



УДК 621.371.3(075.8)

Моделирование полного электронного содержания ионосферы

В. И. Сажин (sazhin@physdep.isu.ru)

Е. М. Вдовин (zhekos85@mail.ru)

А. В. Торшина (torshina@physdep.isu.ru)

Аннотация. Рассмотрены некоторые способы теоретического моделирования значений полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы Земли, являющегося хорошим показателем ее состояния и динамики ее изменения. Получено, что наибольшую эффективность для определения текущих значений ПЭС имеет применение достаточно адекватной среднемесячной модели ионосферы в режиме коррекции; коррекция модели осуществляется по оперативно получаемой информации о критической частоте.

Ключевые слова: ионосфера Земли, полное электронное содержание ионосферы, математическая модель ионосферы, теоретическое моделирование ионосферы, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС).

Введение

Ионизированная оболочка атмосферы Земли – ионосфера – существенно реагирует на различные процессы, проходящие на земной поверхности и вблизи нее в нижней атмосфере, а также, как показано в последнее время, имеет значительный отклик на сильные механические напряжения, возникающие в земной коре перед наступлением сейсмических событий. Поэтому исследования состояния ионосферы и динамики ее изменения относятся к одному из важных направлений наук о Земле.

Хорошим показателем состояния ионосферы и ее вариаций является полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы – количество электронов в вертикальном столбе с поперечным сечением 1 м^2 и высотой от поверхности Земли до условного окончания ионосферы. В настоящее время налажены систематические измерения ПЭС для всей земной поверхности по данным обработки сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в частности системы GPS. Значения ПЭС определяются для большого числа опорных двухчастотных приемников сигналов этой системы. По их данным строятся интерполяционные карты глобальных значений ПЭС. Вместе с тем «густота» расположения приемников весьма неодинакова, например, в обширных регионах Сибири и Дальнего Востока России этих станций всего лишь несколько. Естественно, что и данные карт здесь имеют более низкую точность. Таким образом, возникает необходимость теорети-

ческого моделирования значений ПЭС, особенно для регионов с малой плотностью расположения приемников ГНСС. К тому же карты строятся с определенной задержкой во времени, а наличие моделей позволяет получить текущие значения ПЭС в режиме реального времени.

В настоящей работе рассмотрено несколько вариантов моделирования значений ПЭС и дается их сравнительная оценка.

Эмпирические модели ПЭС

В эмпирических моделях используется аналитическое описание измеренных значений ПЭС или разложение массива этих значений по различным ортогональным функциям. Первой эмпирической моделью ПЭС была модель Клобучара [9], которая заложена и используется в одночастотных приемниках сигналов GPS при определении его местоположения. Модель имеет достаточно простое аналитическое описание среднемесячных значений ПЭС, которое, однако, уточняется на текущую ситуацию за счет оперативной коррекции ряда параметров этого описания. Эксплуатация модели и дополнительные исследования ее точности показали, что она дает среднюю относительную ошибку в описании ПЭС приблизительно 50 % [8]. Конечно, это большая ошибка, поэтому в дальнейшем были инициированы попытки создания более точных эмпирических моделей. Так, сравнительно недавно была разработана эмпирическая модель Gemtec [7]. Она использует разложение значений ПЭС для конкретного дня одного цикла солнечной активности по естественным ортогональным функциям и использует в качестве входного параметра значение солнечной активности для конкретного дня.

Вместе с тем с незначительной потерей точности в модели могут быть использованы и данные краткосрочного прогноза солнечной активности, достаточно просто выполняемого на основании предыдущих измерений. К достоинству модели следует отнести небольшой объем занимаемых ресурсов и высокую оперативность расчетов.

Для оценки эффективности модели в качестве экспериментальных данных использовались значения ГИМ ПЭС $I_{эксн}$ из карт IONEX [6] лаборатории CODG в 02:00 и 14:00 часов UT на широтах 55, 40, 0° для долготы 0° 15 числа каждого месяца 2011 г. Таким образом, всего получено 72 значения. Они приведены в табл. 1. Значения ПЭС даны в единицах, называемых TECU – Total Electron Content Unit ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \cdot 1 \text{ м}^{-2}$).

Для этих же моментов времени и координат рассчитаны значения ПЭС $I_{мод}$ по модели Gemtec, показанные в табл. 2. В нее добавлены также соответствующие значения индекса солнечной активности из [4].

Для вычисления относительной погрешности использовалась следующая формула:

$$\text{Относительная погрешность} = \frac{|I_{эксн} - I_{мод}|}{I_{эксн}}. \quad (1)$$

Величины этой погрешности приведены в табл. 3. При этом были исключены значения, когда относительная погрешность составила более 100 %. В таблице они помечены прочерками.

Таблица 1

Значения ПЭС по данным лаборатории CODG, TECU

Время (UT)		02:00			14:00		
Широта		55°	40°	0°	55°	40°	0°
Дата							
15.01.2011		1,4	7,2	5,7	5,1	12,2	27,8
15.02.2011		3,6	9,7	9,7	8,1	14,9	46,8
15.03.2011		2,9	6,8	16,8	15,0	19,9	53,9
15.04.2011		6,8	10,5	14,6	22,6	31,2	63,9
15.05.2011		9,5	14,0	10,2	16,4	26,8	45,6
15.06.2011		6,5	10,0	8,5	13,5	18,7	34,5
15.07.2011		6,4	11,5	10,9	9,9	17,2	42,2
15.08.2011		4,8	9,2	9,7	11,0	24,6	41,3
15.09.2011		6,4	10,3	14,0	17,3	23,6	59,9
15.10.2011		7,3	9,9	16,8	36,8	39,2	77,3
15.11.2011		6,3	10,4	23,0	38,4	42,4	84,4
15.12.2011		0,4	9,7	28,4	15,5	19,6	62,2

Таблица 2

Значения ПЭС по модели Gemtec, TECU

Время (UT)		02:00			14:00			Индекс солнечной активности
Широта		55°	40°	0°	55°	40°	0°	
Дата								
15.01.2011		1,6	5,1	2,8	8,2	11,6	31,1	80,2
15.02.2011		3,0	6,6	11,9	17,1	21,9	57,3	112,8
15.03.2011		3,4	6,9	9,5	17,2	22,5	55,3	101,5
15.04.2011		4,9	8,0	16,2	22,8	30,2	77,5	129,4
15.05.2011		6,3	8,9	5,9	16,7	22,8	43,3	94,5
15.06.2011		9,2	11,9	6,8	16,5	21,9	36,9	101,5
15.07.2011		6,9	9,2	6,7	12,5	16,9	29,2	93,8
15.08.2011		6,1	8,9	5,7	13,9	18,7	35,7	90,4
15.09.2011		9,5	13,3	14,7	26,9	33,8	76,3	140,7
15.10.2011		5,3	7,9	15,8	21,5	26,7	66,3	137,7
15.11.2011		3,5	5,4	21,7	19,8	24,2	66,4	148,3
15.12.2011		2,6	5,1	15,3	16,7	20,6	55,0	124,2

Надо отметить, что величина средней относительной погрешности вполне согласуется со значением 19,6 %, полученным авторами модели на значительно более представительном объеме данных [8]. Таким образом, налицо существенное повышение точности определения ПЭС по сравнению с моделью Клубучара. Поэтому целесообразна замена модели Клубучара в одночастотных приемниках сигналов ГНСС на модель Gemtec, что приведет к значительному повышению точности позиционирования, выполненного этими приемниками.

Таблица 3

Погрешность определения ПЭС по модели Gemtec

Время (UT) Широта Дата	02:00			14:00			Средняя относительная погрешность, %
	55°	40°	0°	55°	40°	0°	
15.01.2011	0,71	0,35	0,07	0,33	0,21	0,11	21,4
15.02.2011	0,03	0,33	0,43	–	0,6	0,14	
15.03.2011	0,28	0,06	0,35	0,34	0,19	0,007	
15.04.2011	0,19	0,1	0,6	0,2	0,13	0,14	
15.05.2011	0,2	0,31	0,19	0,04	0,19	0,03	
15.06.2011	0,49	0,21	0,08	0,24	0,15	0,17	
15.07.2011	0,23	0,14	0,43	0,47	0,06	0,19	
15.08.2011	0,21	0,14	0,39	0,29	0,28	0,14	
15.09.2011	0	0,05	0,19	0,4	0,35	0,17	
15.10.2011	0,48	0,25	0,09	0,33	0,19	0,06	
15.11.2011	0,57	0,41	0,07	0,34	0,25	0,13	
15.12.2011	–	0,48	0,47	0,1	0,1	0,13	

Эмпирические модели $N(h)$ -профиля электронной концентрации ионосферы

Существуют модели ионосферы, позволяющие рассчитывать профиль электронной концентрации $N(h)$ в произвольной точке земной поверхности. В прикладных задачах сейчас наиболее распространены эмпирические и полуэмпирические модели ионосферы. Из моделей первого типа широко применяется прежде всего модель IRI [5], объединяющая результаты работы нескольких групп исследователей и постоянно обновляющаяся. Кроме того, привлекает внимание и недавно разработанная NeQuick [10]. В эмпирической основе она близка IRI, но имеет более точную форму профиля $N(h)$ в области верхней ионосферы, на высотах, значительно больших высоты максимума. Как показано авторами модели, вычисления по ней значений ПЭС лучше, чем для IRI, соответствуют наблюдениям [10]. Это привело к тому, что модель используется для вычисления ионосферных задержек в европейской системе ГНСС «Галилео». Поэтому и в нашей работе из эмпирических моделей взята именно модель NeQuick. При этом коррекция модели не проводилась.

В таблице 4 представлены данные расчета ПЭС по модели NeQuick для тех же условий, что и в предыдущем разделе; в табл. 5 – полученные при этом погрешности (прочерками отмечены ситуации, когда погрешность составила более 200 %).

Отметим, что модель NeQuick по своему построению является медианной, среднемесячной моделью. И хотя такие модели при описании конкретных дней лучше описывают средние дни месяца, все-таки и для этих дней отличия от реальных значений могут быть у среднемесячных моделей довольно значительными. Поэтому естественно, что по сравнению с «ежедневной» моделью Gemtec средняя относительная ошибка для NeQuick существенно выше и составляет 35,8 %.

Таблица 4

Значения ПЭС по модели NeQuick, TECU

Время (UT)	02:00			14:00		
Широта Дата	55°	40°	0°	55°	40°	0°
15.01.2011	3,9	7,7	13,4	15,5	15,7	29,9
15.02.2011	5,3	10,9	21,6	16,2	17,8	39,1
15.03.2011	9,1	14,2	31,3	16,9	24,0	53,6
15.04.2011	3,6	8,7	21,8	17,3	31,3	72,6
15.05.2011	4,1	6,8	9,3	13,7	21,8	55,9
15.06.2011	4,9	6,6	7,2	11,7	17,9	45,7
15.07.2011	4,2	5,9	7,0	11,5	16,2	40,7
15.08.2011	2,9	5,8	8,4	11,6	17,5	47,5
15.09.2011	3,8	7,9	22,3	17,9	27,6	63,4
15.10.2011	11,0	15,9	39,9	30,9	34,9	67,3
15.11.2011	9,7	13,8	41,2	36,7	38,5	73,0
15.12.2011	8,5	12,3	26,7	33,1	29,8	59,1

Таблица 5

Погрешность вычисления ПЭС для модели NeQuick

Время (UT)	02:00			14:00			Средняя относительная погрешность, %
Широта Дата	55°	40°	0°	55°	40°	0°	
15.01.2011	1,79	0,07	1,35	-	0,29	0,08	35,8
15.02.2011	0,47	0,12	1,23	1	0,19	0,16	
15.03.2011	-	1,09	0,86	0,13	0,21	0,006	
15.04.2011	0,47	0,17	0,49	0,23	0,003	0,14	
15.05.2011	0,57	0,51	0,09	0,16	0,19	0,23	
15.06.2011	0,25	0,34	0,15	0,13	0,04	0,32	
15.07.2011	0,34	0,49	0,36	0,16	0,06	0,04	
15.08.2011	0,39	0,37	0,13	0,05	0,29	0,15	
15.09.2011	0,4	0,23	0,59	0,03	0,17	0,06	
15.10.2011	0,5	0,6	1,38	0,16	0,11	0,13	
15.11.2011	0,54	0,33	0,79	0,04	0,09	0,13	
15.12.2011	-	0,27	0,06	1,14	0,52	0,05	

Полуэмпирическая модель $N(h)$ -профиля электронной концентрации в ионосфере

Полуэмпирические модели имеют довольно простую теоретическую часть, решение которой уточняется затем по эмпирическим данным. Так, в полуэмпирической модели ионосферы (ПЭМИ) ИГУ [2] решается система уравнений непрерывности для основных сортов ионов, и затем решение уточняется по эмпирическим данным о среднемесячных значениях критических частот слоев E и F2, однозначно определяющих максимальное значение электронной концентрации и высоты этого максимума. Таким образом, в модели естественным образом заложена возможность коррекции по экспе-

риментальным данным, которая может быть реализована и при коррекции модели на текущую ситуацию по оперативно получаемым данным. Как было показано в [1], особенно существенным является уточнение критической частоты, оно значительно улучшает описание моделью области максимума N в конкретной ситуации. Однако для применения полуэмпирической модели в расчетах ПЭС необходимо было выполнить ее развитие включением описания формы $N(h)$ на высотах выше максимума вплоть до окончания ионосферы. Такое развитие было выполнено в работе [3]. Для задания критической частоты использованы данные модели IRI. Форма профиля для участка высот выше максимума задана аналитическим образом с помощью сопряжения двух кривых. Первая кривая имеет вид известной функции Чепмена, основной параметр которой – шкала высот однородной ионосферы H – не остается постоянным, а изменяется с высотой. Его изменение определяется на основе расчета по данным модели IRI. Первая кривая заканчивается на высоте $h_{рав}$, для которой доминирующее влияние ионов атомарного кислорода сменяется на преобладающее влияние ионов атомарного водорода. С этой высоты форма профиля $N(h)$ описывается экспонентой, параметры которой подобраны на основании данных модели NeQuick.

Кроме того, в модели реализована также возможность коррекции на текущую ситуацию и на верхнем участке профиля. Для этого исследована зависимость N от высоты и показано, что ее с хорошей точностью можно аппроксимировать линейей. Тогда основным параметром, существенно влияющим на форму профиля $N(h)$ на верхнем участке, будет значение N на высоте $h_{рав}$, определяющее верхнюю точку на этой линейной зависимости. Таким образом получена модифицированная модель – ПЭМИм. Для проверки эффективности моделирования ПЭС модели ПЭМИм был взят пространственный регион, относящийся к средним широтам России. Связано это, во-первых, с малой концентрацией опорных двухчастотных приемников сигналов GPS, во-вторых, с пространственной фрагментарностью предоставляемой информации [11] о критической частоте: именно в этом регионе была возможность получать данные о критической частоте. Для нескольких пунктов этого региона были выбраны отдельные моменты времени различных годов одного цикла солнечной активности. Результаты оценки модели приведены в табл. 6. Модель использована в двух вариантах. В первом рассматривается исходный среднемесячный вариант. Во втором выполнена коррекция модели по критической частоте, значения которой получены в эти моменты времени из вертикального зондирования (ВЗ), данные которого размещены в общедоступной базе данных [11].

Можно видеть, что среднемесячный вариант ПЭМИм близок по точности моделирования ПЭС варианту модели NeQuick, что вполне естественно объясняется структурой модели ПЭМИм. Эта точность значительно уступает точности «ежедневной» модели Gemtec. В то же время выполненная коррекция на текущую ситуацию существенно увеличена точность описания моделью ПЭМИм значений ПЭС, которая для этого региона значительно

выше, чем в целом у модели Gemtec. Разумеется, ПЭМИм в варианте с коррекцией проблематично использовать в системе одночастотных приемников GPS, так как возникает проблема оперативного получения данных по критической частоте и передачи их в приемник. С другой стороны, это возможно при создании сети приемников, аналогичной сети дифференциальной коррекции.

Таблица 6

Оценка эффективности модели ПЭМИм

Станция	Дата	Время, ЛТ	f_oF2 , МГц, ПЭМИм	f_oF2 , МГц, ВЗ	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм	ПЭС, ТЕСУ ПЭМИм, Скор	ПЭС, ТЕСУ лаборатория CODG	Ошибка ТЕС	
								Без коррекции ТЕСУ	с коррекцией, ТЕСУ
Новосибирск	15.01.2000	6:00	3,7	2,9	6,1	4,8	5	0,22	0,04
Новосибирск	25.01.2000	6:00	3,9	2,2	6,8	3,1	3,1	1,19	0
Москва	10.01.2000	0:00	3,3	2,2	5,7	4,3	4,4	0,29	0,02
Москва	15.01.2000	12:00	10,5	8,2	37,5	28	28,7	0,3	0,025
Новосибирск	05.07.2000	0:00	7,1	7,6	16,4	18,4	18,8	0,12	0,022
Иркутск	10.01.2003	8:00	8,5	12,3	21	41,6	41,4	0,49	0,005
Иркутск	05.07.2003	20:00	5,0	5,9	8,5	10,7	10,5	0,19	0,02
Иркутск	10.01.2006	20:00	4,7	5,1	7,4	10,1	10,2	0,27	0,01
Иркутск	05.07.2006	8:00	2,7	4,1	3	7,1	6,9	0,56	0,03
Москва	20.01.2000	18:00	6,7	7,1	14,8	16	18,6	0,2	0,14
Новосибирск	10.07.2000	6:00	7,0	8,1	20,7	25,3	28,4	0,27	0,11
Иркутск	20.07.2003	20:00	5,3	4,7	14,1	13,2	11,6	0,21	0,13
Иркутск	05.01.2006	20:00	5,6	4,7	14,2	13,6	12	0,18	0,13
Иркутск	05.07.2006	20:00	3,7	4,6	4,5	7	8,2	0,45	0,15
Новосибирск	20.01.2000	18:00	6,7	7,5	16,3	20,9	25,5	0,38	0,18
Новосибирск	20.07.2000	18:00	7,2	8,1	21,1	24,1	31,1	0,32	0,22
Иркутск	25.01.2003	20:00	6,9	5,9	27,1	23,1	18,8	0,44	0,22
Средняя ошибка, %								35	8,9

Выводы

Наибольшую точность из рассмотренных моделей определения ПЭС для текущих условий показала в среднеширотном российском регионе модель ПЭМИм в режиме коррекции по оперативно получаемым значениям критической частоты. Таким образом, модель применима для исследований ПЭС в локальном регионе, обеспеченном возможностью получения оперативной информации по критическим частотам ионосферы. По такому же принципу может быть организована система уточнения данных сети одночастотных приемников сигналов ГНСС, расположенных вблизи одного опорного пункта.

Авторы выражают признательность В. Б. Иванову за предоставленные компьютерные программы и полезные рекомендации при выполнении работы, а также лаборатории CODG за предоставленные данные GIM.

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического развития ИГУ на 2012–2014 гг. (P212-OU-033).

Список литературы

1. Голыгин В. А. Адаптация к текущим условиям параметров ионосферного радиоканала по наблюдениям за сигналами реперных радиостанций / В. А. Голыгин, В. И. Сажин, В. Е. Унучков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 1. – С. 71–75.
2. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий / В. М. Поляков, В. Е. Суходольская, М. К. Ивельская, Г. Е. Сутырина, Г. В. Дубовская, М. Ю. Бузикова. – М. : МЦД-Б, 1986. – 136 с.
3. Коррекция модели ионосферы в нескольких высотных областях / В. И. Сажин, Е. М. Вдовин, В. А. Голыгин, М. К. Ивельская // Междунар. Байкал. молодеж. науч. шк. по фундам. физике «Взаимодействие полей и излучения с веществом»: тр. XIII конф. мол. ученых. Иркутск, 9–14 сент. 2013 г. – Иркутск : Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2013. – С. 129–132.
4. Центр прогнозов ИЗМИРАН [Электронный ресурс]. – IZMIRAN : сайт. – URL: <http://forecast.izmiran.rssi.ru/>.
5. International Reference Ionosphere 2012 [Электронный ресурс]. – URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html.
6. <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>.
7. *Ivanov V. B.* Global Empirical Modelling of the Total Electron Content of the Ionosphere for Satellite Radio Navigation Systems / V. B. Ivanov, G. D. Gefan, O. A. Gorbachev // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2011. – Vol. 73. – P. 1703–1707.
8. *Ivanov V. B.* The GEMTEC Model: Assessment of Quality of Ionospheric Correction in Satellite Radio Navigation Systems / V. B. Ivanov, O. A. Gorbachev, G. D. Gefan // Consumer Electronics Times. – 2012. – Vol. 1, Iss. 2. – P. 43–46.
9. *Klobuchar J. A.* Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronics System. – 1986. – Vol. 23, N 3.
10. *Radicella S. M.* The NeQuick model genesis, uses and evolution // Annals of Geophysics. – 2009. – Vol. 52, N 3/4. – P. 417–422.
11. SPIDR : SPIDR Home [Электронный ресурс]. The Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR). – URL: <http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp>.

Simulation of the Total Electron Content of the Ionosphere

V. I. Sazhin, E. M. Vdovin, A. I. Torshina

Abstract. Some methods for modeling of ionospheric total electron content (TEC), which is a good indicator of ionosphere status and trends, are considered. It was found that the most efficient model for the TEC determination is ionosphere model at the correction mode, based on the information about the critical frequency.

Keywords: Earth's ionosphere, total electron content of the ionosphere, mathematical model of the ionosphere, theoretical modeling of the ionosphere, global navigation satellite system.

Сажин Виктор Иванович
доктор физико-математических наук,
зав. кафедрой радиоп физики и радиоэлектроники
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-12-68

Sazhin Victor Ivanovich
Doctor of Sciences (Physics and
Mathematics), Head of the Radiophysics
and Radioelectronics Department
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52-12-68

Вдовин Евгений Михайлович
младший научный сотрудник
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-12-68

Vdovin Eugene Mikhailovich
Junior Research Scientist
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52-12-68

Торшина Анна Вадимовна
студент
Иркутский государственный университет
664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
тел.: (3952) 52-12-69

Torshina Anna Vadimovna
Student
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003
tel.: (3952) 52-12-69