

УДК 621.391.81

## ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩИХ МНОЖИТЕЛЕЙ В РАСЧЕТАХ ПЭС ПО МОДЕЛИ IRI 2007

© 2011 г. О. А. Мальцева, Г. А. Жбанков, Т. В. Никитенко

Научно-исследовательский институт Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону  
e-mail: mal@ip.rsu.ru

Поступила в редакцию 02.07.2009 г.  
После доработки 18.10.2010 г.

Сравнение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, рассчитанного при разных корректирующих множителях модели IRI2007, с экспериментальными данными показывает, что, не являясь эмпирической по параметру ПЭС, она не совсем адекватно отражает как количественные, так и качественные особенности поведения ПЭС. Ситуация может быть улучшена при использовании новых эмпирических моделей критической частоты, эквивалентной толщины ионосферы, новых методов определения ПЭС.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Полное электронное содержание (ПЭС) (или более употребительная аббревиатура *TEC*, от английского the Total Electron Content) является ключевым параметром для многих практических приложений: от систем позиционирования, навигации, современных радиоастрономических систем до исследования воздействия факторов космической погоды на окружающую среду. При решении задач, возникающих в этих приложениях, необходима эмпирическая модель ПЭС (*TEC*), однако такой модели не существует [Mendillo, 2006]. Привлекательным казался вариант использования Международной модели ионосферы (IRI) [Bilitza, 2001] в качестве модели ПЭС. Однако модель IRI не является эмпирической по параметру ПЭС в отличие от ее основных параметров  $foF2$ ,  $hmF2$ ,  $M3000F2$ ,  $N(h)$ -профиль. Модели для этих параметров получены путем статистической обработки огромных массивов данных и их аналитической аппроксимации. Значения ПЭС в модели IRI получаются в результате расчетов по формуле  $TEC = \int N_e dh$ , поэтому были необходимы сравнения модельных значений с экспериментальными. Огромное количество таких сравнений было выполнено для версии модели IRI2001, и они показали большие расхождения. Анализ сравнений привел к выводу, что основной причиной расхождений является форма  $N(h)$ -профиля. Подтверждение этому факту можно найти в форме теоретических  $N(h)$ -профилей из работы [Stankov et al., 2003], соответствующих экспериментам, и в сравнении спутниковых  $N(h)$ -профилей с модельными (например, [Uemoto et al., 2007]), где показано существенное превышение модельных значений над экспериментальными. В работе [Bilitza, 2009] указывается, что это превышение может быть троекратным на высоте 1000 км над уровнем

максимума слоя  $hmF2$ . В качестве возможных причин приведены две: 1) ограниченное количество спутниковых данных, использованных для построения модели  $N(h)$ -профиля внешней ионосферы; 2) ошибки аппроксимации экспериментальных данных. В течение нескольких лет группами разработчиков модели были предприняты усилия для улучшения модели [Bilitza и др., 2006], которые привели к введению 2-х новых опций для модели  $N(h)$ -профиля внешней ионосферы в последней версии модели IRI2007 [Bilitza and Reinisch, 2008]. Первая опция – это корректирующий множитель для внешнего  $N(h)$ -профиля модели IRI2001, представленный в работе [Bilitza, 2004], полученный на основе более 150000  $N(h)$ -профилей, измеренных на ИСЗ Alouette-1, 2 и ISIS-1, 2, и описывающий вариации с высотой, модифицированной дипольной широтой, локальным временем. Вторая опция – это NeQuick – модель  $N(h)$ -профиля внешней ионосферы, разработанная [Radicella et al., 2001] и основанная на данных вертикального и спутникового зондирования. Эта модель использует функцию слоя Эпштейна с толщиной, изменяющейся по высоте. Новые опции обозначены в работе [Bilitza, 2009] как IRI2007-*corr* и IRI2007-NeQ. Первые результаты сравнения значений ПЭС для всех опций модели IRI показали существенное улучшение соответствия модельных ПЭС экспериментальным значениям [Мальцева и др., 2008а]. Сравнения, проведенные в работе [Мальцева и др., 2008б], показали, что такое улучшение может быть достигнуто не всегда. По результатам этого сравнения предложено использовать эмпирическую модель эквивалентной толщины  $t$  ионосферы для улучшения соответствия с экспериментом. Для оценки эффективности такого использования выбран набор эмпирических значений эквивалентной толщины  $t$  для европейской зоны [Kouris et al., 2008]. Все это свидетельствует о необ-

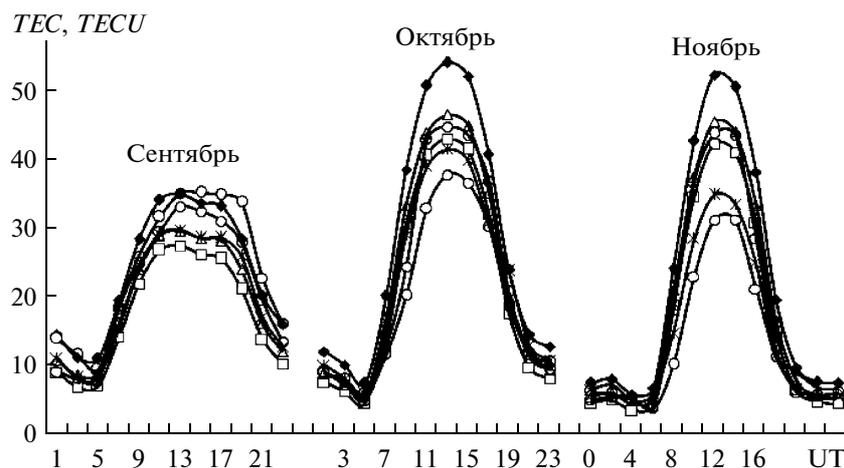


Рис. 1. Экспериментальные и модельные значения  $TEC$ : точки соответствуют данным RAL, ромбы – модели IRI2001, треугольники – модели IRI2007-corr, прямоугольники – IRI2007-NeQ, кружки – RT, звездочки – модели Kouris.

ходимости дальнейших более детальных сравнений модельных и экспериментальных значений ПЭС. Целью данной работы является оценка того, насколько новая модель IRI2007 улучшает определение ПЭС по сравнению с моделью IRI2001. В отличие от других работ, использующих критерий  $|\Delta TEC|$ , проводится сравнение корректирующих множителей  $K(corr) = TEC2007(corr)/TEC2001$ ,  $K(NetQ) = TEC2007(NetQ)/TEC2001$  модели IRI2007 с экспериментальными множителями  $K(TEC) = TEC(obs)/TEC2001$  и оцениваются факторы, определяющие отклонение модельных значений ПЭС от экспериментальных:  $K(TEC) = TEC(obs)/TEC(IRI2001) = K(Nm) K(\tau)$ , где  $\Delta TEC$  – отклонение рассчитанного значения  $TEC$  от экспериментального,  $TEC2007(corr)$  – значение  $TEC$ , рассчитанное в соответствии с первой новой опцией модели IRI2007,  $TEC2001$  – значение  $TEC$ , рассчитанное по модели IRI2001,  $TEC2007(NetQ)$  – значение  $TEC$ , рассчитанное в соответствии со второй новой опцией модели IRI2007,  $TEC(obs)$  – экспериментальное значение  $TEC$ ,  $Nm$  – максимальная электронная концентрация  $NmF2$ ,  $\tau = TEC/NmF2$  – эквивалентная толщина ионосферы. Для этого в работе используются экспериментальные значения критических частот  $foF2(obs)$  по данным вертикального зондирования из баз SPIDR и DIAS и значения ПЭС для глобальных карт, предоставляемых в интернете различными организациями (JPL, CODE, UPC, ESA) в виде IONEX-файлов.

Множитель  $K(TEC)$  позволяет оценить, насколько модельные значения  $TEC(IRI)$  отличаются от экспериментальных значений  $TEC(obs)$ . Он является экспериментальным корректирующим множителем, который при сопоставлении с  $K(corr)$  и  $K(NetQ)$  позволяет определить, насколько эти множители улучшают соответствие модели IRI2007 с экспериментальными значениями по сравнению с

моделью IRI2001. Коэффициент  $K(Nm)$  – множитель, показывающий вклад в отклонение ПЭС за счет расхождений в значениях  $NmF2$ . При адаптации модели IRI к текущим значениям критической частоты  $foF2$  коэффициент  $K(Nm)$  стремится к единице. Коэффициент  $K(\tau)$  – множитель, показывающий вклад в отклонение ПЭС за счет расхождений в значениях  $\tau$ . Этот коэффициент может быть использован для построения пространственного распределения  $foF2$  в ограниченной области [Мальцева и др., 2005].

## 2. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЛЯ ОТДЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ

В данном разделе проводится сравнение модельных и экспериментальных значений ПЭС на примере сентября, октября, ноября 2002 г. для ст. Chilton. Чтобы данный пример не казался случайным, укажем, что часто трудно найти периоды, когда одновременно имеются данные  $foF2(obs)$  и  $TEC(obs)$ . Например, как видно из работы [Maltseva et al., 2008], в январе 2003 г. был один случай одновременного наблюдения, в феврале – два и т.д. На рисунке 1 показаны суточные зависимости ПЭС из базы данных RAL (точки), а также зависимости, рассчитанные для моделей IRI2001 (ромбы), IRI2007 (треугольники) и с использованием эмпирических значений эквивалентной толщины  $\tau$  [Kouris et al., 2008] (звездочки). Кружками показаны модельные значения ПЭС после адаптации модели к текущим значениям  $foF2$  (RT-значения). На этом рисунке в качестве экспериментальных данных использовались значения базы RAL. Видно большое различие значений ПЭС. Если нанести на такой же график значения, получаемые из других глобальных карт, то различия будут еще больше. Это свидетельствует о сложности выбора эталонного метода определения ПЭС для сравнения с моделью. В данном примере корректирующие

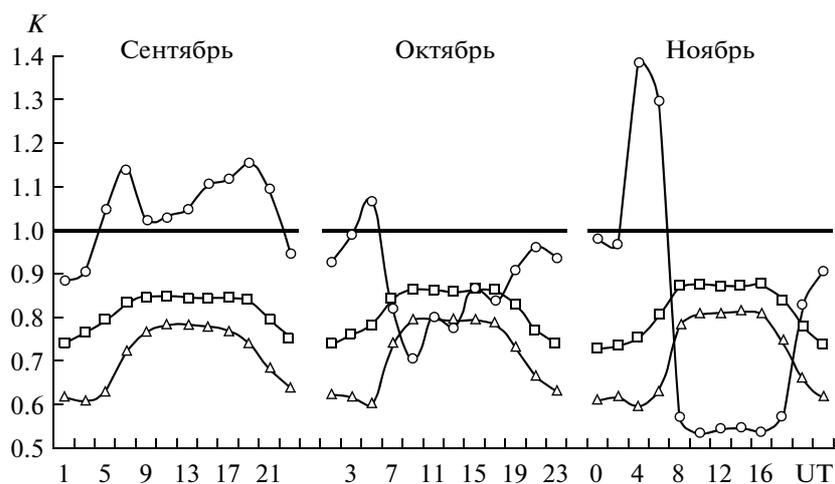


Рис. 2. Экспериментальные и модельные корректирующие множители модели IRI для ст. Chilton в сентябре, октябре, ноябре 2002 г.: кружки относятся к  $K(TEC)$ , квадраты – к  $K(corr)$ , треугольники представляют  $K(NeQ)$ .

множители модели IRI2007 уменьшают значения ПЭС по сравнению с моделью IRI2001. Адаптированные к текущим значениям  $foF2$  значения RT-ПЭС соответствуют экспериментальным данным лучше, чем значения исходных моделей IRI2001 и IRI2007, однако также могут приводить к существенным отличиям. Использование эмпирических значений эквивалентной толщины дает результаты не хуже, чем для адаптированной модели. Рисунок 2 показывает экспериментальные корректирующие множители  $K(TEC)$  (кружки) и корректирующие множители для обеих версий модели IRI2007: IRI2007-corr (квадраты) и IRI2007-NeQ (треугольники). Можно видеть большое разнообразие несоответствия этих коэффициентов. В сентябре множители  $K(corr)$  и  $K(NeQ)$  были меньше единицы, а экспериментальные множители  $K(TEC)$  – больше. Это приведет к тому, что использование множителей  $K(corr)$  и  $K(NeQ)$  ухудшит соответствие с экспериментальными значениями по сравнению с моде-

лью IRI2001. В октябре обе новые версии модели улучшат соответствие, и в полуденные часы версия IRI2007-NeQ даст большее улучшение, чем версия IRI2007-corr. В ноябре такого улучшения недостаточно ( $K(TEC) \ll K(corr)$ ,  $K(NeQ)$  в полуденные часы). Что касается вклада различных факторов ( $K(Nm)$  и  $K(\tau)$ ) в расхождение, то в данном примере в большинстве случаев коэффициент  $K(\tau)$  превышал коэффициент  $K(Nm)$ . Этот факт очень важен, поскольку в традиционных методах адаптации модели к экспериментальным значениям ПЭС, например, в методе, приведенном в работе [Houminer and Soicher, 1996], весь вклад в несоответствие приписывается множителю  $K(Nm)$ , что приводит к неправильному определению параметра  $NmF2$ .

Отсутствие экспериментального эталона ПЭС для сравнения с моделью заставляет использовать другой критерий, а именно: отклонение модельных значений  $foF2$ , рассчитанных из экспериментальных значений ПЭС, от экспериментальных значе-

Таблица 1. Результаты сравнения методов определения ПЭС по критерию  $|\Delta foF2|$

Месяц	Тип параметра $\tau$	IRI	RAL	JPL	CODE	UPC	ESA
Сентябрь 2002 г.	$\tau(IRI2001)$	0.96	0.73	0.48	0.69	0.53	1.14
	$\tau(obs, foF2(IRI))$	0.96	0.53	0.55	0.55	0.61	0.89
	$\tau(obs, foF2obs)$	0.96	0.45	0.45	0.44	0.50	0.84
Октябрь 2002 г.	$\tau(IRI2001)$	1.32	0.80	0.68	0.67	0.73	1.06
	$\tau(obs, foF2(IRI))$	1.32	1.01	0.89	0.84	1.25	1.07
	$\tau(obs, foF2obs)$	1.32	0.67	0.57	0.53	0.66	0.77
Ноябрь 2002 г.	$\tau(IRI2001)$	0.98	0.95	0.86	0.87	0.98	0.97
	$\tau(obs, foF2(IRI))$	0.98	0.76	0.81	0.82	0.84	0.85
	$\tau(obs, foF2obs)$	0.98	0.55	0.54	0.52	0.55	0.58

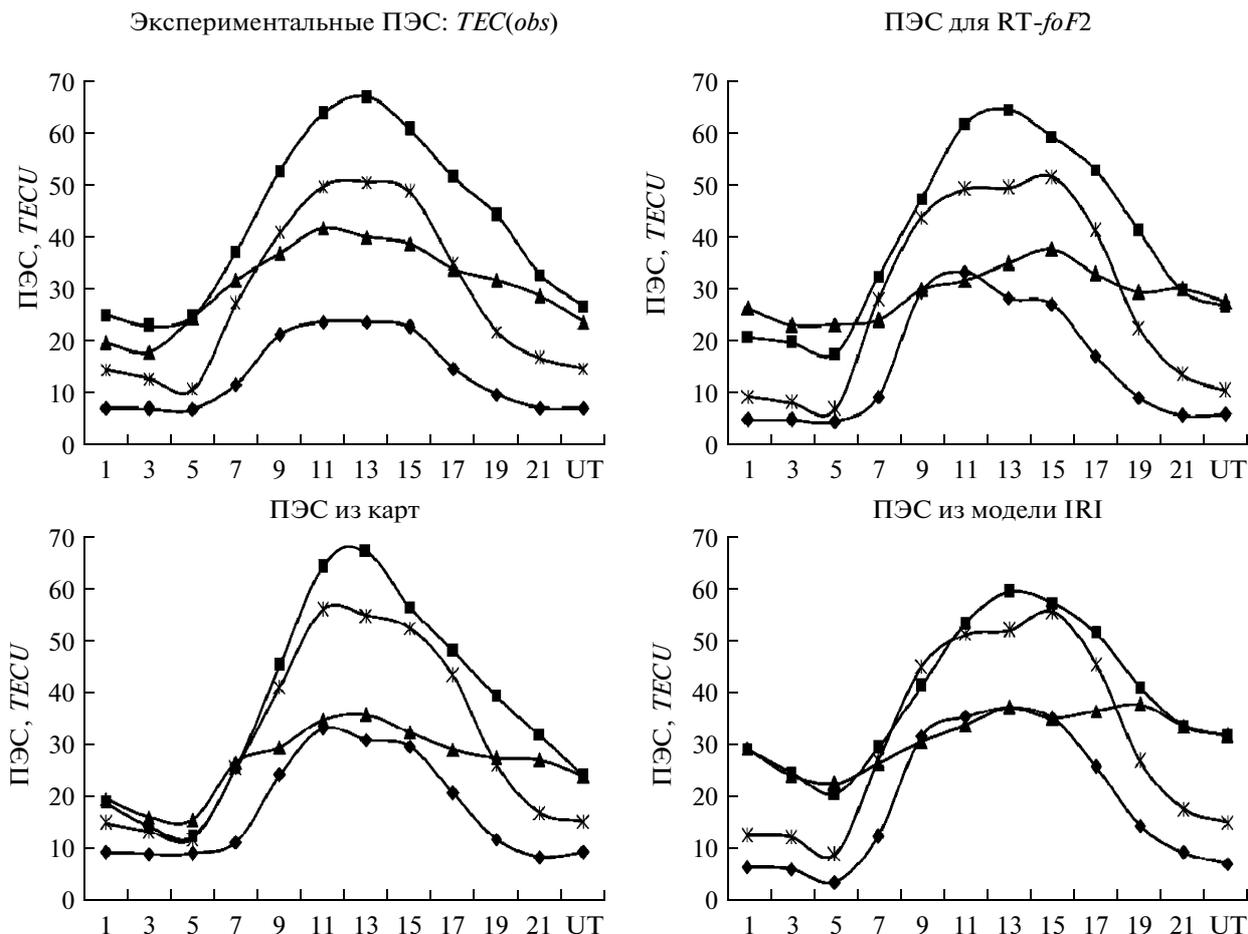


Рис. 3. Сравнение суточных ходов для различных сезонов и методов определения ПЭС: ромбы показывают значения для января, квадраты — для апреля, треугольники — для июля, звездочки — для октября.

ний  $foF2(obs)$ :  $|\Delta foF2|$ . Для рассматриваемых 3-х месяцев результаты даны в табл. 1. Они приводятся для каждого месяца для 3-х возможных опций определения эквивалентной толщины, отличающихся степенью использования экспериментальных значений  $NmF2$  и  $TEC$ :  $\tau(ARI, IRI)$ ,  $\tau(obs, IRI)$ ,  $\tau(obs, obs)$ . Использование  $\tau(ARI, IRI)$  соответствует традиционным методам адаптации модели к экспериментальным значениям ПЭС, при определении  $\tau(obs, IRI)$  используется дополнительная экспериментальная информация, содержащаяся в глобальных картах или в отдельных измерениях,  $\tau(obs, obs)$  является эмпирическим значением. Результаты приводятся для различных способов определения ПЭС (RAL, JPL, CODE, UPC, ESA). Все значения должны сравниваться с отклонениями модельных значений  $foF2$  от экспериментальных, свойственными исходной модели и показанными в столбце с обозначением IRI. Видно, что в этом случае преимущество имели карты JPL и CODE, давая в 1.5–2 раза более близкие к экспериментам значения, чем модель.

Результаты анализа табл. 1 позволяют сделать следующие выводы: 1) разности  $|\Delta foF2|$ , соответствующие исходной модели IRI, достаточно велики; 2) лучшее соответствие получено для карты JPL; 3) использование эмпирических значений  $\tau$  совместно с моделью IRI может улучшить соответствие модельных значений ПЭС и  $foF2$  экспериментальным.

Уже на примере сравнения суточных ходов для месяцев одного сезона видно, что расхождение экспериментальных и модельных значений может иметь различную тенденцию (больше/меньше). Для иллюстрации того, насколько хорошо модель IRI может описывать сезонный ход параметра ПЭС, экспериментальные данные для ст. Ebrge из работы [Mosert et al., 2007] сравниваются с расчетами по глобальным картам и со значениями RT для января, апреля, июля и октября 2000 г. Для всех случаев также проведены расчеты с использованием эмпирических значений эквивалентной толщины  $\tau$  [Kouris et al., 2008]. Рисунок 3 позволяет визуально сравнить поведение ПЭС. Характерной особенно-

**Таблица 2.** Количественная оценка сезонных различий ПЭС по критерию  $|\Delta TEC|$ 

Месяц	модель	<i>obs</i>	JPL	CODE	UPC	ESA	RT
Январь 2000 г.	IRI2001	8.91	4.83	6.79	4.97	8.65	8.26
	NeQ	5.94	4.02	4.06	4.55	4.42	3.53
	Kouris	3.72	4.07	2.52	3.52	3.31	<b>1.52</b>
Апрель 2000 г.	IRI2001	5.06	11.35	5.85	9.74	5.21	6.13
	Corr	9.37	17.52	8.40	15.91	7.57	<b>3.28</b>
	Kouris	4.71	12.26	3.70	10.65	3.84	3.59
Июль 2000 г.	IRI2001	5.42	5.72	4.44	4.44	3.92	5.94
	Corr	5.57	10.16	5.07	9.30	3.38	4.39
	Kouris	3.23	6.69	2.04	5.82	2.06	<b>2.02</b>
Октябрь 2000 г.	IRI2001	8.19	3.60	9.39	4.81	9.94	9.89
	NeQ	2.91	3.15	3.31	3.73	3.93	3.08
	Kouris	3.71	3.56	4.79	<b>2.12</b>	4.94	2.49

**Таблица 3.** Количественная оценка сезонных различий ПЭС по критерию  $|\Delta foF2|$ 

$ \Delta foF2 $	Модель	JPL	CODE	UPC	ESA
январь 1.005 для IRI2001	IRI2001	0.620	0.720	0.770	1.111
	Corr	0.960	0.619	1.003	0.707
	NeQ	1.222	0.763	1.239	0.633
	Kouris	1.007	<b>0.571</b>	0.965	0.750
апрель 0.722 для IRI2001	IRI2001	1.022	0.608	0.930	0.732
	Corr	1.963	0.884	1.858	0.929
	NeQ	2.295	1.125	2.190	1.130
	Kouris	1.247	<b>0.562</b>	1.166	0.777
июль 1.019 для IRI2001	IRI2001	0.955	0.748	0.931	1.062
	Corr	1.561	0.974	1.459	0.988
	NeQ	1.838	1.139	1.726	1.040
	Kouris	1.165	<b>0.665</b>	1.075	1.006
октябрь 0.702 для IRI2001	IRI2001	0.536	0.773	0.742	0.821
	Corr	0.957	0.581	0.959	0.759
	NeQ	1.123	0.679	1.108	0.750
	Kouris	0.908	<b>0.532</b>	0.822	0.568

стью поведения ПЭС для модели IRI2007 является уменьшение значений по сравнению с моделью IRI2001. Обе новые опции обеспечивают более сильные отклонения от эксперимента, чем модель IRI2001. В некоторых случаях ПЭС(IRI) не отражают даже качественной картины сезонного хода, давая, например, совпадение зимних и летних значе-

ний при их экспериментальном различии в 2 раза. Из карт наилучшее соответствие обеспечила карта CODE при использовании  $\tau(\text{IRI})$ .

Количественная характеристика различий по критерию  $|\Delta TEC|$  в единицах *TECU* дана в табл. 2. Видно, что во всех случаях наилучшее соответствие получено при адаптации модели к реальным значе-

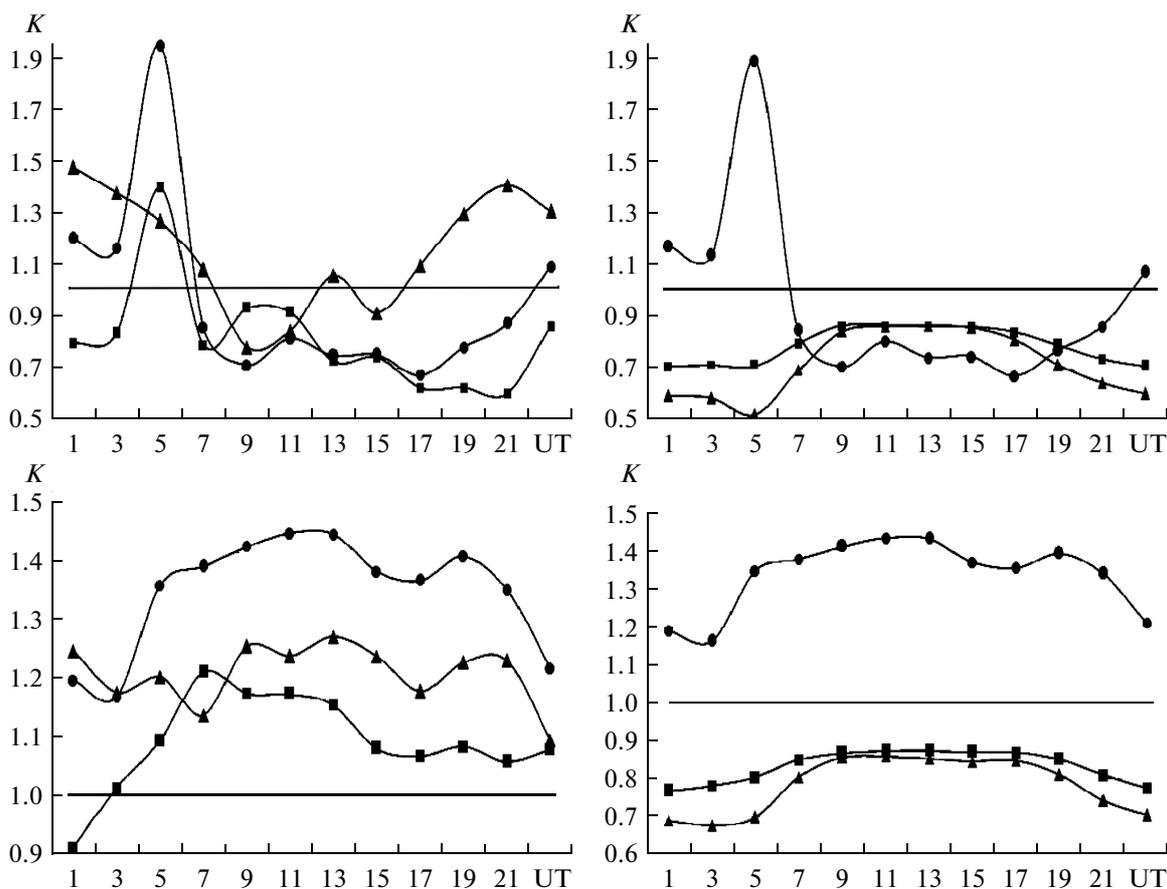


Рис. 4. Экспериментальные корректирующие множители совместно с факторами (левые графики) и с корректирующими множителями модели IRI2007 (правые графики) для января и апреля 2000 г., ст. Ebrge.

ниям  $foF2$  и при использовании эмпирической информации по  $\tau$ . Количественная характеристика различий по критерию  $|\Delta foF2|$  в единицах МГц дана в табл. 3 для вариантов наилучшего соответствия для каждого случая. Значения отклонений должны сопоставляться со значениями 1.005, 0.722, 1.019 и 0.702 МГц, которые представляют отклонения для исходной модели IRI. Поведение корректирующих множителей на примере января и апреля показано на рис. 4. Экспериментальные корректирующие множители  $K(TEC)$  показаны сплошными кружками. Видно, что диапазон их изменения от 0.7 до 1.9. Оба множителя  $K(Nm)$  (квадраты) и  $K(\tau)$  (треугольники), представленные в левой части рисунка, дают сравнимый вклад и могут быть как больше, так и меньше единицы. На графиках в правой части коэффициенты  $K(TEC)$  сравниваются со значениями корректирующих множителей обеих версий: IRI2007-corr (квадраты), IRI2007-NeQ (треугольники). Сплошные линии  $K = 1$  соответствуют модели IRI2001. Для всех месяцев корректирующие множители IRI2007 мень-

ше единицы, что может существенно ухудшить соответствие в вечерние и ночные часы.

### 3. ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЭС ДЛЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЗОНЫ

Одной из практических задач является использование ПЭС для восстановления пространственного распределения  $foF2$  в некоторой зоне по экспериментальным значениям ПЭС и одной калибровочной станции вертикального зондирования ( $foF2(obs)$ ). Оценки радиуса пространственной корреляции, приведенные в работе [Stanislawski et al., 2002], показывают, что этот радиус больше для ПЭС, чем для  $foF2$ . Такой же вывод можно сделать по результатам работы [Fridman et al., 2006]. В работе [Мальцева и др., 2005] показано, что эмпирическое значение  $K(\tau)$  позволяет определять восстановленное значение  $foF2$  по формуле  $foF2^2 = foF2^2(IRI) \times TEC(obs)/K(\tau)/\tau(IRI)$ . В данном разделе возможность использования коэффициента  $K(\tau)$  исследуется на примере европейской зоны. Очевидно, что

**Таблица 4.** Значения  $|\Delta foF2|$  для исходных и восстановленных значений  $foF2$ 

$ \Delta foF2 $	Chilton	Juliusruh	Pruhonice	El-Arenosilo	Ebre	Rome	Athens
N	10	14	14	9	8	12	15
IRI	0.39	0.47	0.46	0.88	0.66	0.71	0.99
K(Pruh)	0.35	0.39	0.22	0.47	0.35	0.41	0.53

если этот коэффициент будет примерно постоянным или обладать какой-либо широтной зависимостью, то  $K(\tau)$  для одной станции можно использовать в некоторой области. Результаты иллюстрируются для апреля 2007 г. и карты JPL, которая лучше соответствовала экспериментальным данным в этом случае. Расчет коэффициентов  $K(\tau)$  для европейских станций Ebre, Chilton, Pruhonice, El-Arenosilo, San Vito, Rome, Athens показал, что  $K(\tau)$  для ст. Pruhonice был близок к медиане коэффициентов для остальных станций. Использование этого коэффициента в качестве корректирующего множителя для всех станций дало результаты, приведенные в табл. 4, которая показывает отклонения  $|\Delta foF2|$  исходных модельных (строка IRI) и восстановленных по ПЭС (строка  $K(\text{Pruh})$ ) значений  $foF2$  от экспериментальных  $foF2(\text{obs})$ . Параметр  $N$  показывает число случаев для каждой станции. Во многих случаях можно видеть существенное улучшение, свидетельствующее о возможности использования эмпирических значений  $\tau$  для получения значений  $foF2$  в некоторой области, намного более близких к реальным, чем при использовании исходной модели IRI.

#### 4. ПРИМЕР СРАВНЕНИЯ ПЭС ДЛЯ ДРУГИХ ЗОН

Европейская зона имеет очень хорошую обеспеченность станциями ВЗ и GPS, поэтому восстановление  $foF2$  по значениям ПЭС не является определяющим. Для других регионов такая возможность может играть роль. В этом разделе приводятся примеры результатов для апреля 2000 г. и некоторых станций: Tashkent, Magadan, Beijing, Boulder, Chongqing, Hobart. Рисунок 5 показывает корректирующие множители для них. Видно, что почти для всех станций экспериментальные корректирующие множители больше единицы, что не соответствует корректирующим множителям новых опций модели IRI2007-corr и IRI2007-NeQ, которые всегда меньше единицы. Для ст. Boulder  $K(Nm)$  и  $K(\tau)$  дают одинаковый вклад. В средней части рисунка приведены результаты для 2-х китайских станций, расстояние между которыми превышает радиус пространственной корреляции для  $foF2$ . Характер суточной зависимости и сами значения  $K(\tau)$  довольно близки, что может позволить восстановить частоты  $foF2$  одной станции по коэффициенту  $K(\tau)$  для дру-

гой. Таблица 5 показывает отклонения  $|\Delta foF2|$  для различных станций, рассчитанные с использованием 3-х опций  $\tau$ , в сравнении с отклонениями для исходной модели.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Международная эмпирическая модель IRI имеет несколько версий (IRI79, IRI90, IRI95, IRI2001, IRI2007), отражающих этапы ее модификации, например, такие важные, как включение шторм-фактора  $ST$  [Araujo-Pradere et al., 2002] и другие. Одной из целей перехода от модели IRI2001 к модели IRI2007 было улучшение определения параметра ПЭС, поскольку он важен для многих приложений. Целью данной статьи была количественная оценка этого улучшения. Оценка проводилась с помощью коэффициента  $K(\text{TEC})$ . Как видно из полученных результатов, значения ПЭС, предоставляемые различными версиями модели (IRI2001, IRI2007), могут отличаться от экспериментальных значений в 0.7–1.9 раза. Величины различий зависят от координат точки наблюдения, времени суток, сезона и т.д. Для тех приложений, где необходимы качественные оценки и достаточно такая точность, можно использовать модель IRI2007-corr. Если требуются более точные значения, необходимо предварительно определить, какую версию модели (IRI2001, IRI2007-corr, IRI2007-NeQ) лучше использовать, поскольку, к сожалению, невозможно указать одну версию, которая во всех случаях давала бы значения ПЭС, наиболее близкие к экспериментальным. Это можно сделать с использованием легко доступных карт ПЭС, например, JPL, для заданного района. Если  $K(\text{TEC}) > 1$ , необходимо использовать версию IRI2001. Если  $K(\text{TEC}) < 1$ , необходимо использовать ту версию IRI2007, коэффициент которой ближе к величине  $K(\text{TEC})$ .

Оценка вклада различных множителей ( $K(Nm)$ ,  $K(\tau)$ ) показала, что они могут быть сравнимы, хотя в большинстве случаев коэффициент  $K(\tau)$  превышает  $K(Nm)$ . Большое отличие коэффициента  $K(Nm)$  от единицы связано с недостаточной статистикой критической частоты  $foF2$ , заложенной в модель. Чтобы приблизить коэффициент  $K(Nm)$  к единице, необходимо использовать новые модели  $foF2$ , построенные с учетом статистики 90-х годов [Ouyemi and McKinnell, 2008]. Второй путь — адаптация моде-

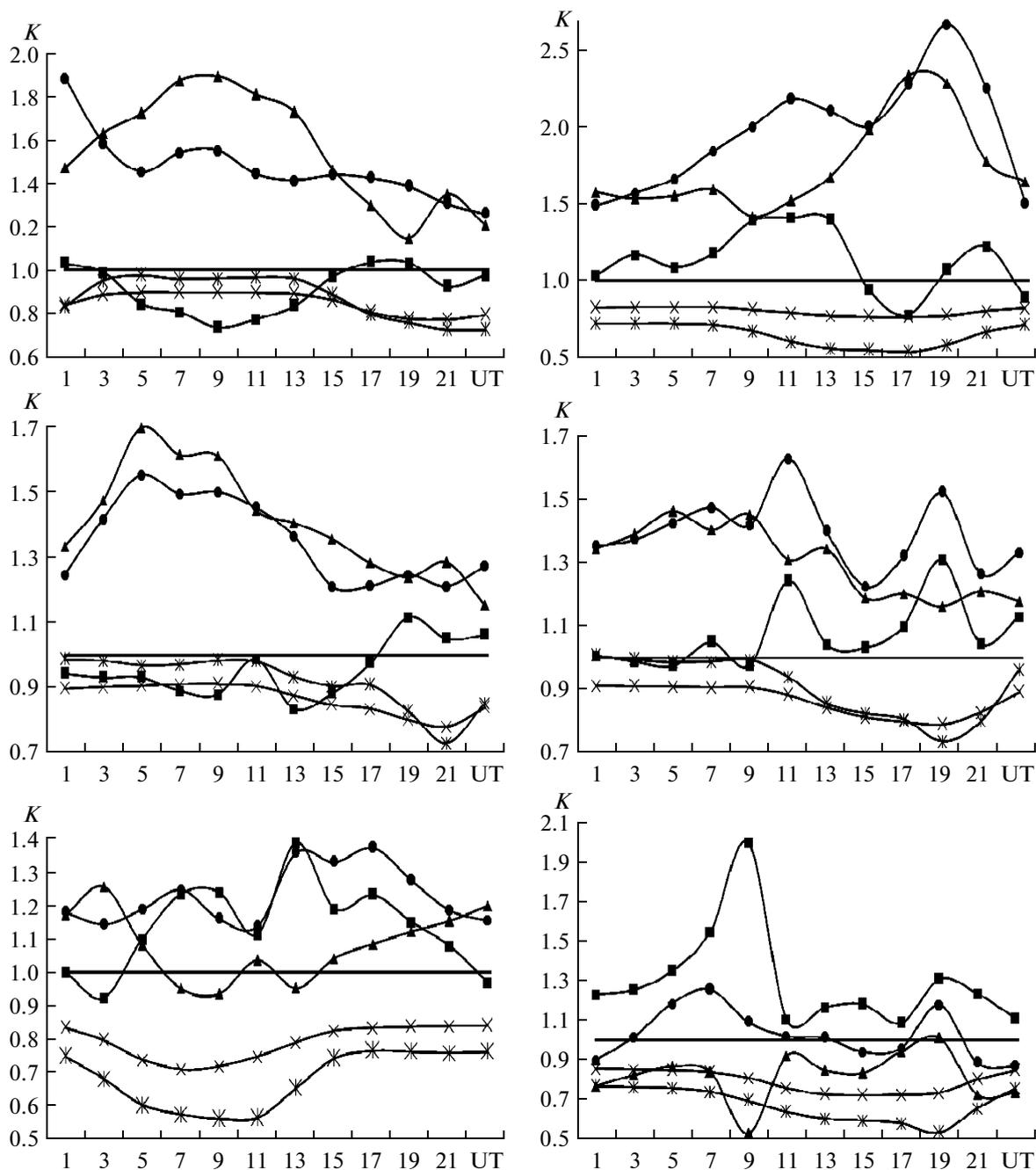


Рис. 5. Экспериментальные и модельные корректирующие множители:  $K(TEC)$  – точки;  $K(Nm)$  – квадраты;  $K(\tau)$  – треугольники;  $K(corr)$  – крестики;  $K(NeQ)$  – звездочки - для различных станций: Tashkent и Magadan в верхней части, Chongqing и Beijing в средней части, Boulder и Hobart в нижней части.

ли к текущему значению  $foF2$ , при этом коэффициент  $K(Nm)$  стремится к единице. Чтобы приблизить коэффициент  $K(\tau)$  к единице, необходимо использовать априорную информацию об эквивалентной толщине ионосферы. Целесообразность такого подхода проиллюстрирована на примере эмпирических значений эквивалентной толщины  $\tau$  для европейской

зоны [Kouris et al., 2008]. Для определения эмпирических значений  $\tau$  также можно использовать глобальные карты ПЭС. Коэффициент  $K(\tau)$  можно использовать для построения пространственного распределения  $foF2$ . Кстати, в настоящее время значения  $foF2$ , получаемые с помощью ПЭС, рассматриваются как альтернатива данным вертикаль-

**Таблица 5.** Отклонения  $|\Delta foF2|$  для исходной модели и 3-х опций  $\tau$ 

Станция	Широта	Долгота	<i>obs</i> -IRI	$\tau$ (IRI, IRI)	$\tau$ ( <i>obs</i> , IRI)	$\tau$ ( <i>obs</i> , <i>obs</i> )
Beijing	40N	116.3	0.58	1.00	0.50	0.34
Boulder	40N	254.7	1.05	0.65	0.68	0.44
Chongqing	29.5N	106.3	0.86	1.67	0.72	0.63
Hobart	24.2S	147.4	1.49	1.23	1.30	0.86
Magadan	59.6N	150.8	1.14	0.85	0.89	0.70
Tashkent	41.3N	69.6	0.77	1.62	0.82	0.48

ного зондирования (ВЗ), например. [Ляхов и Хлыбов, 2006]. Такой подход преждевременен, поскольку не имеет достаточного обоснования. Результаты предпоследнего раздела данной статьи указывают, что без калибровки значений ПЭС по данным ВЗ обеспечить малые отклонения модельных  $foF2$  от экспериментальных значений невозможно.

## 6. ВЫВОДЫ

Сравнение полного электронного содержания и корректирующих множителей модели IRI2007 с экспериментальными данными позволяет сделать следующие выводы.

Не являясь эмпирической по параметру ПЭС, модель IRI не совсем адекватно отражает особенности поведения ПЭС как качественно, так и количественно из-за больших отклонений модельных критических частот  $foF2$  и эквивалентной толщины ионосферы  $\tau$  от экспериментальных величин даже для медианных значений. Для улучшения ситуации необходимо использовать новые модели  $foF2$  типа [Ouyemi and McKinnell, 2008].

Корректирующие множители модели IRI2007  $K(\text{corr})$  и  $K(\text{NeQ})$  по всему земному шару меньше единицы. Такое поведение увеличивает соответствие с формой профиля внешней ионосферы и уменьшает значения ПЭС. Однако это уменьшение во многих случаях ухудшает соответствие модельных ПЭС с экспериментом по сравнению с моделью IRI2001. Для выбора наилучшей версии в каждом конкретном случае необходимо сравнивать значения коэффициентов  $K(\text{corr})$  и  $K(\text{NeQ})$  со значением  $K(\text{TEC})$ , получаемым по данным глобальной карты ПЭС.

Чтобы приблизить коэффициент  $K(\tau)$  к единице, необходимо использовать априорную информацию об эквивалентной толщине ионосферы, получаемую также на основе глобальной карты ПЭС. Однако, как показывают таблицы 1, 4, 5, значения  $|\Delta foF2|$  для эмпирических  $\tau$  все-таки достаточно велики. Это свидетельствует о том, что параметр ПЭС измеряется с недостаточной точностью. Причины известны: шумы, многолучевость, скачки фазы, идеа-

лизация модели и др. Для улучшения ситуации необходимы новые методы определения ПЭС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ляхов А.Н., Хлыбов Е.С. Естественные ортогональные функции ионосферы Земли // ДАН. Т. 409. № 6. С. 819–821. 2006.
- Мальцева О.А., Никитенко Т.В., Полтавский О.С. Адаптация модели IRI к условиям распространения декаметровых волн // Тр. XXII Всероссийской науч. конф. (РПВ-22), 22–26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону – п. Лоо. Т. 2. С. 89–92. 2008а.
- Мальцева О.А., Полтавский О.С., Чинь Куанг Т. Сравнение улучшенной международной модели ионосферы IRI с экспериментальными данными // Тр. Региональной XIV конф. по распространению радиоволн, 11–13 ноября 2008 г., С.-Петербург, РАН. С. 45–48. 2008б.
- Мальцева О.А., Родионова В.Т., Шлюпкин А.С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 45. № 4. С. 480–486. 2005.
- Araujo-Pradere E.A., Fuller-Rowell T.J., Codrescu M.V. STORM: An empirical storm-time ionosphere correction model. 1. Model description // Radio Sci. V. 37. doi:10.1029/2001RS002467. 2002.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere // Radio Sci. V. 36. № 2. P. 261–275. 2001.
- Bilitza D. A correction for the IRI topside electron density model based on Alouette/ISIS topside sounder data // Adv. Space Res. V. 33. № 6. P. 838–843. 2004.
- Bilitza D. Evaluation of the IRI-2007 model options for topside electron density // Adv. Space Res. V. 44. № 6. P. 701–706. 2009.
- Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters // Adv. Space Res. V. 42. P. 599–609. 2008.
- Bilitza D., Reinisch B.W., Radicella S.M., Pulintsev S., Gulyaeva T., Triskova L. Improvements of the International Reference Ionosphere model for the topside electron density profile // Radio Sci. V. 41. RS5S15 doi:10.1029/2005RS003370. 2006.
- Fridman S.V., Nickisch L.J., Aiello M., Hausman M. Real-time reconstruction of the three-dimensional ionosphere

- using data from a network of GPS receivers // *Radio Sci.* V. 41. RS5S12, doi: 10.1029/2005RS003341. 2006.
- *Houminer Z., Soicher H.* Improved short-term predictions of  $f_oF2$  using GPS time delay measurements // *Radio Sci.* V. 31. № 5. P. 1099–1108. 1996.
  - *Kouris S.S., Polimeris K.V., Cander L.R., Ciraolo L.* Solar and latitude dependence of *TEC* and *SLAB* thickness // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 70. № 10. P. 1351–1365. 2008.
  - *Maltseva O., Nikitenko T., Poltavsky O.* Imitation of the IRI2007 model results for high frequency communication // Proc. the XXIX General Assembly URSI, Chicago, USA, August 07–16. CD-GP1-02.15. P. 1–4. 2008.
  - *Mendillo M.* Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* V. 44. RG4001, doi:10.1029/2005RG000193. P. 1–47. 2006.
  - *Mosert M., Gende M., Brunini C.R., Ezquer D., Altadill D.* Comparisons of IRI TEC predictions with GPS and digisonde measurements at Ebro // *Adv. Space Res.* V. 39. P. 841–847. 2007.
  - *Oeyemi E.O., McKinnell L.A.* A new global *F2* peak electron density model for the International Reference Ionosphere (IRI) // *Adv. Space Res.* V. 42. P. 645–658. 2008.
  - *Radicella S. M., Leitinger R.* The evolution of the DGR approach to model electron density profiles // *Adv. Space Res.* V. 27. P. 35–40. 2001.
  - *Stanislawski I., Bradley P.A., Juchnikowski G.* Spatial correlation assessment of ionospheric parameters for limited-area mapping // Proc. GA URSI, Maastricht, 17–24 August 2002. № 816. 4 p. 2002.
  - *Stankov S.M., Jakowski N., Heise S., Muhtarov P., Kutiev I., Warnant R.* A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere // *J. Geophys. Res.* V. 108. 1164, doi: 1029/2002JA009570, 2003.
  - *Uemoto J., Ono T., Kumamoto A., Iizima M.* Comparison of the IRI 2001 model with electron density profiles observed from topside sounder on-board the Ohzora (EXOS-C) and the Akebono (EXOS-D) satellites // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 750–754. 2007.