

КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛИ NeQuick В ВЫСОКОШИРОТНОМ РЕГИОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАКЛОННОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Д.С. Котова^{1,2}, В.Б. Оводенко^{1,3}, Ю.В. Ясюкевич⁴, М.В. Клименко^{1,2}, А.А. Мыльникова⁴,
А.Е. Козловский⁵

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград, e-mail: darshu@yandex.ru, maksim.klimenko@mail.ru

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

³ОАО «Научно-производственный комплекс «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», Москва, e-mail: ovodenko@gmail.com

⁴Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru, manna@mail.iszf.irk.ru

⁵Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия, alexander.kozlovsky@oulu.fi

Аннотация. Представлены результаты коррекции эмпирической модели ионосферы NeQuick по данным наклонного полного электронного содержания (ПЭС) для трассы Ловозеро – Соданкюля для четырех выбранных дней 2014 года: 22.03, 22.06, 22.09 и 18.12. Проведено сравнение результатов коррекции модели с данными наблюдений станции вертикального зондирования в Соданкюля по критической частоте слоя F2. Улучшения модельных расчетов после коррекции получены для весеннего равноденствия (за исключением ночных условий), а также для ночных и вечерних условий 18 декабря. В дни осеннего равноденствия и летнего солнцестояния коррекция привела к ухудшению модельного описания. Проведено исследование зависимости плазмосферного и ионосферного электронного содержания (ЭС) от Rz12 для дневных и ночных условий. Днем плазмосферное ЭС с ростом индекса солнечной активности возрастает, ночью в марте и декабре при увеличении солнечной активности увеличивается ПЭС, но не плазмосферное ЭС. Это указывает на проблему модели NeQuick в описании зависимости от солнечной активности высотного профиля электронной концентрации выше максимума F2 слоя.

Введение

Данные глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) активно используются как для исследования ионосферы, так и в последнее время для проведения коррекции параметров ионосферных моделей [Ясюкевич и др., 2017; Maltseva et al., 2012; Migoya-Orué et al., 2015]. В работе [Ovodenko et al., 2015] представлены результаты коррекции международной справочной модели IRI-2007 для среднеширотного региона (Калининград), которые показали ее эффективность, в том числе для задачи восстановления критической частоты F2 слоя, $foF2$. Однако вопрос эффективности предложенной методики адаптации эмпирических моделей ионосферы в условиях высоких широт все еще изучен и проработан недостаточно. В настоящей работе представлено исследование предложенного для высокоширотного региона метода коррекции, а также его дальнейшее развитие, которое заключалось в снятии программного ограничения в NeQuick [Nava et al., 2008] на предельное значение управляющего параметра модели Rz12, диапазон изменения которого находился в пределах от 0 до 150.

Выбор области обусловлен сложностью физики высокоширотной и авроральной ионосферы, а также малым количеством инструментария для ее исследования. Существует и ряд проблем при использовании данных GPS/ГЛОНАСС для расчета полного электронного содержания в этом регионе. В работе [Themens et al., 2014] показано, что использование GPS/ГЛОНАСС в полярных областях затруднено, т.к. значения дифференциальных кодовых задержек, оцениваемые несколькими научными центрами, не корректны. В результате этого, для использования данных полного электронного содержания (ПЭС) в полярных регионах необходимо проведение дополнительных исследований.

Постановка задачи

Коррекция эмпирической модели ионосферы заключается в минимизации невязки между экспериментальными данными абсолютного ПЭС, получаемыми с помощью ГНСС, и модельными расчетами ПЭС для той же геометрии зондирования [Ovodenko et al., 2015; Ясюкевич и др., 2017]. Для исследований в высокоширотном регионе методика была разделена на два этапа. На первом этапе происходит коррекция модели с использованием данных от спутников, угол места которых выше 45° без ограничения по азимуту. Для каждого углового направления на спутник рассчитывается значение ПЭС по модели и вычисляется

невязка между измеренным и модельным ПЭС. Далее рассчитывается сумма квадратов невязок. Изменяя значение $Rz12$, корректируется модельное ПЭС и пересчитывается невязка. Второй этап аналогичен первому, за исключением селекции спутников по азимуту и углу места. В азимутальном направлении выделяется 18 подсекторов по 20° каждый. В каждом подсекторе отбираются спутники с углом места менее 45° . Результатом коррекции является массив значений $Rz12$ для каждого азимутального сектора. Были проведены расчёты, направленные на проверку гипотезы о возможности восстановления $foF2$ по данным ПЭС. Для этого из результатов коррекции были отобраны азимутальные направления, соответствующие трассе Ловозеро-Соданкюля. По скорректированным значениям $Rz12$ в модели NeQuick рассчитывалось значение $foF2$, которое сопоставлялось с измеренным значением по ионозонду.

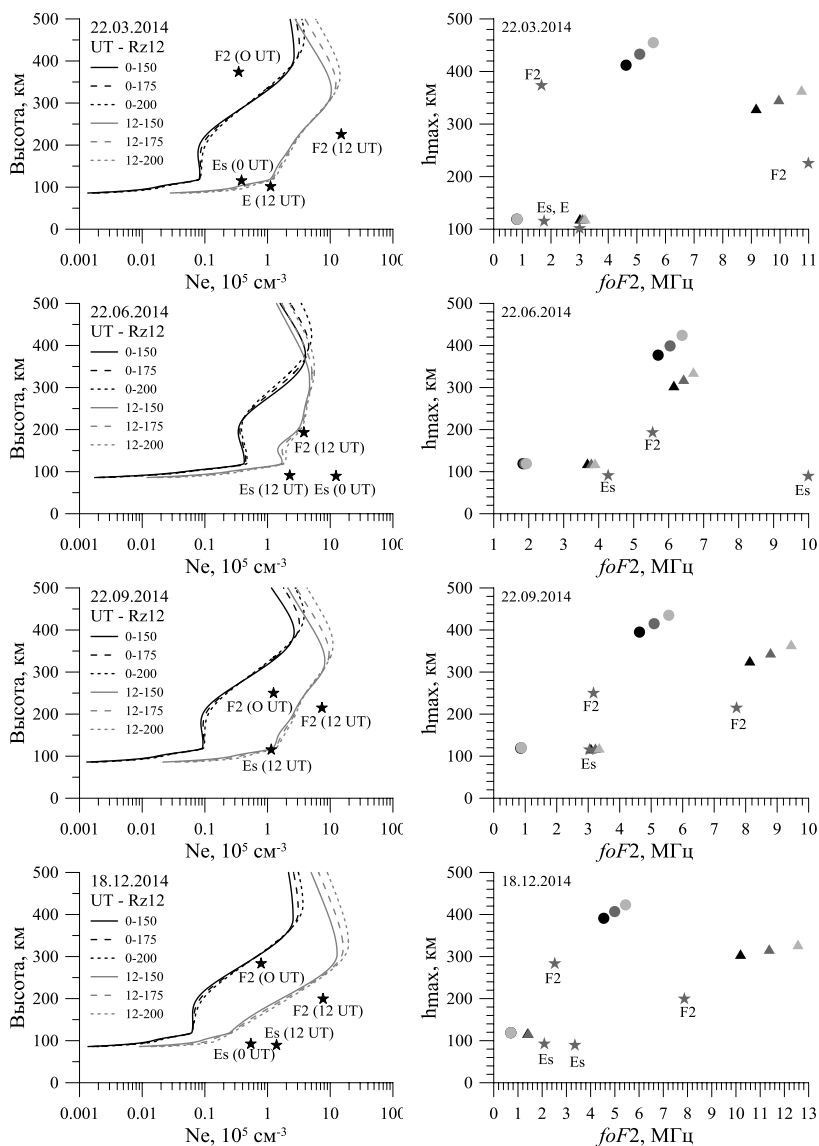


Рисунок 1. Слева показаны профили электронной концентрации по модели NeQuick для 0 и 12 UT для 22.03., 22.06., 22.09. и 18.12.2014 г. над обсерваторией Соданкюля при разных значениях $Rz12$ (150 – сплошная линия, 175 – штриховая и 200 – пунктирная) черным цветом для ночных (0 UT или 3 LT) и серым цветом для дневных (12 UT или 15 LT) условий. Справа для тех же условий представлено поведение параметров F и E слоев (критические частоты и высоты максимума). В ночных условиях результаты представлены кружками, в дневных – треугольниками. Черному цвету соответствует $Rz12 = 150$, серому – 175, светло-серому – 200. На рисунках звездочками показаны данные ионозонда в Соданкюля.

Результаты

Для проверки результатов коррекции модели использовались данные ионозонда высокоширотной геофизической обсерватории Соданкюля (SOD). Расчеты проводились для дней весеннего и осеннего равноденствия и летнего солнцестояния: 22 марта, 22 июня, 22 сентября 2014 г., а также для 18 декабря. Этот год соответствовал среднему уровню солнечной активности, дни – магнитоспокойным: Кр индекс не превышал 3, Dst – -10 нТ. Для исследования были отобраны данные ПЭС на станции Ловозеро с промежутком 2 часа.

Убрав программное ограничение на $Rz12$ в модели NeQuick, мы построили для различных сезонов зависимость профиля электронной концентрации от значения $Rz12$ (рис. 1) для дневных и ночных условий. Также для проведения сравнения мы отметили данные наблюдений параметров слоев F и E (высоты максимума и критической частоты). Как видно из рис. 1, модель NeQuick не описывает корректно высотную структуру электронной плотности высокоширотной ионосферы: 1) высота максимума $F2$ слоя в результате модельных расчетов располагается в дневных условиях на 100 км выше, чем в эксперименте, в ночных условиях на ~ 30 -130 км выше; 2) днем 22.03. критическая частота $F2$ слоя приближается к наблюдаемой при увеличении $Rz12$ (до значения 200), в остальных месяцах модельная $foF2$ больше наблюдаемой; 3) в ночных условиях критическая частота много больше (порядка 2-3 МГц) наблюдаемой в F области и меньше в E слое на ~ 1 МГц.

После снятия ограничения на $Rz12$ были проведены расчеты по методике, описанной выше, для

приемника ГНСС в Ловозеро (LOZ). Был получен массив новых значений $Rz12$ и, выбрав сектор с азимутальным направлением LOZ→SOD, было проведено сравнение модельных расчетов суточного хода $foF2$ с данными наблюдений в Соданкюля (рис. 2). Если на втором этапе коррекции в азимутальном секторе отсутствовали данные для проведения процедуры минимизации невязки, то в расчетах используется $Rz12$, полученный после первого этапа коррекции. Из результатов видно, что коррекция привела к улучшению для 22 марта, причем результаты после первого этапа коррекции ближе к эксперименту, чем после второго. В остальные месяцы коррекция не привела к улучшению, а наоборот ухудшила модельное описание. Исключение составляет декабрь, когда в ночные и вечерние часы достигнуто улучшение после процедуры коррекции модели, а в дневные – ухудшение модельных расчетов после коррекции по сравнению с расчетами без нее. Можно отметить, что в полученных результатах второй этап коррекции в основном еще больше увеличивает отклонение модельной $foF2$ от наблюдаемой.

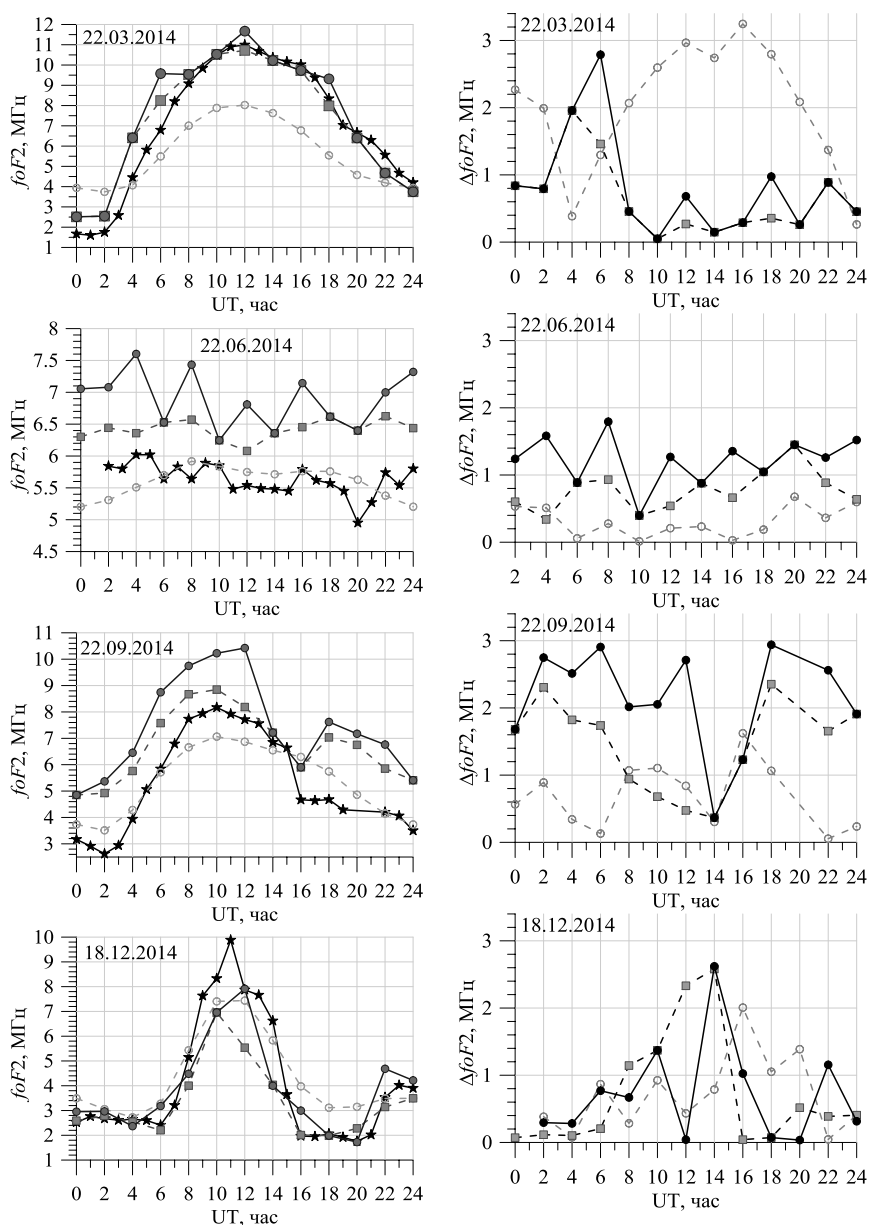


Рисунок 2. Слева представлены графики $foF2$ по данным наблюдений (черные звездочки) и в результате модельных расчетов (кружки и квадраты) в Соданкюля. Серые полые кружки и пунктирная линия соответствуют расчетам с прогнозным $Rz12$, серые квадраты и черная пунктирная линия – первому этапу коррекции, серые кружки и сплошная черная линия – второму. Справа в тех же обозначениях показано абсолютное отклонение модельной критической частоты $foF2$ от наблюдаемой в Соданкюля.

На рис. 3 построена зависимость электронного содержания в интервалах высот 80-20000 км (ПЭС) и 700-20000 км (плазмосферное электронное содержание (плазмосферное ЭС)) от $Rz12$. Видно, что днем

плазмосферное ЭС с ростом индекса солнечной активности возрастает, что соответствует общепринятым представлениям. В ночном же секторе для марта и декабря при увеличении солнечной активности увеличивается ПЭС, но не плазмосферное ЭС. Это указывает на проблему модели NeQuick в описании зависимости от солнечной активности высотного профиля электронной концентрации выше максимума $F2$ слоя. Предварительный анализ показал, что чем больше плазмосферный вклад, тем лучше работает корректировка (см. результаты для марта и декабря). Это значит, что учет плазмосферы в ПЭС важен для работы алгоритмов коррекции моделей ионосферы.

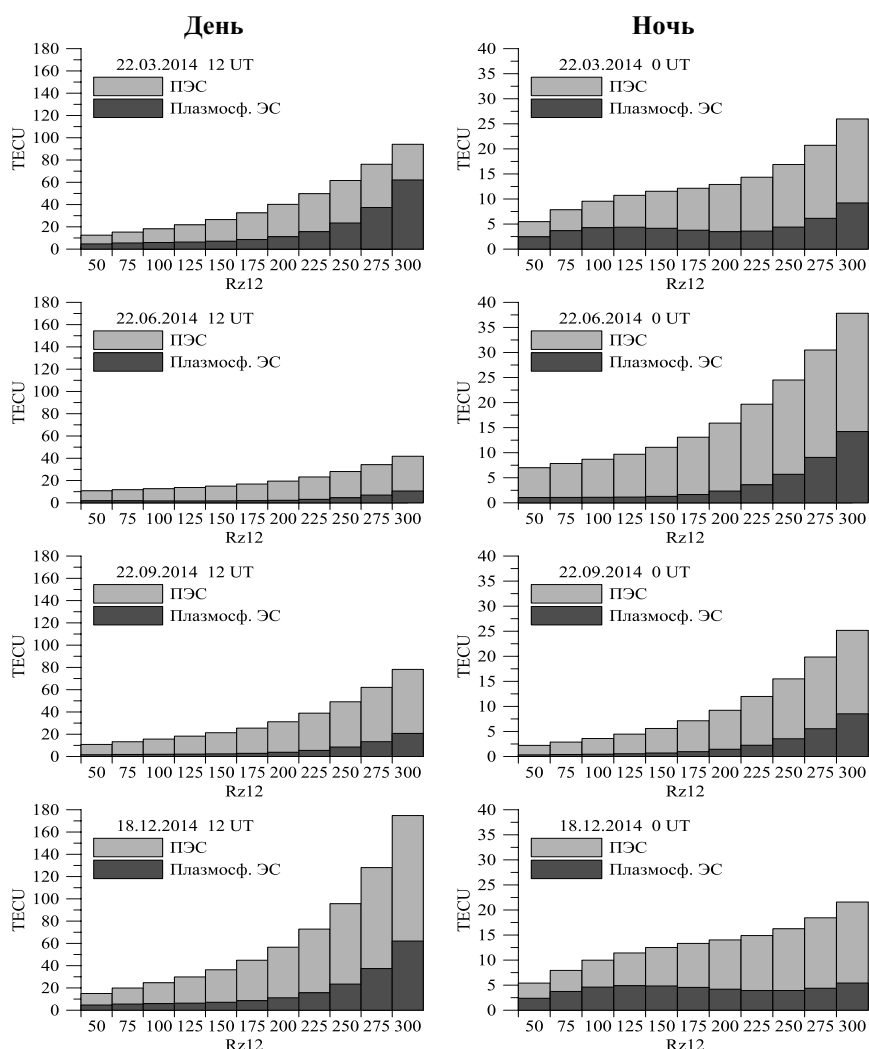


Рисунок 3. Вертикальный ПЭС над станцией Ловозеро в интервале высот от 80 до 20000 км (светло-серые столбцы) и в интервале 700-20000 км (плазмосферное ЭС, темно-серые столбцы) для разных значений Rz12 для дневных условий слева и ночных – справа.

Одной из причин, по которой коррекция не привела к уменьшению $foF2$, может быть некорректное описание моделью NeQuick профиля электронной плотности ионосферы. В то время как коррекция направлена на уменьшение невязки ПЭС за счёт подбора Rz12, этот подход может быть не оправдан для восстановления $foF2$. Для проведения дальнейших исследований мы планируем использовать данные ПЭС, полученные на станции Соданкюля, а также провести сопоставление результатов коррекции с данными профиля электронной плотности, полученного на радаре некогерентного рассеяния EISCAT.

Заключение

В данной работе были проведены расчёты по коррекции модели ионосферы и проверка эффективности этой коррекции для задачи восстановления $foF2$. Проведенная коррекция модели NeQuick в высокоширотном регионе вблизи Соданкюля и Ловозеро привела к улучшению описания моделью среды для условий весеннего равноденствия в дневных условиях и к ухудшению в ночных. В декабре наоборот наблюдается улучшение в ночном и вечернем секторе и ухудшение модельного описания среды в дневном.

В остальные месяцы коррекция привела к ухудшению результатов (ошибка порядка 3 МГц). Показано, что высотный профиль электронной концентрации в модели NeQuick корректно не описывает реальное состояние для выбранных дней. Кроме того, недооцененный вклад плазмосферы в ПЭС (например, для летнего солнцестояния) приводит к значительным ошибкам в F области после проведения процедуры уменьшения невязки между экспериментальным и модельным значением ПЭС.

Необходимо с помощью экспериментальных данных плазмосферного ЭС провести проверку модели NeQuick на правильность описания плазмосферы. Мы планируем провести дальнейшие исследования по данному направлению и привлечь данные ПЭС на станции Соданкюля.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-77-20009) и программы повышения конкурентоспособности «5-100» БФУ им. И.Канта.

Список литературы

- Ясюкевич Ю.В., Оводенко В.Б., Мыльникова А.А., Живетьев И.В., Веснин А.М., Едемский И.К., Котова Д.С. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. №2(34). С. 19-31. doi: 10.15350/2306-2819.2017.2.19. 2017.
- Maltseva O., Mozhaeva N., Poltavsky O., Zhabankov G. Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. Vol. 49(6). P. 1076-1087. 2012.
- Migoya-Oru  Y., Nava B., Radicella S., Alazo-Cuartas K. GNSS derived TEC data ingestion into IRI 2012 // Adv. Space Res. Vol. 55. P. 29–41. doi: 10.1016/j.asr.2014.12.033. 2015.
- Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. V. 70. P. 1856-1862. doi: 10.1016/j.jastp.2008.01.015. 2008.
- 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. Vol. 56(5). P. 900-906. doi: 10.1016/j.asr.2015.05.017. 2015.
- Themens D.R., Jayachandran P.T., Nicolls M.J., MacDougall J.W. A top to bottom evaluation of IRI 2007 within the polar cap // J. Geophys. Res. Space Physics. Vol. 119. P. 6689–6703. doi: 10.1002/2014JA020052. 2014.