Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 324–327.

УДК 550.388.2
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-324
ORCID: 0009-0002-3330-8880

РЕГИОНАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛИ NEQUICK2 ПО ДАННЫМ ГНСС-ПРОСВЕЧИВАНИЯ И ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

И.А. Павлов[1], А.М. Падохин[1,2]

[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия, ipavlov@izmiran.ru
[2]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

REGIONAL ADAPTATION OF THE NEQUICK2 MODEL BASED ON IONOSONDE AND GNSS SOUNDING DATA

I.A. Pavlov[1], A.M. Padokhin[1,2]

[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia ipavlov@izmiran.ru
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Аннотация. Работа посвящена региональной адаптации модели NeQuick2 в период низкой солнечной активности в Европейском регионе. Предложен метод коррекции, основанный на совместном использовании данных наземных ГНСС-приемников и ионозондов и обеспечивающий согласие модельных оценок как параметров слоя F2, так и полного электронного содержания (ПЭС) с экспериментальными данными, путем оптимизации параметров верхней части профиля. Выявлено, что параметр *g*, описывающий градиент спадания электронной концентрации выше максимума F2-слоя, имеет выраженный суточный ход. Для перехода на региональный масштаб усредненные значения суточного хода параметра *g* были интерполированы методом универсального кригинга. Верификация на независимой выборке подтвердила, что данный метод улучшает точность моделирования ПЭС.

Ключевые слова: ионосфера, ГНСС, ПЭС.

Abstract. This report focuses on the regional adaptation of the NeQuick2 model for the European region under low solar activity conditions. A correction method based on the combined use of ground-based GNSS receivers and ionosondes is proposed. It ensures agreement between experimental data and model estimates of both F2-layer parameters and total electron content (TEC) by optimizing topside profile parameters. It was found that the parameter *g*, which describes the electron density decline gradient above the F2-layer maximum, exhibits a pronounced diurnal variation. To extend the correction to a regional scale, the averaged diurnal variations of the parameter *g* were interpolated using the universal kriging method. Verification on an independent dataset confirmed that this method improves the accuracy of TEC modeling.

Keywords: ionosphere, GNSS, TEC.

ВВЕДЕНИЕ

Коррекция ионосферных моделей представляет собой актуальную научно-практическую задачу в области мониторинга космической погоды и обеспечения точности радиотехнических систем. Применение алгоритмов коррекции позволяет реализовать оптимальное объединение текущих экспериментальных данных о состоянии среды и ее модельных оценок. Выбранная в данной работе модель NeQuick2 [Nava et al., 2008] рассчитывает значение электронной концентрации на основе географических координат, месяца, времени и индекса солнечной активности *F*10.7. Адаптация модели возможна по данным ГНСС путем подбора эффективного драйвера, минимизирующего отклонения модельного ПЭС от экспериментального. Такая коррекция выполняется как локально для отдельных станций [Kotova et al., 2020], так и глобально в модели NeQuickG [Hoque et al., 2020], в которой индекс *F*10.7 заменяется эффективным индексом *Az*, распределение которого аппроксимируется полиномом от модифицированной геомагнитной широты. При такой оптимизации эффективный драйвер теряет свой исходный физический смысл потока радиоизлучения Солнца, что приводит к искажению высотного профиля электронной концентрации вследствие упрощенного модельного описания области выше максимума слоя F2 [Kotova et al., 2020]. Данная область обеспечивает вклад до 70 % в общее значение ПЭС, и, как показано в работах [Pignalberi et al., 2021; Pezzopane et al., 2024], здесь NeQuick2 имеет значительные неточности в описании электронной концентрации. Поэтому в настоящей работе предлагается алгоритм коррекции с использованием данных ГНСС-просвечивания и вертикального зондирования с целью оптимизации параметров верхней части профиля модели.

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ

Модельный профиль электронной концентрации $N_e(h)$ ниже максимума слоя F2 описывается тремя полуэпштейновскими слоями [Rawer, 1982]. Их опорные точки (максимумы E, F1, F2) задаются через эмпирические формулы, основными для которых являются критическая частота f_oF2 и коэффициент максимально применимой частоты *M(3000)F2*, рассчитываемые на основе эмпирических коэффициентов ITU-R [ITU, 2013]. Выше максимума слоя F2 профиль описывается полуэпштейновским слоем, толщина которого меняется с высотой:

$$N_e(h) = \frac{4NmF2}{\left[1+exp\left[\frac{(h-hmF2)}{H}\right]\right]^2} exp\left[\frac{(h-hmF2)}{H}\right], \quad (1)$$

$$H = H_0\left[1 + \frac{rg(h-hmF2)}{rH_0+g(h-hmF2)}\right]. \quad (2)$$

Характеристики этой плазмосферной части зависят от параметров нижней ионосферы N_mF2 = 0.124 (f_oF2)^2, h_mF2 и полутолщины H_0, которая полностью определяется параметрами нижней части профиля. Параметры r=100 и g=0.125 отвечают за асимптотическое поведение профиля на больших высотах и градиент спадания электронной концентрации соответственно. Их постоянство может приводить к недооценкам или переоценкам модельных значений ПЭС и смещению значений критических частот f_oF2. Таким образом, возникает возможность реализовать процедуру коррекции, которая одновременно обеспечивала бы согласованность модельных оценок ПЭС и f_oF2 с экспериментально наблюдаемыми. Очевидно, что такую процедуру можно реализовать только в точках наблюдений, где расположены и ионозонд, и ГНСС-приемник.

Алгоритм коррекции включает в себя следующие этапы. На каждом шаге в модель NeQuick2 вводятся прямые измерения ионозондов: критические частоты и высоты максимумов слоев (E, F1, F2), а также коэффициент *M(3000)F2* и масштабная высота слоя F2, определяющие параметр масштабной высот H_0. В случае отсутствия каких-либо данных наблюдаемые величины замещаются модельными оценками при наблюдаемом в этот день индексе солнечной активности *F*10.7. Такой подход исключает использование коэффициентов CCIR, позволяя рассчитать профиль электронной концентрации над станцией. Оптимальные значения *r* и *g* определяются путем минимизации отклонения модельного вертикального ПЭС от данных ГНСС-зондирования:

$$\min_{r,g} \|TEC_{data}(t) - TEC_{model}(t,r,g)\|^2, \quad (3)$$

где TEC_{data} и TEC_{model} — наблюдаемое и модельное значения вертикального ПЭС для данного момента времени. В данном случае, исходя из вида высотного профиля (1), (2), границы определения эффективных значений параметров *r* и *g* были заданы таким образом, чтобы основная коррекция производилась за счет параметра *g*, поскольку его вариации приводят к большим изменениям в значениях ПЭС.

Коррекция производилась для условий низкой солнечной активности за весь 2018 г. Исходные данные ГНСС были получены из европейской сети EUREF [https://www.epncb.oma.be/] и переведены в формат вертикального ПЭС над станцией с 15-минутным интервалом [Chen et al., 2024]. Использовались также данные европейских ионозондов сети GIRO [https://giro.uml.edu/]. Всего использовалось девять точек коррекции, расположенных в Европе, на рис. 2 их названия приведены прописными буквами в зеленой рамке.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЕРИФИКАЦИЯ КОРРЕКЦИИ

На рис. 1 представлен усредненный за весь год суточный ход эффективного параметра *g* для всех точек в зависимости от местного времени. Для него характерно завышение значений *g* в ночные часы и минимальные значения в районе местного полудня. Такая форма кривой характерна для всех точек коррекции, разница выражается только в амплитуде значений. Данная кривая показывает ошибки модели и ее ограниченность в описании верхней части профиля, которая обусловливается плазмосферно-ионосферным взаимодействием. Необходимо отметить, что при таком типе коррекции параметр *r* изменялся в достаточно узких пределах, поэтому для дальнейшей верификации использовались только значения эффективного параметра *g*, а значение параметра *r* было равно 100.

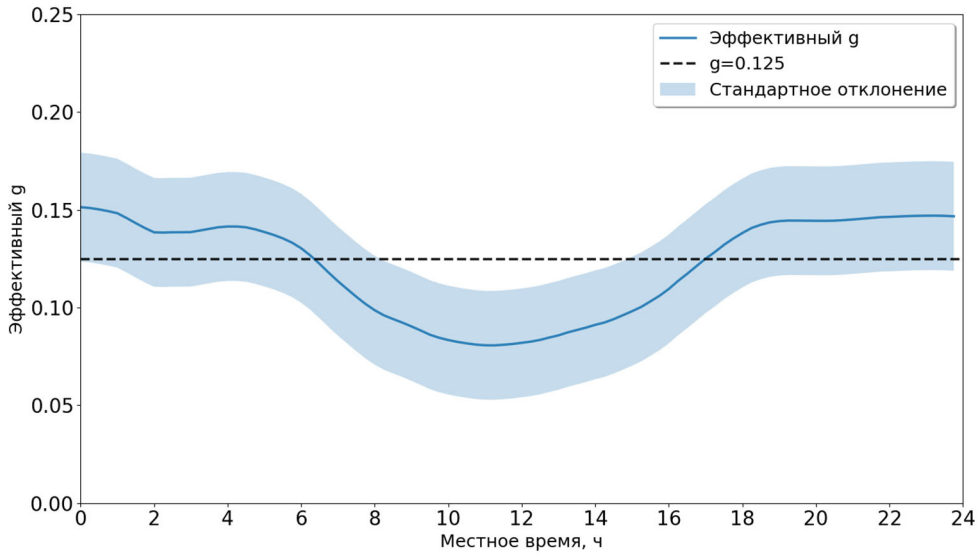

Рис. 1. Усредненный суточный ход эффективного параметра g за 2018 год

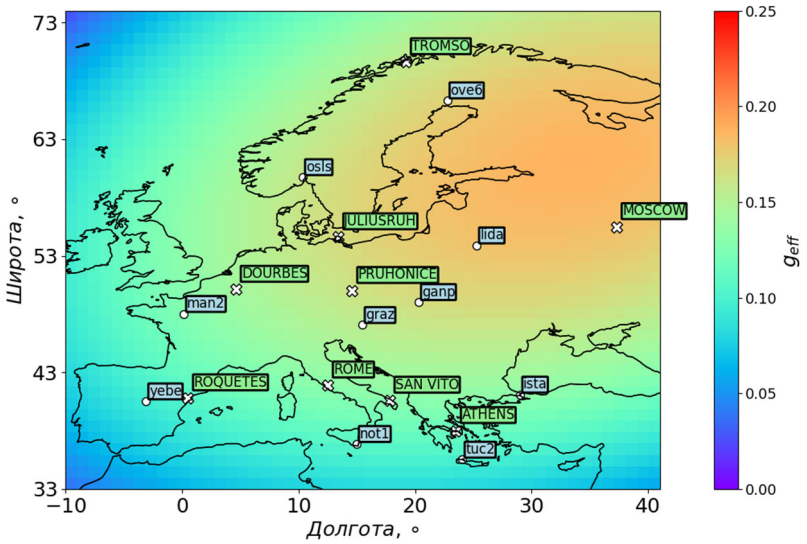

Рис. 2. Пример интерполяции для эффективного параметра *g* для 17:00 UT. Белыми крестами отмечены точки коррекции, белыми кругами — верификационные ГНСС-приемники

Чтобы подтвердить эффективность скорректированной модели NeQuick2, учитывающей выявленные вариации параметра *g*, было проведено ее сопоставление с базовой версией модели. Для верификации использовался независимый набор данных за первые два месяца 2019 г., которые характеризуются схожими гелиогеофизическими условиями с периодом коррекции. Используемые ГНСС-приемники показаны на рис. 2 белыми кругами. Для перехода от локальной коррекции в точке на региональный масштаб значения суточного хода эффективного *g* для каждой точки были интерполированы методом универсального кригинга [Демьянов, Савельева, 2010]. На рис. 2 представлен пример такой интерполяции для 17:00 UT. Заметно, что при такой интерполяции учитываются пространственные широтные и долготные градиенты.

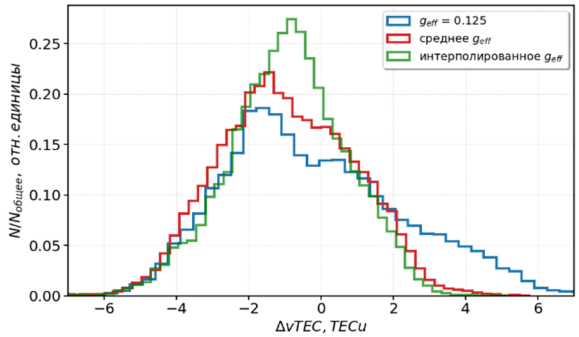

Рис. 3. Гистограмма отклонения вертикального ПЭС Δ*vTEC* — данных ГНСС от модельных оценок: синяя линия — модель NeQuick2; красная линия — модель NeQuick2 со скорректированным суточным ходом эффективного параметра *g*; зеленая — то же, только с учетом интерполированных значений эффективного параметра *g*

На рис. 3 представлена гистограмма отклонения наблюдаемых значений для ГНСС-приемников, показанных на рис. 2. Применение интерполяции для региона уменьшает отклонение модельных оценок вертикального ПЭС от наблюдаемых, уменьшая его среднеквадратичное отклонение (СКО). Смещение среднего значения μ может быть вызвано отклонениями модельных оценок критических частот. Итоговый результат показан в табл. 1.

Таблица 1. Итоговый результат верификации скорректированной модели.

	g=0.125	Среднее *g*	Интерполированное g
μ, TECU	–0.170	–0.952	–0.944
СКО, TECU	2.505	1.841	1.590

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе разработан метод региональной коррекции модели NeQuick2 через вариацию параметров *g* и *r*, управляющих плазмосферной частью профиля, с использованием данных ионозондов и ГНСС-приемников. Выявлен суточный ход параметра *g*, отвечающего за градиент электронной концентрации в области выше максимума F2-слоя и имеющего максимальные значения ночью и минимальные днем. Показана эффективность применения метода универсального кригинга для региональной интерполяции эффективных параметров модели на независимой выборке ГНСС-приемников в схожих гелиогеофизических условиях. Полученные эффективные значения *g* обеспечивают лучшее согласование модели с наблюдаемыми значениями вертикального ПЭС. Основной вывод заключается в необходимости перехода от постоянных значений *r* и *g* к их параметризации в зависимости от геофизических условий для существенного повышения точности модели NeQuick2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. М.: Наука, 2010. 327 с.

Chen C., Pavlov I., Padokhin A., Yasyukevich Y., et al.

Galileo and BeiDou AltBOC signals and their perspectives for ionospheric TEC studies // Sensors. 2024. Vol. 24, N 19. ID 6472. https://doi.org/10.3390/s24196472/

Hoque M., Jakowski N., Prol F.S. A new climatological electron density model for supporting space weather services // J. Space Weather Space Clim. 2022. Vol. 12. ID 1. DOI: 10.1051/swsc/2021044.

ITU. Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite services and systems. Recommendation P. 531–12. Geneva, 2013.

Kotova D.S., Ovodenko V.B., Yasyukevich Y.V., et al. Efficiency of updating the ionospheric models using total electron content at mid- and sub-auroral latitudes // GPS Solut. 2020.Vol. 24, N 1. ID. 25. DOI: 10.1007/s10291-019-0936-x.

Nava B., Coisson P., Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2008. Vol. 70, N 15. P. 1856–1862. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.015.

Pezzopane M., Pignalberi A., Pietrella M., et al. An update of the NeQuick-Corr topside ionosphere modeling based on new datasets // Atmosphere. 2024. Vol. 15, N 4, ID 498. DOI: doi.org/10.3390/atmos15040498.

Pignalberi A., Pezzopane M., Nava B. Optimizing the NeQuick topside scale height parameters through COSMIC/FORMOSAT-3 radio occultation data // IEEE Geosci. Remote S. 2021. Vol. 19, ID 8017005. DOI: 10.1109/LGRS.2021.3096657.

Rawer K. Replacement of the present sub-peak plasma density profile by a unique expression // Adv. Space Res. 1982. Vol. 2, N 10. P. 183–190. DOI: 10.1016/0273-1177(82)90387-8.

URL: https://www.epncb.oma.be/ (дата обращения 28.05.2026).

URL: https://giro.uml.edu/ (дата обращения 28.05.2026).