

ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕГИОНАЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ТЕС ПО ДАННЫМ GNSS С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ NeQuick2 И УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИГИНГА

И.А. Павлов^{1,2,3}, А.М. Падохин^{1,2,3}

¹МГУ им. М. В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,
theevent1115@gmail.com

²ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

³ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

RECONSTRUCTION OF REGIONAL TEC DISTRIBUTIONS FROM GNSS DATA, USING NeQuick2 MODEL AND UNIVERSAL KRIGING

I.A. Pavlov^{1,2,3}, A.M. Padokhin^{1,2,3}

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia,
theevent1115@gmail.com

²IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia

³ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia

Аннотация. Надёжная оценка параметров ионосферы важна для многих практических задач, включая спутниковую навигацию, локацию, КВ радиосвязь. Одним из широко используемых для описания состояния ионосферы параметров является ТЕС (полное электронное содержание), которое может быть оценено с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем ГНСС. Вместе с тем для практических задач большой интерес представляет не интегральная характеристика — ТЕС, а непосредственно пространственно-временное распределение электронной концентрации в ионосфере. В настоящем докладе предлагается оригинальный метод региональной ассимиляции данных ТЕС в модель NeQuick2, основанный на одностанционных оценках абсолютного вертикального ТЕС исключительно по двухчастотным фазовым данным ГНСС и интерполяции поля эффективного управляющего параметра модели $F10.7$ с использованием универсального кригинга с учётом пространственной корреляции параметров ионосферы. В докладе приводятся данные сравнения скорректированной модели с результатами вертикального зондирования ионосферы, свидетельствующие об эффективности предложенного в работе подхода.

Ключевые слова: ионосфера, моделирование, ассимиляция данных, прогноз.

Abstract. Reliable estimation of ionospheric parameters is important for many practical problems, including satellite navigation, location, and HF radio communications. One of the parameters widely used to describe the state of the ionosphere is TEC (total electron content), which can be estimated using data from global navigation satellite systems GNSS. At the same time, for practical problems, it is not the integral characteristic — TEC — that is of greater interest, but the spatiotemporal distribution of electron concentration in the ionosphere itself. This paper proposes an original method for regional assimilation of TEC data into the NeQuick2 model, based on single-station estimates of absolute vertical TEC exclusively from dual-frequency GNSS phase data and interpolation of the effective control parameter field of the $F10.7$ model using universal kriging, taking into account the spatial correlation of ionospheric parameters. The report provides data comparing the adjusted model with the results of vertical sounding of the ionosphere, indicating the effectiveness of the approach proposed in the work.

Keywords: ionosphere, modeling, data assimilation, forecast.

ВВЕДЕНИЕ

Коррекция ионосферных моделей является актуальной задачей в контексте прогноза космической погоды и распространения радиоволн. Алгоритмы адаптации позволяют наилучшим образом объединить текущую информацию о среде и её модельные оценки. Существует множество работ по ассимиляции различных типов данных в модель, из которых наиболее распространённый вариант — использование данных ГНСС станций полного электронного содержания для коррекции медианных моделей. Такой выбор обусловлен прежде всего наличием большого числа приёмных станций для различных навигационных систем, а также их доступностью для широкого набора времен. Для задач радиораспространения, в частности задач наклонного зондирования, особо важно иметь надёжные оценки трёхмерных параметров ионосферы — распределение электронной концентрации, и, следовательно, критической частоты максимума $F2$ -слоя. Для выбранной модели NeQuick2 [Nava et al, 2008] плотность электронов зависит от географических координат,

месяца, времени и задаётся единственным управляющим параметром $F10.7$ — потоком солнечного излучения на длине волны 10.7 сантиметров. Параметр является глобальным и предоставляется обсерваториями одним значением для каждого дня. Таким образом, целью данной работы является региональная коррекция модели NeQuick2 по управляющему параметру $F10.7$ по данным вертикального ТЕС в Европе двумя методами: первый — подбор одного эффективного $F10.7$ для всего региона, второй — расчёт поля эффективного $F10.7$ с использованием универсального кригинга. Для оценки эффективности данного метода было предложено произвести валидацию по критической частоте f_oF2 , полученной по данным ионозондов, тем самым проверялась возможность использования данных способов коррекции для задач радиозондирования.

КОРРЕКЦИЯ ПО ЭФФЕКТИВНОМУ СРЕДНЕМУ $F10.7$

В работе приведены результаты для одного дня 2019-08-03, с Kp не превышающем 3. Спутниковые

данные сети станций IGS, переводились в формат вертикального полного электронного содержания с интервалом 15 мин [Yasyukevich et al., 2015].

Один из наиболее простых методов коррекции — это минимизация квадрата нормы отклонения наблюдаемого вертикального TEC и модельного в каждый момент времени методом наименьших квадратов по управляющему параметру $F10.7$. Такая процедура производилась для каждой станции в Европейском регионе, в результате был получен массив данных с географическим положением станции и эффективным $F10.7$ для каждого момента времени. Усреднив полученные значения эффективных параметров было вычислено региональное значение $F10.7_{\text{eff}}$, которое используется при построении регионального поля вертикального TEC, представленного на рис. 1 для 2UT и 12UT. Видно, что в ночное время значения TEC при коррекции превышают полученные по измеряемому $F10.7$, обратное верно для дневных рисунков, что свидетельствует об адаптации модели к данным в регионе.

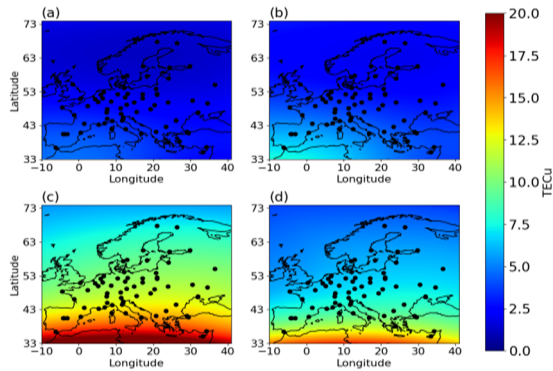


Рис. 1. Распределение полного электронного содержания по модели NeQuick2 для ночного периода (2 UT, панели (a) и (b)) и дневного (12 UT, панели (c) и (d)). Левые рисунки построены для измеряемого значения $F10.7 = 72$, правые для эффективного значения $F10.7$

КОРРЕКЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИГИНГА

Кригинг — метод пространственной интерполяции, минимизирующий дисперсию отклонения модели от данных [Демьянов, Савельева, 2010]. Для учета пространственного градиента исходных данных в работе использовался универсальный

кригинг с линейным трендом по широте и долготе. Также для корректной работы алгоритма необходимо разумно осуществлять выбор вариограммы, описывающей вариацию разницы значений переменной в двух точках как функцию от расстояния между ними и направления (h). В работе была использована модель стабильной вариограммы, описываемой формулой 1:

$$\gamma(h) = c_0 + c \left[1 - \exp\left(\frac{-h^\alpha}{a}\right) \right], \quad (1)$$

где c_0 — «nugget» — параметр, учитывающий неопределенность в интерполируемых данных, c — «still» — параметр, описывающий высоту подъема вариограммы, a — «range» — расстояние, на котором данные влияют друг на друга.

Оценка параметров производилась с помощью аппроксимации эмпирической вариограммы в каждый момент времени, а в качестве исходных данных использовался массив данных $F10.7$, полученный на предыдущем этапе коррекции. Необходимо отметить, что при радиусе корреляции больше, чем размер региона, интерполированный $F10.7$ ведет себя как глобальный параметр, в ином случае становится возможным выделить локальные особенности в полном электронном содержании, показанные на рис. 2. На рис. 3 показан суточный ход TEC для станции BRUX, который подтверждает эффективность методов адаптации модели, приближая модельную кривую к реальным данным.

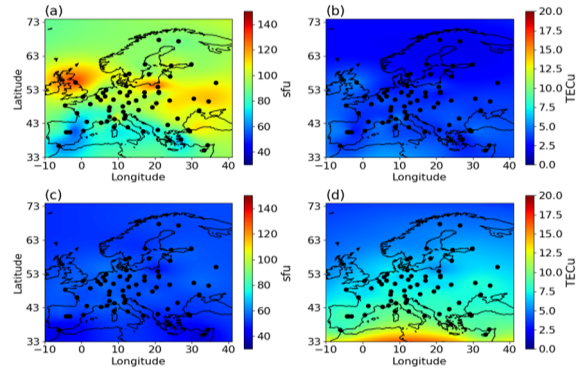


Рис. 2. Поле интерполированного эффективного $F10.7$ для ночного периода (2 UT, панели (a) и (b)) и дневного (12 UT, панель (c)). На рисунках (c) и (d) изображено распределение вертикального TEC для соответствующих полей $F10.7$

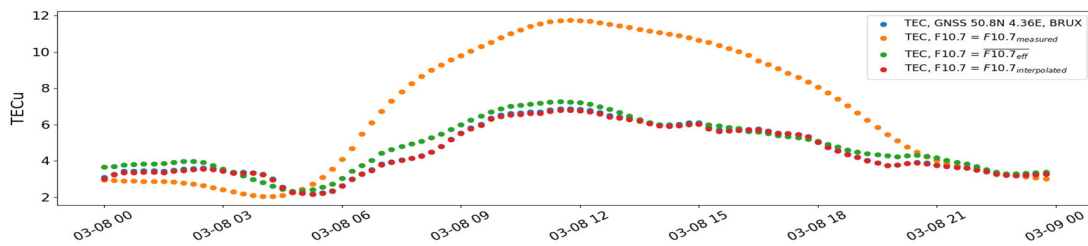


Рис. 3. Значения измеренного полного электронного содержания (синяя кривая) и восстановленного по модели при использовании различных значений $F10.7$: измеряемого (оранжевая кривая), среднего для региона (зеленая), интерполированного (красная)

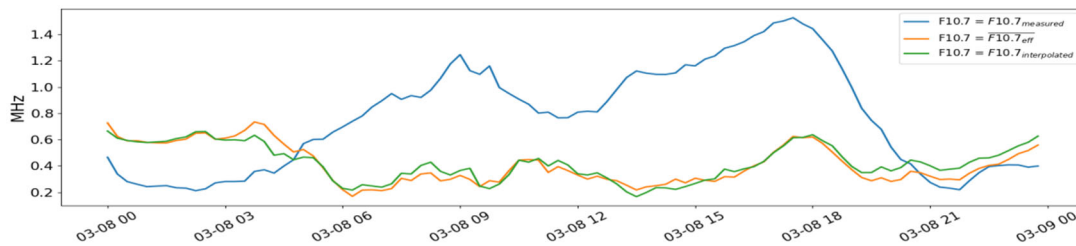


Рис. 4. Значения средней абсолютной ошибки $foF2$ для отклонения модели и данных при различных значениях $F10.7$. Для измеряемого (синяя кривая), среднего для региона (оранжвая), интерполированного (зеленая)

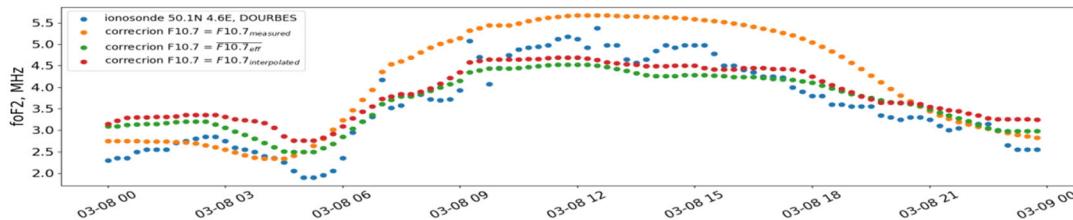


Рис. 5. Значения измеренной критической частоты $foF2$ (синяя кривая) и восстановленной по модели при использовании различных значений $F10.7$: измеряемого (оранжевая кривая), среднего для региона (зеленая), интерполированного (красная)

Для верификации результатов коррекции было произведено сравнение восстановленных по адаптированной модели критических частот $foF2$ с наблюдаемыми на ионозондах сети GYRO. В качестве метрики была выбрана средняя абсолютная ошибка, изображенная на рис. 4. Наилучшим образом $foF2$ восстанавливается в случае использования среднего эффективного и интерполированного $F10.7$, причем два способа коррекции улучшают результаты моделирования критической частоты и их соответствие данным наблюдений днем и ухудшают ночью. В дневные часы отклонение от наблюдаемой $foF2$ по всему региону не превышает 0.65 МГц, для измеряемого значения отклонение не превышает 1.55 МГц. В ночные часы при коррекции наблюдается увеличение значений $foF2$ по сравнению с использованием модели с глобальным значением $F10.7$. Для иллюстрации на рис. 4 приведены результаты для ионозонда DOORBES, расположенного вблизи с ГНСС приемником BRUX.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в работе два способа коррекции модели по сети станций ГНСС в Европе показали свою эффективность при восстановлении

распределений полного электронного содержания. Во-первых, коррекция заданием поля эффективного параметра $F10.7$ в регионе позволяет оценить среднемасштабные структуры в ТЕС. Во-вторых, днем наблюдается лучшее согласие модельных и экспериментальных данных $foF2$ при использовании обоих методов коррекции, вместе с тем ночью лучший результат достигается при нескорректированном, наблюдаемом значении $F10.7$. Это свидетельствует о возможной некорректной параметризации профиля электронной концентрации на высотах выше максимума $F2$ -слоя в ночные часы в модели NeQuick2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys.* 2008. V. 70, N 15. P. 1856–1862.
- Yasyukevich Y.V. et al. Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015. V. 55. P. 763–769.
- Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоэстатистика: теория и практика. 2010.