

## АПРОБАЦИЯ МЕТОДА КОРРЕКЦИИ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ ГНСС В СИБИРСКОМ РЕГИОНЕ

<sup>1,2</sup>Д.С. Котова, <sup>3</sup>В.Б. Оводенко, <sup>4</sup>Ю.В. Ясюкевич, <sup>1,2</sup>М.В. Клименко,  
<sup>4</sup>А.А. Мыльникова, <sup>4</sup>К.Г. Ратовский

<sup>1</sup>Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия

<sup>2</sup>Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>3</sup>ОАО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи»,  
Москва, Россия

<sup>4</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
darshu@ya.ru

## TESTING THE METHOD OF IONOSPHERE MODEL CORRECTION, USING GNSS DATA IN SIBERIA

<sup>1,2</sup>D.S. Kotova, <sup>3</sup>V.B. Ovodenko, <sup>4</sup>Yu.V. Yasyukevich, <sup>1,2</sup>M.V. Klimenko,  
<sup>4</sup>A.A. Mylnikova, <sup>4</sup>K.G. Ratovsky

<sup>1</sup>West Department of Pushkov IZMIRAN, RAS, Kaliningrad, Russia

<sup>2</sup>Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

<sup>3</sup>Joint Stock Company Scientific Research Institute of Long-Distance Radio Communication, Moscow, Russia

<sup>4</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** Представлены предварительные результаты метода коррекции эмпирической модели ионосферы NeQuick по данным наклонного полного электронного содержания. По станциям вертикального зондирования в Иркутске и Норильске проведено сравнение результатов коррекции модели. Показано, что предложенный метод нуждается в доработке, расширении массива данных измерений и привлечения дополнительных инструментов для более точной коррекции модели.

**Ключевые слова:** ГНСС, модель ионосферы, критическая частота F2 слоя, коррекция.

**Abstract.** The preliminary results of the ionosphere model updating method with the slant TEC data were presented. The results of model correction compare with observation data of vertical sounding stations in Irkutsk and Norilsk. It is shown that the proposed method needs to be improved, the array of measurement data should be enlarged and additional tools for more accurate updating of the model should be added.

**Keywords:** GNSS, ionospheric model, F2 layer critical frequency, correction.

---

### Введение

В последние годы значительно увеличился интерес к задачам исследования и разработки новых методов диагностики ионосферы. Широкие возможности изучения и мониторинга состояния ионосферы предоставляют глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS и ГЛОНАСС и наземная сеть приемников сигналов этих спутниковых систем [Hofmann-Wellenhof et al., 1992; Афраймович, Перевалова, 2006]. Обработка сигналов ГНСС позволяет непрерывно вычислять абсолютное полное электронное содержание (ПЭС) в направлении на каждый спутник [Ясюкевич и др., 2015]. Данные по абсолютным значениям ПЭС стали использовать для коррекции эмпирических моделей ионосферы [Maltseva et al., 2012; Migoya-Oru e et al., 2015; Ovodenko et al., 2015]. Тем самым были достигнуты улучшения в описании распределения электронной концентрации. В указанных работах коррекция проводилась для средних широт с использованием справочной ионосферой модели IRI. В настоящей работе представлены предварительные результаты коррекции эмпирической модели NeQuick [Nava et al., 2008] на основе данных абсо-

лютного наклонного ПЭС в Сибирском регионе. Использовались данные приемников GPS сигнала в Иркутске (52° N, 104° E) и Норильске (69° N, 88° E), которые описывают как среднеширотную, так и высокоширотную область ионосферы.

### Описание метода коррекции

Метод коррекции параметров модели ионосферы по данным наклонного ПЭС заключается в поиске оптимального значения управляющего параметра модели. В модели NeQuick таким параметром является индекс солнечной активности  $Rz12$ . Диапазон изменения параметра  $Rz12$  находится в пределах от 0 до 150. Критерием подбора  $Rz12$  является минимальность суммы квадратов невязок между модельными и спутниковыми данными о ПЭС. Для апробации метода были выбраны следующие дни: 22 марта, 22 июня, 22 сентября и 18 декабря, которые соответствуют магнитоспокойным дням ( $K_p$  индекс не превышал 3,  $Dst = -10$  нТ) равноденствия и солнцестояния. Начальным приближением  $Rz12$  на первом этапе коррекции является его прогнозное значение  $Rz12$  для конкретного месяца, сглаженное тринадцатимесячным фильтром [<http://irimodel.org/>

indices/ig\_rz.dat]. Далее для выбранных станций приема GPS сигналов происходит коррекция модели в секторе  $360^\circ$  с использованием данных от навигационных спутников, угол места которых превышает  $45^\circ$ . Выборка спутников по времени лежит в интервале  $\pm 5$  мин от выбранного времени корректировки (например, с 13:55 по 14:05). В заданные ограничения укладывается несколько значений ПЭС с одного спутника, поэтому за накопленное время выбирается среднее значение. Для исследования были отобраны результаты корректировки с шагом по времени 2 ч. Для каждого направления на спутник рассчитывается значение ПЭС по модели и вычисляется невязка между спутниковым и модельным ПЭС. Далее рассчитывается сумма квадратов невязок. Изменяя значение Rz12, корректируется модельное ПЭС и пересчитывается невязка для каждой станции. Таким способом минимизируется сумма квадратов невязок в секторе.

### Результаты коррекции

На рис. 1 и 2 для четырех сезонов представлено сравнение результатов корректировки в виде суточных вариаций критической частоты  $F_2$  слоя,

$f_oF_2$ , с результатами модели NeQuick, данными наблюдений станций вертикального зондирования для Иркутска и Норильска соответственно. Также на этих рисунках представлено поведение Rz12 без корректировки и с корректировкой. Сравнение модельных и экспериментальных данных о суточном поведении  $f_oF_2$  показало незначительные улучшения в результате коррекции: критическая частота при варьировании Rz12 приблизилась к наблюдаемой для Иркутска в марте в период с 23 до 14 UT, в июне — с 01 до 11 UT, в 16 и 23:24 UT, в сентябре — с 10 до 17 UT, в декабре — с 11 до 14 UT. Для Норильска улучшения в марте наблюдались в период с 11 до 24 UT, в сентябре — с 01 до 14 UT, в декабре — в 15, 20:24 UT. В июле для высокоширотной станции Норильск коррекция не привела к улучшению модели. Стоит отметить, что в целом модельные расчеты NeQuick с прогнозным значением Rz12 хорошо описывают суточный ход  $f_oF_2$ . Из графиков видно, что в некоторых случаях (например, для Иркутска в марте) увеличение предельного значения параметра Rz12 ( $>150$ ) должно было привести к лучшему согласию данных наблюдений и результатов модельных расчетов.

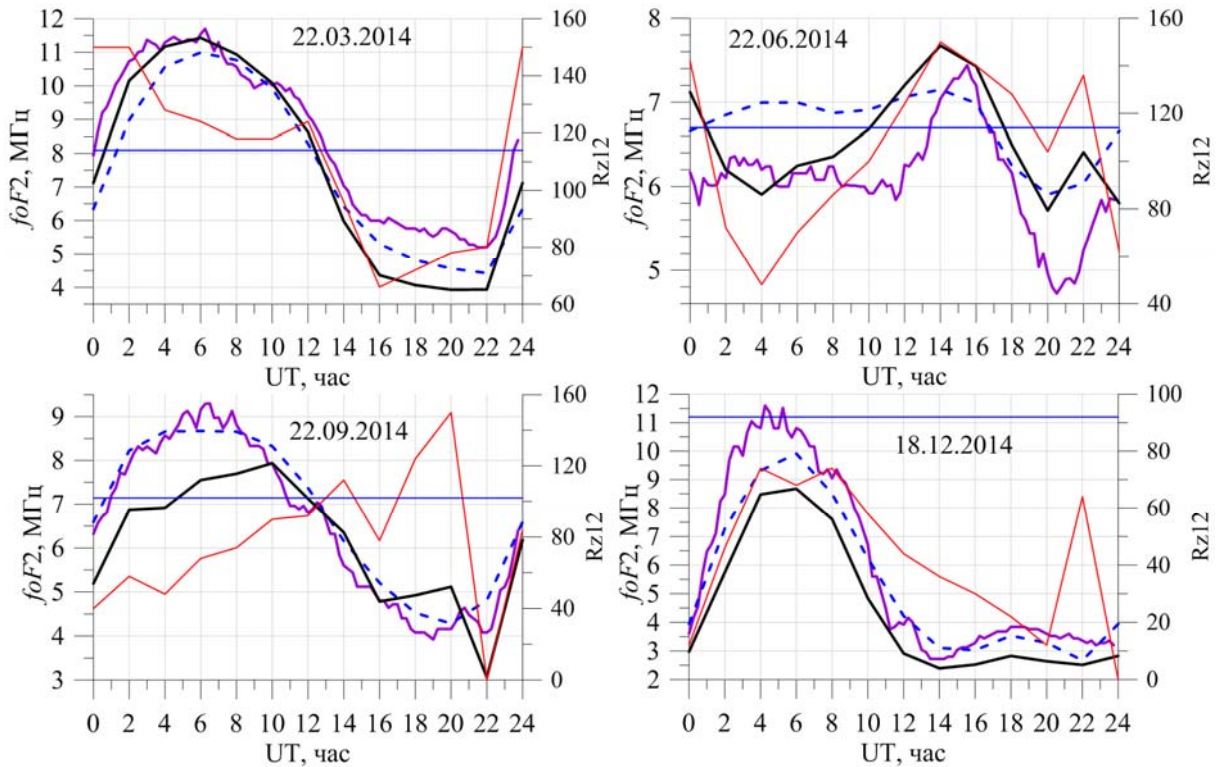


Рис. 1. Суточные вариации  $f_oF_2$  над Иркутском по данным наблюдений (фиолетовые линии) и по результатам модельных расчетов NeQuick: без коррекции (синяя пунктирная линия) и с коррекцией (черная сплошная линия). Прогнозные значения Rz12 показаны прямой синей линией, скорректированные значения Rz12 — красной сплошной линией. Ось для Rz12 показана справа

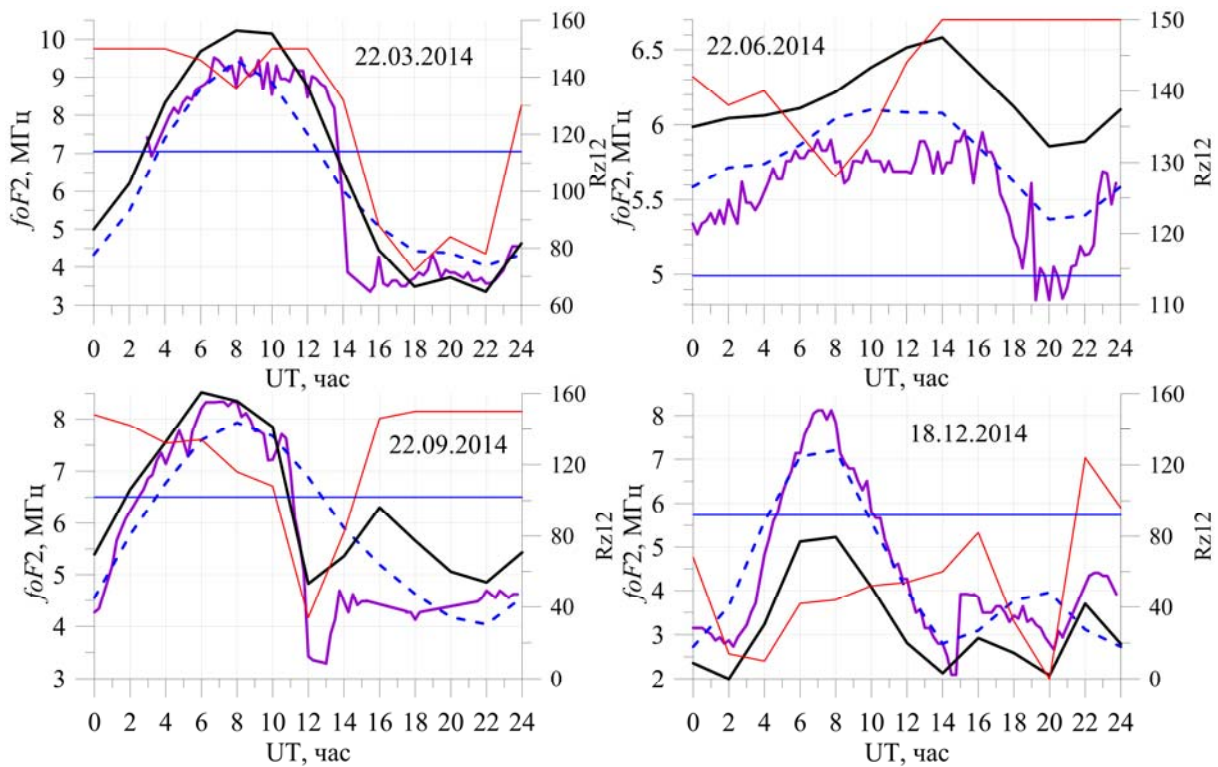


Рис. 2. То же, что на рис. 1, только для Норильска

### Заключение

Предварительные результаты апробации метода коррекции эмпирической модели NeQuick по данным наклонного ПЭС в Иркутске и Норильске показали, что в целом предложенный метод может приводить к улучшению результатов модельных расчетов. Результаты коррекции в Иркутске лучше, чем в Норильске. В высокоширотной области по сравнению со средними широтами проведение такого рода корректировки затруднено. Это связано с наличием большого числа неоднородностей в высокоширотной ионосфере, а также сложной долготно-широтной структурой распределения электронной концентрации, которая не воспроизводится в моделях подобных IRI [Karpachev et al., 2016]. Используемый в работе метод нуждается в усовершенствовании путем использования данных от большего количества станций, а также снятия программного ограничения в модели NeQuick.

Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН). Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-6831.2016.8 (Оводенко В.Б.) и программы повышения конкурентоспособности «5-100» БФУ им. И.Канта.

### Список литературы

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Ясюкевич Ю.В., Мильникова А.А., Куницын В.Е., Падохин А.М. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. 55, № 6. С. 790–796. DOI: 10.7868/S0016794015060176.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. Springer-Verlag, Wien, New York, 1992. 327 p.
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2016. V. 146. P. 149–159. DOI: 10.1016/j.jastp.2016.05.008.
- Maltseva O., Mozhaeva N., Poltavsky O., Zhbakov G. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. 2012. V. 49, no. 6. P. 1076–1087. DOI: 10.1016/j.asr.2012.01.005.
- Migoya-Orué Y., Nava B., Radicella S., Alazocuartas K. GNSS derived TEC data ingestion into IRI 2012 // Adv. Space Res. 2015. V. 55. P. 29–41. DOI: 10.1016/j.asr.2014.12.033.
- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2008. V. 70. P. 1856–1862. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.
- Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // Adv. Space Res. 2015. V. 56, no. 5. P. 900–906. URL: [http://irimodel.org/indices/ig\\_rz.dat](http://irimodel.org/indices/ig_rz.dat) (дата обращения 25.02.2017).