

УДК: 550.388.2

DOI: 10.26907/rwp29.2025.99-101

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В МОДЕЛИ NeQuick

М. Г. Деминов¹, Р. Г. Деминов²

¹Институт земного магнетизма, ионосфера и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкиова РАН (ИЗМИРАН), 108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, 4

E-mail: deminov@izmiran.ru

²Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: Raphael.Deminov@kpfu.ru

Аннотация. Представлена простая аналитическая формула для вычисления вертикального полного электронного содержания *VTEC* по данным о параметрах максимумов слоев *E*, *F1* и *F2* в модели NeQuick. Получено, что ошибка этой формулы не превышает 2% по сравнению с более точным вариантом решения задачи – получения *VTEC* как интеграла от электронной концентрации по модели NeQuick вдоль вертикального луча от основания ионосферы до примерно 20000 км. Эта формула может быть использована и для вычисления наклонного *TEC*.

Ключевые слова: ионосфера; концентрация электронов; полное электронное содержание; модель; формула

ANALYTICAL FORMULA FOR TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE NeQuick MODEL

М. Г. Деминов, Р. Г. Деминов

Abstract. A simple analytical formula for calculating the vertical total electronic content *VTEC* according to the data on the parameters of the layers *E*, *F1* and *F2* maximums in the NeQuick model is presented. It was obtained that the error of this formula does not exceed 2% compared to a more accurate solution to the problem - obtaining *VTEC* as an integral from the electronic concentration according to the NeQuick model along the vertical beam from the base of the ionosphere to about 20,000 km. This formula can also be used to calculate the inclined *TEC*.

Keywords: ionosphere; electron concentration; total electronic content; model; formula

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используются в различных отраслях экономической деятельности, включая мониторинг транспорта, навигацию космических аппаратов и геодезию. Данные ГНСС используются также для мониторинга состояния окружающей среды, зондирования ионосферы и решения многих других задач. Значительное число потребителей ГНСС по-прежнему использует одночастотное оборудование, когда необходимо знание полного электронного содержания (TEC, Total Electron Content) на луче спутник-приемник для оценки ионосферной задержки сигнала. Один из способов вычисления ТЕС для заданных условий основан на использовании моделей концентрации электронов в ионосфере и плазмосфере. К ним можно отнести модель NeQuick [1], которая дает медиану концентрации электронов за месяц, характеризуется высокой скоростью вычислений и специально разработана для приложений трансионосферного распространения радиоволн.

Для получения ТЕС необходимо с помощью этой модели концентрации электронов вычислить интеграл от этой концентрации на луче спутник-приемник. Основной целью данной работы была замена этого интеграла простой аналитической формулой для вычисления ТЕС через параметры максимумов слоев ионосферы в модели NeQuick. Для определенности рассмотрен вариант, когда *TEC* вычисляется для вертикального луча от поверхности Земли до высоты 20000 км, что примерно соответствует наземному приему вертикального сигнала от навигационных спутниковых систем GPS или ГЛОНАСС.

Ниже последовательно представлены некоторые уравнения NeQuick, которые необходимы для пояснения простой аналитической формулы для TEC, явный вид этой формулы и оценка ее точности, обсуждение свойств этой формулы и заключение.

Модель NeQuick

Полное описание модели NeQuick версии 2 приведено в статье [1]. Ниже приведены только некоторые элементы модели, чтобы пояснить простую аналитическую формулу для вертикального полного электронного содержания $VTEC$, полученную для этой модели. Для этого использованы обозначения, аналогичные используемым в модели NeQuick [1]: N – концентрация электронов, h – высота, $N(h)$ – высотное распределение концентрации электронов, Nm , hm и B – концентрация, высота и параметр толщины максимума слоя ионосферы, который ниже и выше максимума слоя обозначен как B_{bot} и B_{top} . В модели использовано три слоя ионосферы: E , $F1$ и $F2$. Параметры максимумов этих слоев обозначены как NmE , hmE , BE ; $NmF1$, $hmF1$, $B1$; $NmF2$, $hmF2$, $B2$. За основу высотного распределения каждого слоя принят слой Эпштейна:

$$N(h; hm, Nm, B) = 4Nm \exp(x) / (1 + \exp(x))^2, \quad x = (h - hm) / B. \quad (1)$$

В модели NeQuick высотное распределение концентрации электронов ниже максимума слоя $F2$ представлено в виде суммы концентраций слоев E , $F1$ и $F2$ ионосферы:

$$N_{\text{bot}}(h) = N_E(h) + N_{F1}(h) + N_{F2}(h) \quad (2)$$

с дополнительными поправками на параметры максимумов слоев E и $F1$, чтобы эти слои не давали вклад в $NmF2$. Концентрации максимумов слоев E и $F1$ с учетом этих поправок обозначены как NmE^* и $NmF1^*$. Параметры толщины принимают разные значения для нижней и верхней сторон каждого слоя: BE_{bot} и BE_{top} для слоя E , $B1_{\text{bot}}$ и $B1_{\text{top}}$ для слоя $F1$, $B2_{\text{bot}}$ и $B2_{\text{top}}$ для слоя $F2$. Поэтому такие слои часто называют полу-Эпштейновскими слоями.

В модели NeQuick высотное распределение N выше максимума слоя $F2$ также представлено полу-Эпштейновским слоем, но параметр толщины изменяется с высотой: он равен $B2_{\text{top}}$ вблизи, но выше максимума слоя $F2$ и в пределе больших высот он увеличивается в 100 раз. Увеличение параметра толщины с высотой во внешней ионосфере отражает постепенный переход от преобладания ионов кислорода к ионам водорода в ионном составе ионосферной плазмы.

В модели NeQuick для вычисления $VTEC$ от поверхности Земли до высоты 20000 км над пунктом с заданными координатами, для заданных местного времени, месяца года и уровня солнечной активности (по индексу этой активности $F10.7$) последовательно определяются параметры максимумов слоев E , $F1$ и $F2$, высотное распределение концентрации электронов и интеграл от этой концентрации по высоте, который берется численно.

Цель данной работы была получить аналитическую формулу, которая дает $VTEC$ по параметрам максимумов слоев E , $F1$ и $F2$ в модели NeQuick, не прибегая к вычислению искомого интеграла.

Аналитическая формула для $VTEC$

Если параметры толщины слоев E , $F1$ и $F2$ не зависят от высоты, то искомый интеграл для каждого слоя вычисляется точно. Этот вариант соответствует модели DGR, на котором основана модель NeQuick, и аналитическая формула для $VTEC$ в модели DGR известна [2]. В модели NeQuick параметр толщины внешней ионосферы зависит от высоты, тем не менее, можно подобрать коэффициент при $B2_{\text{top}}$ из условия минимума ошибок аналитической формулы относительно численного решения задачи. Искомая аналитическая формула для $VTEC$ получена на этой основе:

$$VTEC_{\text{ann}} = 2 \left[NmE^*(BE_{\text{bot}} + BE_{\text{top}}) + NmF1^*(B1_{\text{bot}} + B1_{\text{top}}) + NmF2(B2_{\text{bot}} + 1.75B2_{\text{top}}) \right], \quad (3)$$

где концентрация электронов измеряется в $1/\text{м}^3$, параметры толщины – в м, $VTEC$ – в $1/\text{м}^2$. Для оценок относительной точности аналитической аппроксимации (3) использовано отклонение $VTEC_{\text{ann}}$ от $VTEC_{\text{calc}}$, полученного на основе численного решения задачи:

$$\delta VTEC = (VTEC_{\text{ann}} / VTEC_{\text{calc}} - 1) \cdot 100, \% . \quad (4)$$

Оценки этой точности для широкого набора средних за месяц геофизических условий показали, что $\delta VTEC$ не превышает 2% по абсолютной величине. Для примера на рисунке 2 приведены зависимости $\delta VTEC$ от географической широты. Из данных на этом рисунке следует, что для всех приведенных случаев $\delta VTEC$ меньше 2% по абсолютной величине. В полночь $\delta VTEC < 0$ почти на всех широтах, за исключением высоких широт в Южном полушарии. На средних и высоких широтах Южного полушария в январе, т.е. местным летом, в полдень $\delta VTEC > 0$. Зависимость $\delta VTEC$ от уровня солнечной активности практически отсутствует в полночь, в полдень наблюдается тенденция к более высоким значениям $\delta VTEC$ для относительно низкого уровня солнечной активности.

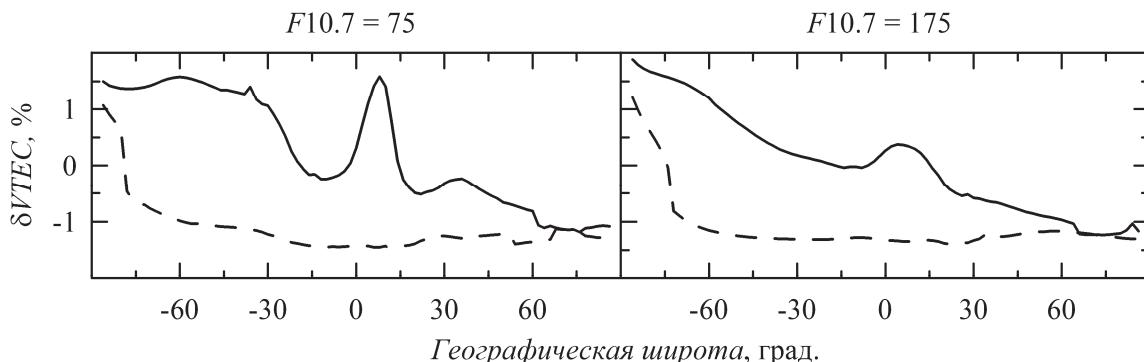


Рис. 1. Зависимости $\delta VTEC$ от географической широты на географической долготе 45° Е в январе в полдень и полночь (сплошные и штриховые линии) для низкой ($F10.7 = 75$) и высокой ($F10.7 = 175$) солнечной активности.

Аналитическая формула (3) для $VTEC$ может быть использована и для вычисления наклонного TEC ($STEC$), поскольку в простейшем случае $STEC = K VTEC$, где коэффициент пропорциональности зависит только от угла возвышения спутника и высоты подионосферной точки. Она может быть использована и в модели NeQuick-G, которая используется как операционная модель Galileo, предоставляющая одночастотным потребителям информацию об ионосферной ошибке. Для этого в модели NeQuick сделана замена индекса $F10.7$ на эффективный индекс солнечной активности Az . Эту замену можно сделать и для вычисления параметров ионосферы в аналитической формуле (3).

Заключение

Представлена простая аналитическая формула для вычисления вертикального полного электронного содержания $VTEC$ по данным о параметрах максимумов слоев E , $F1$ и $F2$ в модели NeQuick. Эта формула дает $VTEC$ в интервале от поверхности Земли до высот навигационных спутниковых систем GPS или ГЛОНАСС. Получено, что ошибка этой формулы не превышает 2% по сравнению с численным решением этой задачи, т.е. вычисления интеграла от концентрации электронов вдоль вертикального луча. Эта формула может быть использована и для вычисления наклонного TEC . Она может быть использована и в модели NeQuick-G как части операционной модели Galileo, предоставляющей одночастотным потребителям информацию об ионосферной ошибке.

Благодарности

Компьютерная программа (NeQuick2 P.531-12 electron density model) была реализована в лаборатории аэрономии и распространения радиоволн Международного центра теоретической физики им. Абдуса Салама, Триест, Италия

Список литературы

1. 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. – P. 1856–1862. 2008.
2. Di Giovanni G., Radicella S.M. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere // Adv. Space Res. – 1990. – Vol. 10. – P. 27–30.