

УДК 551.510.535

Поступила в редакцию12.05.2021 г.Опубликована30.05.2021 г.

ПРОСТОЙ АЛГОРИТМ АССИМИЛЯЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРНУЮ МОДЕЛЬ SIMP-STANDARD

К.Г. Цыбуля¹

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

Описывается алгоритм коррекции значений критической частоты ионосферного слоя F2, выдаваемых медианной ионосферной моделью за счет ассимиляции данных полного электронного содержания (ПЭС). Для тестирования в качестве базовой модели выбрана эмпирическая модель SIMP-STANDARD (System of Ionospheric Monitoring and Prediction). Данные о вертикальном ПЭС получены с сайта IGS (International GNSS Service) в виде карт в формате IONEX.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРНЫЕ МОДЕЛИ, АССИМИЛЯЦИЯ ДАННЫХ, ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_29_50

1. ВВЕДЕНИЕ

Эмпирическая модель SIMP-STANDARD (System of Ionospheric Monitoring and Prediction) охватывает ионосферные области D, E и F в диапазоне высот от 65 до 1000 км и дает возможность оценки критических частот и высот максимумов для соответствующих слоев, в первую очередь критической частоты слоя F2 (f_0 F2), на обсуждении которой мы и сосредоточимся. Как и у всех климатических моделей такого типа, выводимые значения являются усредненными за большой период времени наблюдений, т.е., наиболее типичными для данного сезона, местного времени, географических координат и солнечной активности. Достоинством таких моделей является возможность оценить плотность ионосферы, имея минимум данных. Однако при этом дается лишь достаточно грубая оценка ионосферных параметров (см., например, графики корреляций между измеренными (f_0 F2_{meas}) и модельными (f_0 F2_{mod}) значениями на рис. 1).

Данные для сравнения с моделью SIMP взяты с ряда российских ионосферных станций (Калининград, Горьковская, Мурманск, Москва, Электроугли, Ростов, Магадан, Амдерма, Салехард, Новосибирск, Диксон, Тикси, Подкаменная Тунгуска, Екатеринбург, Хабаровск, Тикси, Петропавловск, Певек). Данные для периодов высокой солнечной активности были взяты за 2014 г., для низкой – за 2020 г.

Хотя, как показывают многочисленные исследования, медианное значение определяется моделями верно, но разброс данных относительно медианы чрезвычайно высок. Если имеются экспериментальные измерения f_0 F2, по крайней мере в отдельных географических точках, возникает возможность совместить измеренные значения и модельную оценку для получения уточненных значений параметров. Для решения этой задачи можно использовать один из так называемых алгоритмов картирования. Эти математические методы позволяют сместить значения заданной на сфере функции в точках измерений к их измеренным значениям таким образом, что вся функция остается гладкой и осмысленной. Такой подход используется в ассимиляционной модели SIMP-2, которая позволяет скорректировать значения f_0 F2 с учетом данных ионосферного зондирования,

Электронная почта автора для переписки: Цыбуля Константин Григорьевич, e-mail:kgc@ipg.geospace.ru



поступающих с ионозондов в режиме реального времени при помощи метода мультиквадриков [1]. Также возможно применение популярного метода картирования, известного как кригинг [2].

Рис. 1. Корреляция между измеренными (f_oF2_{meas}) и модельными (f_oF2_{mod}) значениями критической частоты F2. Слева – для высокой солнечной активности (2014 г.), справа – для низкой солнечной активности (2020 г.).

Кроме точных измерений критической частоты, осуществляемых на нескольких десятках ионосферных станций, имеется также огромный объем данных, поступающих с многих сотен ионосферных приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Эти приемники намного проще и дешевле, чем полномасштабный ионосферный зонд, но поставляемые ими данные содержат лишь полное электронное содержание (ПЭС) вдоль лучей, связывающих наземный приемник со спутниками, однако их сеть гораздо плотнее. Например, в международной сети IGS (International GNSS Service) содержится более 500 станций, покрывающих практически всю доступную поверхность земного шара. По нескольким значениям наклонного ПЭС возможно восстановить вертикальное ПЭС над приемником, то есть число электронов в вертикальном столбе над одним квадратным метром поверхности. В России также имеется ряд сетей ГНСС-приемников, способных поставлять данные в реальном времени, в том числе и в Росгидромете.

Возможность ассимилировать эти данные в эмпирические модели резко расширила бы возможности мониторинга ионосферы за счет увеличения точности определения ионосферных параметров. Даже сама возможность пересчитывать значения вертикального ПЭС в f_0 F2, хотя бы приблизительно, нашла бы множество применений, поскольку данные о вертикальном ПЭС гораздо доступнее данных о критических частотах слоев. Если мировые карты вертикального ПЭС, например, те, что предоставляет IGS, являются двумерными, то модели имеют возможность вычислять вертикальные профили электронной концентрации, и сочетание этих двух типов информации дало бы трехмерную картину ионосферы, хотя бы в первом приближении.

2. АЛГОРИТМ АССИМИЛЯЦИИ И ПРИЧИНЫ ЕГО ВЫБОРА

Существует множество подходов для ассимиляции данных сетей приемников ГНСС в климатические модели [3–5]. Эти подходы очень различаются и по типу моделей, и по применяемым алгоритмам ассимиляции, и, следовательно, по сложности. В работах [6–8] в качестве базовой климатической модели используется NeQuick 2 – эмпирическая модель с близкой к SIMP идеологией. В работе [6], например, используется зависимость модельной f_0 F2 от солнечной активности, которая вводится в модель NeQuick как индекс солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$. Варьируя этот параметр, можно подогнать модельное ПЭС под реальное. При этом для определения вертикального ПЭС приходится интегрировать модельную электронную концентрацию от нижних слоев ионосферы до высоты орбиты спутников GPS (20000 км) для каждого значения $F_{10.7}$.

Для модели SIMP-STANDARD, однако, такой подход не является подходящим. Влияние солнечной активности на ионосферу в SIMP учитывается двояко – во-первых, как индекс числа солнечных пятен Rz, который влияет на фоновую модель, и во-вторых, как ионосферный индекс T, предоставляемый Австралийской ионосферной службой [9], от которого зависят 75 локальных моделей, созданных для отдельных ионосферных станций. Эти модели используются для уточнения значений f_0F2 и накладываются на фоновую модель при помощи алгоритмов картирования. Попытки варьирования каждого из этих двух индексов приводят к разным последствиям – индекс T сильнее влияет на величину ПЭС вблизи географических точек, где расположены станции с корректирующими локальными моделями, а варьирование индекса Rz в этих точках почти не оказывает действия. В точках, удаленных от станций, где влияние локальных моделей слабее, ситуация противоположная. Следует также учесть, что для лучшего учета зависимости от активности Солнца SIMP требует значения индексов за предыдущий, текущий и следующий месяц. Еще одна особенность вычисления ПЭС состоит в том, что модель NeQuick работает очень быстро, поэтому интегрирование ПЭС даже с малым шагом не занимает много времени. Модель SIMP-STANDARD более точная, но работает значительно медленнее и многократное интегрирование при подгонке происходит очень долго.



Рис. 2. Корреляция между отношением модельного ПЭС к измеренному (TEC_{mod}/TEC_{meas}) и квадратом отношения модельной f_oF2 к измеренной. Слева – высокая солнечная активность (2014 г.), справа – низкая солнечная активность (2020 г.).

Поэтому, чтобы произвести эффективную ассимиляцию данных вертикального ПЭС в модель SIMP-STANDARD и избежать глубинной переделки самой модели, был выбран намного более простой способ. Он основан на предположении, что, хотя и значения электронной концентрации в максимуме, и значения вертикального ПЭС могут сильно отклоняться от климатического среднего, эти отклонения происходят пропорционально. Иными словами,

$$\frac{TEC_{mod}}{TEC_{meas}} \approx \frac{N_m F2_{mod}}{N_m F2_{meas}} = \left(\frac{foF2_{mod}}{foF2_{meas}}\right)^2 \tag{1}$$

где TEC_{mod}, N_m F2_{mod} и f_o F2_{mod} – модельные значения ПЭС, пиковой электронной концентрации слоя F2 и критической частоты этого слоя, а индексом «meas» отмечены экспериментально измеренные значения. В последнем равенстве учтено, что электронная концентрация пропорциональна квадрату плазменной частоты. Это предположение неплохо выполняется даже при высокой солнечной активности (см. рис. 2), хотя, как видно, SIMP-STANDARD систематически занижает ПЭС. Для сравнения были выбраны те же периоды времени и станции, что и для анализа f_o F2 на рис. 1. Интересно,

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова

что корреляция между модельной и измеренной величиной ионосферной толщи (slab thickness) значительно хуже (ионосферной толщей называется отношение TEC/N_mF2).

Теперь можно переписать формулу (1) для $f_o F2_{corr}$ – модельной частоты, скорректированной за счет имеющихся данных по ПЭС



Рис. 3. Корреляция между измеренными значениями f_o F2 и модельной критической частотой, исправленной с помощью данных ПЭС с наземных приемников. Слева – высокая солнечная активность (2014 г.), справа – низкая солнечная активность (2020 г.).

Как видно из рис. 3, корреляция между этой величиной и измерениями гораздо более выражена, чем представленная на рис. 1 корреляция между неисправленной величиной f_oF2_{mod} и теми же измерениями. Ряд точек с низкими значениями f_oF2_{meas} и высокими f_oF2_{corr} связан с ошибками обработки сложных ионограмм. Имеющееся смещение от идеальной диагонали говорит, конечно, о том, что блок генерации профилей модели SIMP-STANDARD нуждается в значительных улучшениях. Однако на данном этапе достаточно аппроксимировать корреляционные зависимости, явно видимые на рис. 3 многочленом от f_oF2_{corr} , и с помощью этого многочлена произвести дополнительные поправки. Такой многочлен:

$$foF2'_{corr}(x) = -0.0133x^3 + 0.2298x^2 - 0.2563x + 1.6564$$
(3)

несколько уменьшает стандартные отклонения при тестировании модели, и, самое главное, устраняет возникающее систематическое отклонение, которое составляет около 0.5 МГц. Окончательный результат представлен на рис. 4 в виде гистограмм и в табл. 1 в виде среднеквадратических отклонений для разных станций



Рис. 4. Гистограммы отклонений от измеренной величины f_oF2: слева – без ассимиляции данных ПЭС, справа – с ассимиляцией.

Таблица 1. Среднеквадратические отклонения модельных значений f_0 F2 от измеренных, для разных станций,
разных сезонов и разных уровней солнечной активности, выраженные в МГц. Сверху – без ассимиляции ПЭС,
снизу – с ассимиляцией. Пустые ячейки означают отсутствие данных ионозонда за данный период.

Станция	Лето		Зима		Равноденствие	
	2014	2020	2014	2020	2014	2020
1	2	3	4	5	6	7
1. Калининград		0.74	4.15	1.72		1.39
		0.45	1.09	0.57		0.30
2. Горьковская		0.64		1.73		1.52
		0.34		0.61		0.35
3. Мурманск	0.76	0.48		1.15	2.93	1.15
	0.41	0.26		0.65	1.81	0.31
4. Электроугли	0.89	0.81	4.32	1.72	3.42	1.42
	0.57	0.45	1.27	0.67	0.57	0.39
5. Москва	0.91	0.81	4.47	1.73	2.73	1.40
	0.70	0.46	2.09	0.65	0.55	0.37
6. Ростов	1.15	1.03	4.29	1.65	2.83	1.33
	0.64	0.52	1.23	0.66	0.51	0.40
7. Екатеринбург		0.74		1.87		1.52
		0.43		0.64		0.35
8. Амдерма		0.43		1.01		1.26
		0.21		0.60		0.35

	Продолжение табл							
1	2	3	4	5	6	7		
9. Салехард	0.74	0.42	2.66	1.36	3.22	1.29		
	0.45	0.28	1.00	0.63	2.33	0.34		
10. Новосибирск		0.66		2.21		1.51		
		0.36		0.85		0.47		
11. Диксон				0.93		1.02		
				0.89		0.39		
12. Подкаменная Тунгуска	0.76	0.57	4.70	2.43	3.52	1.58		
	0.57	0.32	1.57	0.87	0.79	0.47		
13. Хабаровск	1.00	0.92		1.79	3.57	1.10		
	0.68	0.42		0.72	3.66	0.41		
14. Тикси		0.42		0.91		1.03		
		0.21		0.64		0.42		
15. Магадан	0.85	0.71	3.92	1.75	2.60	1.46		
	0.60	0.50	1.52	0.79	0.84	0.47		
16. Петропавловск		0.72		1.79		1.18		
		0.56		0.77		0.44		
17. Певек						1.18		
						0.46		

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение алгоритмов ассимиляции данных ПЭС в модель SIMP-STANDARD значительно улучшает точность модели, даже если используются относительно простые алгоритмы. Методику можно использовать практически для расчетов *f*_oF2 по имеющимся значениям ПЭС. Обнаружено, что модуль расчета профилей SIMP-STANDARD нуждается в улучшениях или даже полной переработке.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-05-80023.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Hardy R. L.*, Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces // J. Geophys. Res. 1971. Vol. 67. P. 1905-1915.
- 2. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра, 1990.
- 3. Schunk, R. W., et al., Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM), Radio Sci., 2004, vol. 39, RS1S02, doi:10.1029/2002RS002794.
- 4. *Wang, C., G. Hajj, X. Pi, I. G. Rosen, and B. Wilson*, Development of the Global Assimilative Ionospheric Model, Radio Sci., 2004, 39, RS1S06, doi:10.1029/2002RS002854.
- 5. *Angling, M. J., and B. Khattatov.* Comparative study of two assimilative models of the ionosphere, Radio Sci., 2006, vol. 41, RS5S20, doi:10.1029/2005RS003372.
- Nava B., S.M. Radicella, F. Azpilicueta. Data ingestion into NeQuick 2. // Radio Science, 2011, vol. 46, RS0D17, doi:10.1029/2010RS004635.
- Nava, B., P. Coïsson, G. Miró Amarante, F. Azpilicueta, and S. M. Radicella. A model assisted ionospheric electron density reconstruction method based on vertical TEC data ingestion, Ann. Geophys., 2005, 48(2), P. 313–320.

.

- 8. Nava, B., S. M. Radicella, R. Leitinger, and P. Coïsson, A near real-time model-assisted ionosphere electron density retrieval method, Radio Sci., 2006, vol. 41, RS6S16, doi:10.1029/2005RS003386.
- 9. *Caruana J.*, The IPS monthly T index, Solar-Terrestrial Predictions // Proc. of a Workshop at Leura, Australia Oct 16–20, 1990. P. 257-263.

A SIMPLE ALGORITHM FOR ASSIMILATING TOTAL ELECTRON DATA INTO THE IONOSPHERIC MODEL SIMP-STANDARD

Tsybulya K.G.

This article describes an algorithm that allows to correct the F2-layer critical frequency produced by a median ionospheric model with help of the total electron data assimilation. To test the algorithm the SIMP-STANDARD empirical model was chosen as a background and the total electron content data were taken from the IGS database as files in the IONEX format.

KEYWORDS: IONOSPHERIC MODELS, DATA ASSIMILATION, TOTAL ELECTRON CONTENT.