некогерентного рас-

сеяния Института ионосферы НАН и МОН Украины (49.6° с. ш.; 36.3° в. д.) [14], а также результаты комплексных измерений [15] и данные мировой сети ионозондов.

Результаты и обсуждение

Сравнение широтных зависимостей ПЭС, полученных в эксперименте и рассчитанных по моделям, показало, что рассмотренные модели не всегда верно отражают реальное широтное изменение N_0 . Так, среднее значение N_0 зимой в околополуденные часы составило $17.1 \pm 5.9 \text{ м}^{-2}$ по экспериментальным данным и $32.5 \pm 9.4 \text{ м}^{-2}$ по модели ГОСТ, летом соответственно $13.7 \pm 4.5 \text{ м}^{-2}$ и $21.3 \pm 5.1 \text{ м}^{-2}$. Таким образом, погрешность расчета для зимы ~90 %, для лета ~55 %. Для обеих модификаций модели IRI погрешность расчета ПЭС еще выше. Отметим, что по точности совпадения с экспериментом модель IRI-2000 не имеет преимуществ по сравнению с более ранней версией. В конкретных геофизических условиях модельные расчеты существенно зависят от исходного набора данных. Соответственно, точность модели определяется в основном объемом данных, полученных в рассматриваемом регионе.

Несмотря на существенное различие значений ПЭС, рассчитанных по трем моделям, разброс модельных значений электронной концентрации в максимуме слоя F2 в большинстве случаев составляет ~10 %. Исходя из того, что основной вклад в ПЭС (не менее 2/3) вносит электронная концентрация выше максимума области F2, можно сделать вывод, что погрешность N_0 определяется, в основном, погрешностью расчета N на больших высотах, что согласуется с ранее полученными результатами [5]. Для повышения точности профилей $N(h)$ в восточноевропейском регионе наиболее эффективным будет использование радара HP [14], позволяющего получать ионосферные параметры до высот ~1500 км.

Из анализа широтных зависимостей ПЭС следует также, что погрешность для зимних условий примерно в два раза выше, чем для летних, причем не только в периоды МБ, но и в спокойных условиях. Можно допустить, что

в дневное время зимой возможна быстрая смена физических условий в области F2, приводящая к значительному разбросу мгновенных значений ПЭС относительно медианных.

Таким образом, глобальные модели не всегда адекватно отражают региональные особенности распределения параметров ионосферы. Исходя из этого, одной из первостепенных задач является анализ факторов, влияющих на точность современных моделей ионосферы, а также поиск путей их учета.

Можно выделить три группы факторов, определяющих погрешность ионосферных моделей. Первая группа влияет на фоновые (медианные) значения N ($\langle N \rangle$) и других параметров. Вторая и третья группы факторов определяют отклонение N от их медианных значений ($\Delta N = N - \langle N \rangle$) под воздействием текущих геофизических условий и вследствие случайных флуктуаций соответственно. Последние не могут быть учтены на основе детерминированного подхода и, таким образом, устанавливают предел точности ионосферных моделей.

Если первая группа факторов исследована достаточно полно, то соотношение роли текущих геофизических условий и случайных флуктуаций рассматривалось недостаточно. При преобладании роли текущих геофизических условий точность моделей можно повысить за счет дополнительного исследования вариаций N в этих условиях. В противном случае для дальнейшего совершенствования ионосферных моделей необходимо сосредоточиться на моделировании медианных значений N .

Так как данных, полученных в исследуемом регионе, оказалось недостаточно (необходимы длительные ряды ежедневных наблюдений), для оценки вклада в ΔN геофизических условий и случайных флуктуаций воспользуемся данными для другого среднеширотного региона (Северная Америка) [15]. В качестве примера вариаций конкретных геофизических условий выбраны МБ, которые считаются основным источником возмущения вариаций параметров ионосферы [16].

По данным [15] рассчитана разность между медианными и мгновенными значениями ПЭС σ_{N_L} и критической частоты области F2

ионосферы σ_{f_0F2} для трех случаев: без разделения условий на спокойные и возмущенные (а), в периоды, когда в течение длительного времени сохранялись спокойные (б) или магнитовозмущенные (в) условия. В первом случае в качестве медианы использована месячная медиана, в двух других медианные значения определялись отдельно по данным для спокойных и возмущенных периодов. В предположении, что та или иная модель точно отражает медианные значения ионосферного параметра (учтены факторы первой группы), величина σ определяет погрешность модельного расчета мгновенных значений ионосферных параметров.

В таблице приведены типичные значения погрешности расчета ПЭС в наклонном столбе (N_L) и f_0F2 для станций Boulder и Bozeman [15] для указанных случаев (а-в) по данным за август 1974 г. Первая колонка отражает точность моделей медианных параметров (большинство существующих моделей), вторая и третья – точность моделей при верном отображении вариаций ионосферных параметров в конкретных геофизических условиях. Видно, что при правильном учете конкретных условий точность расчета по модели может быть значительно повышена – примерно в 2 раза, – причем в равной мере в спокойных и возмущенных условиях.

Сравнимые значения погрешности во второй и третьей колонке указывают на то, что даже в условиях, которые принято считать спокойными, в ионосфере происходят процессы, значительно влияющие на электронную кон-

центрацию и другие параметры. Согласно данным НР, это могут быть волновые процессы с временными масштабами от 2 до 6 часов и амплитудой $\sim 20\%$ по отношению к фоновому значению f_0F2 , которые охватывают все ионосферные высоты и, вероятнее всего, представляют собой термосферные приливные моды высокого порядка [17].

Сложный характер процессов в ионосфере в спокойных условиях, в том числе накануне МБ, может в значительной мере повлиять на развитие ионосферного возмущения после начала МБ. Исходя из этого, вместо анализа магнитной бури как изолированного события (такой подход является наиболее распространенным), необходим учет состояния ионосферы в предшествующие дни. Проиллюстрируем целесообразность такого подхода на примере ситуаций, которые достаточно часто реализуются в ионосфере.

1. Рассматривались ионосферные возмущения после начала сходных по амплитуде МБ на фоне минимальных и максимальных значений индексов солнечной активности (СА) в течение 27-суточного оборота Солнца вокруг своей оси. Несмотря на небольшое различие уровней СА и, соответственно, интенсивности ионизирующего излучения ($4 \div 8\%$), амплитуды положительной фазы рассмотренных ионосферных бурь различаются на $30 \div 40\%$ как по данным о ПЭС, так и по данным о критической частоте области F2 [18].

2. Продолжительное сохранение очень спокойных условий в ионосфере (не менее 4 суток) также способствует более выраженному проявлению в ионосфере эффектов МБ. Ана-

Таблица. Погрешность ПЭС и критической частоты для произвольных, спокойных и возмущенных условий в процентах

Время суток	Все данные			Спокойные условия $A_p < 8$			Возмущенные условия $A_p > 20$		
	σ_{f_0F2}	σ_{N_L}		σ_{f_0F2}	σ_{N_L}		σ_{f_0F2}	σ_{N_L}	
		Boulder	Bozeman		Boulder	Bozeman		Boulder	Bozeman
День	14.5	14.9	16.8	7.4	10.6	6.2	7.2	8.9	6.8
Ночь	17.0	38.5	42.6	7.6	16.1	19.4	9.2	18.3	19.3

лиз данных радара НР показал [17], что в этом случае даже слабые МБ (максимальные значения трехчасового геомагнитного индекса $a_p \leq 27$) приводят к значительному и продолжительному увеличению электронной концентрации, более характерному для периодов сильных МБ. На рис. 1, а приведен пример подобных изменений, наблюдавшихся в феврале 1999 г.

Одной из возможных причин особенностей ионосферного возмущения после очень спокойных условий могут быть различия динамического режима термосферы. На рис. 1, б, в представлены фоновые (в отсутствие МБ) суточные вариации меридиональной составляющей скорости ветра [19] и изменения коэффициентов корреляции между критической частотой f_0F2 и индексами солнечной $F_{0.7}(r_F)$ и геомагнитной $A_p(r_{A_p})$ активности в разное время суток зимой 1974-1975 гг. Данные для ветра являются результатом теоретического расчета [19], отражающего типичные изменения термосферного ветра зимой. Расчеты коэффициентов корреляции выполнены по данным ионозонда (станция Москва) без разделения условий в ионосфере на спокойные и возмущенные. Подобие кривых скорости термосферного ветра и коэффициентов корреляции можно рассматривать как свидетельство того, что термосферные ветры непрерывно “контролируют” отклик области F2 ионосферы на изменения солнечной и геомагнитной активности. Аналогичные результаты получены и по данным в другие зимы с 1972 по 1984 гг.

В случае если повышенный уровень геомагнитной активности и связанный с ним тип термосферной циркуляции сохраняется продолжительное время, возможны заметные изменения не только мгновенных, но и медианных значений ионосферных параметров. В частности, это может привести к заметному различию ПЭС и f_0F2 на разных фазах 11-летнего солнечного цикла [20, 21].

3. Причиной значительных флуктуаций ПЭС и критической частоты слоя F2 ионосферы ото дня ко дню могут быть планетарные волны. Из примера, представленного на рис. 2,

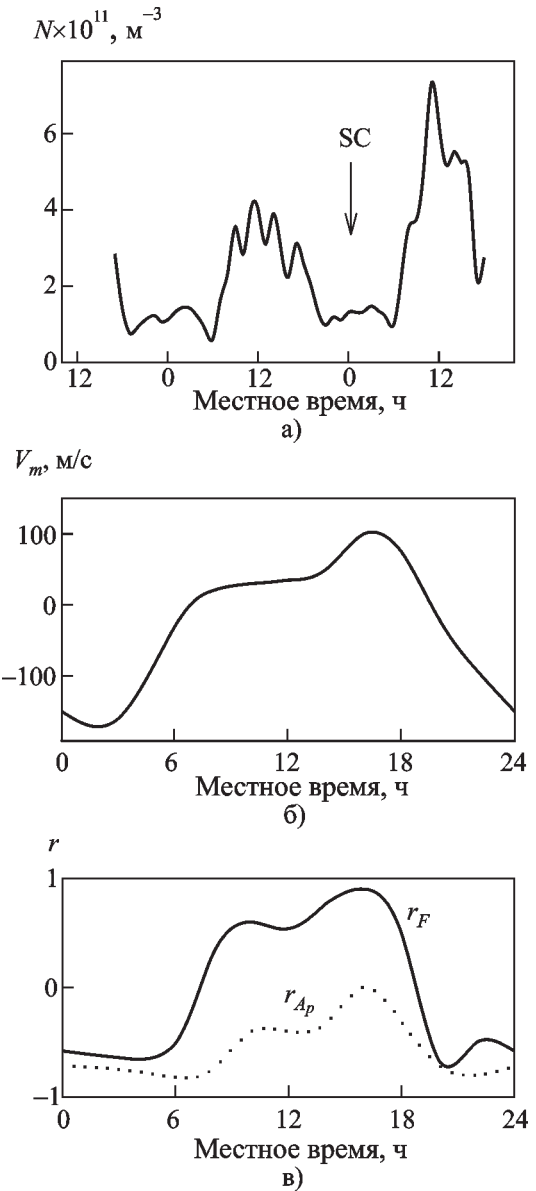


Рис. 1. а) Изменение электронной концентрации в период слабой МБ 10-11 февраля 1999 г. после продолжительного сохранения очень спокойных условий [17]; б) суточные вариации меридиональной составляющей скорости термосферного ветра [19]; в) суточные вариации коэффициентов корреляции между f_0F2 и индексами солнечной и геомагнитной активности, зима 1974-1975 гг.

видно, что в течение нескольких недель в ионосфере присутствуют значительные флуктуации электронной плотности с временным масштабом ~ 7 суток, которые не связаны од-

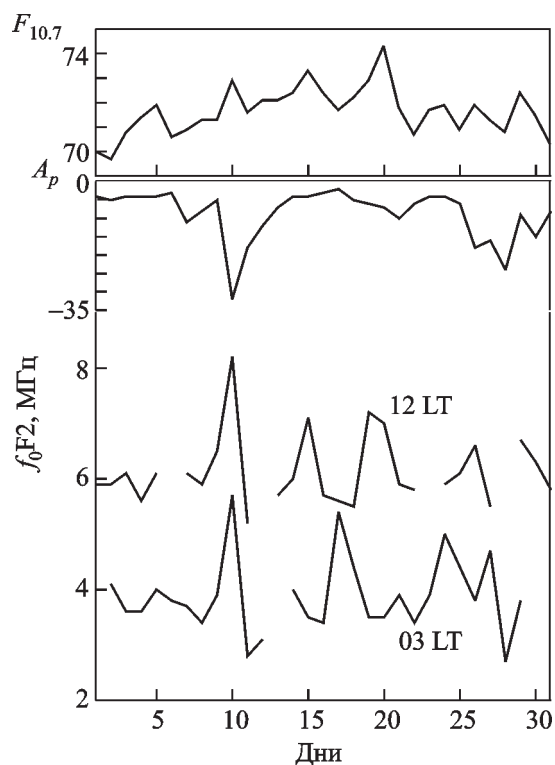


Рис. 2. Изменения критической частоты области F2 ионосферы над станцией Eglin (30° с. ш.; 86° з. д.) в январе 1997 года в 03 и 12 часов местного времени (LT)

нозначно с изменениями солнечной геомагнитной активности. Исходя из временного масштаба и смещения во времени положения максимумов, на основе теории волн в атмосфере [22] можно допустить, что наблюдаемые изменения обусловлены волнами Россби – одной из разновидностей планетарных волн. Сравнение вариаций f_0F2 при наличии в них выраженных эффектов планетарных волн с данными о солнечном ветре показало, что фаза планетарных волн изменяется неслучайным образом и тесно привязана к границам секторов межпланетного магнитного поля.

Во всех рассмотренных случаях редкие МБ любой интенсивности не препятствовали продолжительному сохранению планетарных волн в ионосфере, тогда как частые возмущения, даже слабые, приводили к их разрушению.

Таким образом, изменение ионосферных

параметров при наличии в атмосфере планетарных волн не укладывается в простую схему “воздействие – отклик” и требует комплексного подхода к анализу и выделению геофизических условий, для которых осуществляется расчет или прогноз по ионосферным моделям. С другой стороны, наличие определенных закономерностей в развитии рассмотренных процессов (как планетарных волн, так и др.) дает основания для разработки алгоритма их адекватного учета в ионосферных моделях и снижения погрешности расчета по моделям до уровня, определяемого случайными флуктуациями ионосферных параметров. Очевидно также, что достаточно полное описание вариаций ионосферных параметров возможно только с учетом региональных особенностей состояния ионосферы.

Заключение

Сопоставление экспериментальных и модельных данных показало, что глобальные модели не всегда верно отражают пространственно-временное распределение параметров ионосферы над конкретным регионом и в конкретных гелио- и геофизических условиях. Погрешность определения ПЭС по моделям может превышать 70 %, что снижает эффективность их использования при расчетах условий распространения радиоволн и решении других прикладных задач. Одним из возможных способов повышения точности является развитие региональных моделей ионосферы, являющихся составной частью глобальных моделей.

Показано, что в сходных геофизических условиях случайные флуктуации электронной концентрации в области F2, как правило, не превышают 10 ÷ 15 %, так что при правильном прогнозе геофизической обстановки точность модельных расчетов параметров ионосферы можно увеличить примерно в два раза. Одним из важных путей повышения точности прогноза вариаций ионосферных параметров может быть учет состояния ионосферы до начала возмущения. Физическим фактором, обуславливающим различное развитие ионосферного возмущения для

сходных МБ, может быть различие динамического режима термосферы на высотах области F2.

Из проведенного анализа следует, что в большинстве случаев подход к анализу и моделированию ионосферных параметров на основе деления условий в ионосфере на спокойные и возмущенные (по текущему уровню магнитной активности) является недостаточным и не отражает всей полноты физических процессов в ионосфере. Более адекватным и доступным для практической реализации может оказаться использование в моделях, кроме индекса SA, дополнительного входного параметра (индекс геомагнитной активности), причем не только в текущий, но и в предшествующие дни, что позволит одновременно учесть текущие и фоновые условия в ионосфере.

Литература

1. Ю. К. Часовитин, С. Е. Иванова, В. В. Максимова, Т. Н. Сыкилинда. Ионосферные исследования. 1987, №42, с. 38-51.
2. L. F. McNamara. *Adv. Space Res.* 1985, **5**, No. 7, pp. 81-90.
3. L. F. McNamara, P. J. Wilkinson. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1983, **45**, No. 2/3, pp. 169-174.
4. Г. С. Иванов-Холодный, А. В. Михайлов. Прогнозирование состояния ионосферы. Ленинград, Гидрометеиздат, 1980, 190 с.
5. Н. А. Коченова, Х. С. Гонсалес, Б. Лазо, Л. Лоис, Б. Мелендес, Х. Хиль. Геомагнетизм и аэрономия. 1990, **30**, №4, с. 620-623.
6. D. Kailiang, M. Jinming. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1994, **3**, pp. 417-422.
7. H. Soicher, J. A. Klobuchar, P. H. Doherty. *Radio Sci.* 1984, **19**, No. 3, pp. 757-764.
8. М. А. Колосов, Н. А. Арманд, О. Н. Яковлев. Распространение радиоволн при космической связи. Москва, Связь, 1969, 155 с.
9. Tuhi Ram Tyagi. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1974, **86**, pp. 1157-1164.
10. В. А. Мисюра, В. М. Мигунов, О. Ф. Тырнов, В. М. Трубицын. Космические исследования на Украине. Киев, Наукова думка, 1979, вып. 13, с. 75-83.
11. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. ГОСТ 25645.146-89. Москва, Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990, ч.1-3, 656 с.
12. D. Bilitza. *International Reference Ionosphere 1990*, National Space Science Data Center, NSSDC/WDC-A-R&S 90-20, Greenbelt, Maryland, 1990.
13. D. Bilitza. *International Reference Ionosphere 2000*, *Radio Science*. 2001, **36**, No. 2, pp. 261-275.
14. В. И. Таран. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. 1999, вып. 31, с. 3-9.
15. K. Davies, W. Degenhardt, G. K. Hartmann, R. Leitinger. *Max-Planck Institut fur Aeronomie*. 1977.
16. M. J. Buonsanto. *Ionospheric Storms – A Review*. *Space Science Reviews*. 1999, **88**, pp. 563-601.
17. И. Г. Захаров, О. Л. Мозговая, В. И. Таран, О. Ф. Тырнов. 2-я Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям. Кацивели, Крым, 21-27 сент. 2002. Тезисы докладов. Киев, 2002.
18. О. Ф. Тырнов, И. Г. Захаров. XXVIIth General Assembly of the URSI, Maastricht, the Netherlands, 17-24 Aug, 2002, Commission G, Abstracts GP2, p. 136.
19. J. E. Titheridge, M. J. Buonsanto. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1983, **45**, No. 19, pp. 683-696.
20. И. Г. Захаров, О. Ф. Тырнов. Геомагнетизм и аэрономия. 1986, **26**, №5, с. 847-849.
21. Е. И. Григоренко. Ионосфера. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. 1991, вып. 1, с. 16-24.
22. Э. Э. Госсард, У. Х. Хук. Волны в атмосфере. Москва, Мир, 1978, 532 с.

Comparison of Experimental and Model Values of Total Electron Content in Ionosphere over Eastern Europe

I. G. Zakharov, M. V. Lyashenko

The total electron content in the ionosphere obtained from the measurements of satellite signals at the Radiophysical Observatory of the Kharkiv National V. Karazin University is compared with the values calculated within the framework of global empirical ionospheric models. It is shown that the models under consideration reflect insufficiently the spatial and temporal variations of ionospheric parameters above territory of the East Europe. For an analysis of state of the ionosphere the data of the Kharkiv incoherent scatter radar are used. The factors that mainly influence the accuracy of the models and possible ways of taking them into account are considered.