

**ПРИМЕНЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС/GPS
ПРИ АДАПТАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ**

А. А. Васенина*, К. А. Сидоренко

ОАО «Омский научно-исследовательский институт приборостроения»
Российская Федерация, 644009, г. Омск, ул. Масленникова, 231
*E-mail: vas.al.an@rambler.ru

Рассмотрены различные методы непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы. Показано, что, несмотря на достоинства используемых подходов, существующие недостатки ограничивают возможности их практического применения. Проведен анализ различных вариантов прогнозирования параметров ионосферы, на основе которого обоснован выбор модели, отвечающей требованиям простоты и высокой скорости расчетов, необходимых для дальнейших исследований. Приведен пример построения профиля электронной концентрации с применением выбранной экспериментальной модели NeQuick. Показана целесообразность использования в качестве адаптирующего параметра модели значений потока солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см, характеризующего уровень солнечной активности. Представлен способ оценки индекса с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS, включающий в себя сглаживание измерений каждого спутника, формирование корреляционных матриц данных и минимизацию функционала, определяющего отклонение модели от истинных значений. Эффективность методов непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы оценивалась путем проведения экспериментальных работ на полигоне ОАО «ОНИИП», г. Омск. На основе полученных данных показаны основные преимущества предложенного способа при определении критической частоты слоя F2 в точках, удаленных от области видимости спутников на расстояния от 700 до 1300 км: лучшее описание характера зависимости параметра от времени и, как следствие, повышение точности определения.

Ключевые слова: спутниковое радиозондирование ионосферы, полное электронное содержание (ПЭС), ионосферная модель NeQuick.

Vestnik SibGAU
Vol. 16, No. 1, P. 172–176**APPLICATION OF SATELLITE SYSTEMS GLONASS/GPS
AT ADAPTATION IONOSPHERIC MODEL**

А. А. Vasenina*, К. А. Sidorenko

JSC "Omskiy Nauchno Issledovatel'skiy Institut Priborostroeniya"
231, Maslennikova Str., Omsk, 644009, Russian Federation
*E-mail: vas.al.an@rambler.ru

The paper discusses different methods of continuous monitoring of the state of the ionospheric plasma. It is shown that, despite the merits of the approach used, the current shortcomings limit their practical application. The analysis of the various options prediction of ionospheric parameters is conducted. It is possible to substantiate the choice of a model that meets the requirements of simplicity and high speed calculations necessary for further research. An example of the construction of electron density profile using the selected experimental model NeQuick is given. Reasonability of using as adapting the model parameters values of the solar radio emission at a wavelength of 10.7 cm, which characterizes the level of solar activity is shown. The way of evaluation index using data from global navigation satellite systems GLONASS/GPS is given. It includes smoothing the measurements for each satellite, the formation of correlation matrices of data and minimizing the functional defined by the deviation from the true values of the model. The effectiveness of the methods of continuous monitoring of the state of the ionospheric plasma was evaluated by carrying out experimental work on the range of "ONIIP" Omsk. On the basis of the obtained data the main advantages of the proposed method are shown. In determining the critical frequency of the F2 layer at points distant from the scope of the satellites in the distance of 700 to 1300 km: the best description of the nature of the parameter depending on the time and, consequently, improving the accuracy of determination is given.

Keywords: satellite radio-sounding of the ionosphere, total electron content (TEC), NeQuick ionospheric model.

Введение. Актуальность задачи по развитию методов непрерывного мониторинга состояния ионосферной плазмы обусловлена существенным влиянием ионосферы на работу радиотехнических систем связи, локации и навигации. Одним из современных подходов к решению этой проблемы является трансionoсферное зондирование, связанное с развитием глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS [1–3]. Применение моделированных сигналов позволяет измерить запаздывание радиоволн, вызванное плазмой, и рассчитать одну из важнейших характеристик среды – полное электронное содержание (ПЭС). Однако в виду отсутствия глобальной сети ионосферных станций, в частности на территории России, широкое применение получили ионосферные модели. Тем не менее точность этих моделей может быть существенно снижена при отличии входных данных от их реальных значений. Таким образом, цель данной работы заключается в оценке возможности повышения эффективности ионосферных моделей при использовании данных глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Определение параметров ионосферы. В последнее время широкое распространение получили эмпирические модели ионосферы, требующие небольших вычислительных затрат и ограниченный набор входных параметров. Однако этот класс моделей, как правило, описывает некоторые средние месячные значения (долгосрочный прогноз), а для решения задач оперативного прогноза необходимо проводить адаптацию по результатам текущей диагностики состояния среды. К широко известным и наиболее проработанным эмпирическим моделям можно отнести международную справочную модель ионосферы (International Ionospheric Model) IRI [4; 5] и европейскую ионосферную модель NeQuick [6–8]. Сравнительный анализ этих двух моделей, проведенный в работах [9; 10], показал, что они хорошо воспроизводят максимум электронной концентрации при различных уровнях геомагнитной возмущенности, но хуже отображают электронный профиль ионосферы. При этом точность расчета вертикального ПЭС с использованием NeQuick выше на 10–15 %. Стоит также отметить алгоритмическую простоту этой модели: аппроксимация профиля осуществляется одной функцией (функцией Эпштейна), что позволяет избежать проблем «сшивания» отдельных сегментов. С учетом отмеченных выше преимуществ в настоящей работе при реализации адаптивной ионосферной модели предпочтение отдано в пользу модели NeQuick.

Рассмотрим данную модель более подробно. Семейство моделей NeQuick создано на основе европейской ионосферной модели DGR (DiGiovanni и Radicella, 1990) и представляет собой сумму слоев Эпштейна [4]. При этом построение профиля электронной концентрации $N(h)$ базируется на использовании реперных точек и выполнении условия непрерывности профиля и его первой производной [7–11]. Слой Эпштейна, в свою очередь, задается аналитическим выражением вида

$$N(h) = \frac{4 \cdot N_m}{\left(1 + \exp\left(\frac{h - h_m}{B}\right)\right)^2} \exp\left(\frac{h - h_m}{B}\right),$$

где N_m – максимум электронной концентрации; h_m – высота максимума электронной концентрации; B – полутолщина слоя. Пример построения профиля отображен на рис. 1.

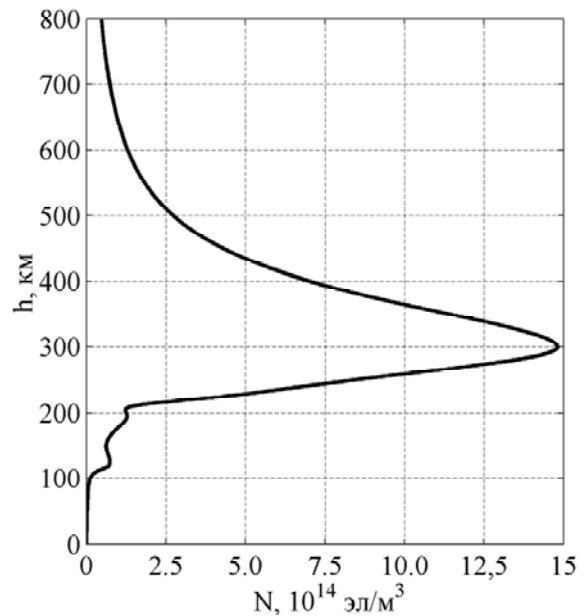


Рис. 1. Профиль электронной концентрации ионосферы

В ходе ранее проведенных исследований [11; 12] было выявлено, что в качестве адаптирующего параметра из индексов солнечной активности целесообразней использовать индекс $F_{10,7}$ – поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см [13; 14]. Значения этого индекса обновляются каждый день и находятся в свободном доступе на сайте <http://www.spaceweather.com>.

Оценка индекса солнечной активности по данным навигационных приемников. На следующем этапе исследований оценивалась возможность определения индекса солнечной активности по данным навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS. При этом рассчитанный индекс $F_{10,7}$ может быть использован для нахождения параметров ионосферы в любой точке земного шара.

Предложенный алгоритм определения индекса $F_{10,7}$ реализуется следующей последовательностью действий.

Сначала определяется количество доступных спутников, координаты точки пересечения направления на спутник с максимумом слоя F2, затем производится определение ПЭС по формуле [15]:

$$\text{ПЭС} = \text{ПЭС}_H \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+h}\right) \cos(\beta)\right),$$

где R – радиус Земли; h – высота ионосферы; ПЭС_H – наклонное значение ПЭС, определяемое для фазовых (ϕ) и кодовых измерений (κ) по формулам

$$\text{ПЭС}_{\text{НК}} = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L2}^2 - f_{L1}^2)} (p_{L1} - p_{L2}) - IFB,$$

$$ПЭС_{НФ} = \frac{f_{L1}^2 f_{L2}^2}{40,3(f_{L1}^2 - f_{L2}^2)} (\phi_{L1} - \phi_{L2}) - IFB,$$

где f_{L1}, f_{L2} – частоты спутника; p_{L1}, p_{L2} – псевдодальности по коду, измеренные РПУ для каждой частоты; ϕ_{L1}, ϕ_{L2} – псевдодальности, измеренные по количеству циклов фазы; IFB – значения смещения ПЭС для каждого спутника.

Следующим шагом является сглаживание полученных значений ПЭС для каждого спутника в i -й момент времени по формуле

$$ПЭС_{Н}^i = w_m^i ПЭС_{НК}^i + w_n^i \times \left(ПЭС_{Н}^{i-1} + \left(ПЭС_{НФ}^i - ПЭС_{НФ}^{i-1} \right) \right),$$

где w_m, w_n – весовые коэффициенты, связанные соотношением:

$$w_m^i + w_n^i = 1.$$

Используя полученные значения, формируется корреляционная матрица данных:

$$\mathbf{R} = \frac{1}{K} \mathbf{X} \mathbf{X}^H,$$

где \mathbf{X} – матрица данных, определяемая по формуле:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} ПЭС_1^1 & \dots & ПЭС_1^K \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ПЭС_N^1 & \dots & ПЭС_N^K \end{pmatrix},$$

где K – максимальное количество временных отчетов; N – количество спутников.

Далее формируется корреляционная матрица значений ПЭС для каждого спутника согласно выбранной модели ионосферы NeQuick с использованием набора значений интенсивности солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см.

Следующим шагом производится определение значения индекса $F_{10,7}$ в области видимости спутника путем минимизации функционала, определяющего отклонение модели от реальных данных, например:

$$z(F_{10,7}) = \left\| \mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{model}}(F_{10,7}) \right\|^2,$$

где $\mathbf{R}_{\text{model}}(F_{10,7})$ – корреляционная матрица данных значений ПЭС, рассчитанных на основе используемой модели ионосферы. Используя полученное значение $F_{10,7}$ в качестве адаптирующего параметра, можно восстановить профиль электронной концентрации ионосферы в искомым точках.

Описание эксперимента. Эффективность предложенной методики оценивалась путем проведения экспериментальных работ на полигоне ОАО «ОНИИП», г. Омск (55N, 73.4E). Приемная станция состояла из ЭВМ, приемного устройства ProPak_v6 и антенны ГЛОНАСС/GPS. На рис. 2 отмечено местоположение приемной станции GPS/ГЛОНАСС, черными точками обозначены видимые спутники. Для оценки достоверности получаемых параметров проводилось сравне-

ние модельных значений критической частоты слоя F2 ($f_k F2$) с данными, измеренными вертикальными ионозондами, расположенными в г. Томске (56.5N, 84.9E) и д. Подкаменная Тунгуска (61.6N, 90.0E). При расчете $f_k F2$ использовались рекомендации сектора радиосвязи Международного союза электросвязи МСЭ-R [16].

На рис. 3 представлены зависимости значения критической частоты слоя F2 от времени суток для способов, использующих значения $F_{10,7}$ и данные ионозонда, и предлагаемого способа для Томска. Расчет велся по данным на 28 октября 2014 г. Из графиков видно различие способа, использующего прогнозируемое значение $F_{10,7}$, от способа, в основе которого лежат данные, полученные с ионозонда (СКО 2,77 МГц (30 %)). Адаптация модели, используя предложенный способ, позволила уменьшить ошибку определения параметров слоя F2 с 30 до 16 % (СКО 1,33 МГц).

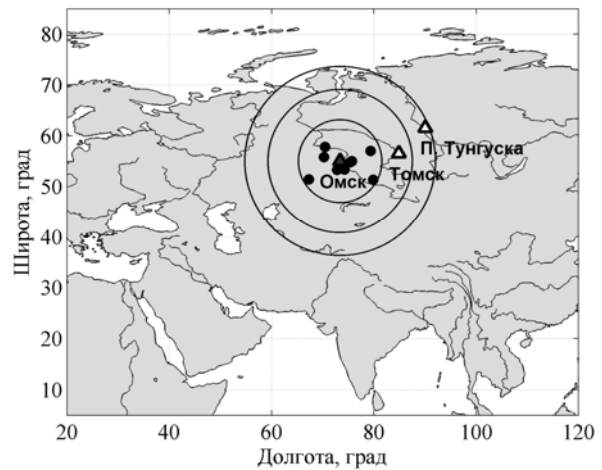


Рис. 2. Схема эксперимента

Также в ходе эксперимента были рассмотрены точки, расположенные на более значительном расстоянии. На рис. 4 представлены зависимости критической частоты слоя F2 от времени суток для способов, использующих значения $F_{10,7}$ и данные ионозонда, и предлагаемого способа для Подкаменной Тунгуски. Из графиков видно повышение точности определения искомого параметра при использовании адаптации выбранной модели по данным навигационных спутников, численно это выразилось в снижении СКО с 64 до 38 % (с 4,7 до 2,59 МГц). Таким образом, в ходе проведенного эксперимента получен выигрыш в точности рассмотренного способа над способом без коррекции значений $F_{10,7}$ при удалении от точки измерений примерно в 1,5–2 раза.

Заключение. В работе рассматривается аналитическая ионосферная модель NeQuick, отличающаяся алгоритмической простотой и высокой эффективностью расчета ПЭС. В качестве адаптирующего параметра из индексов солнечной активности рекомендуется использовать поток солнечного радиоизлучения на волне 10,7 см ($F_{10,7}$). Однако, как показали результаты исследований, значения $F_{10,7}$ необходимо предварительно откорректировать по данным текущей диагностики среды.

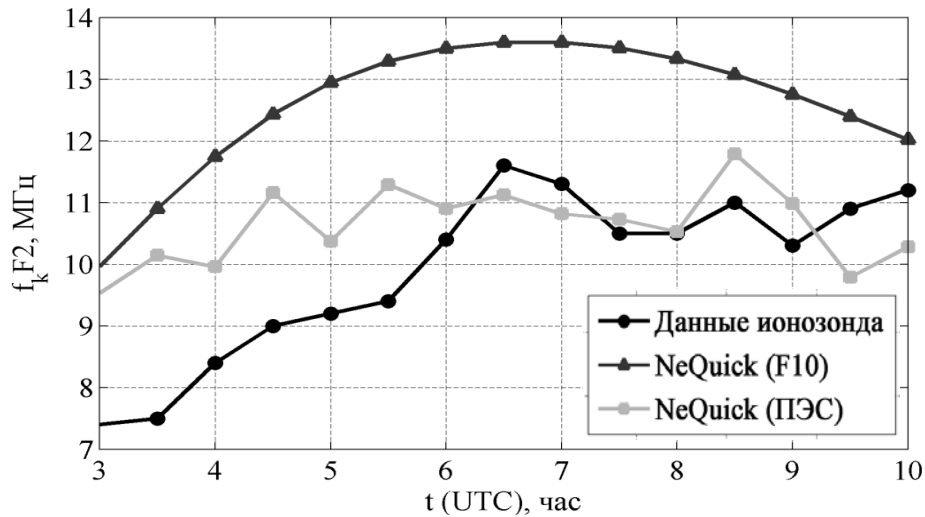


Рис. 3. Зависимости $f_k F_2$ от времени суток для Томска

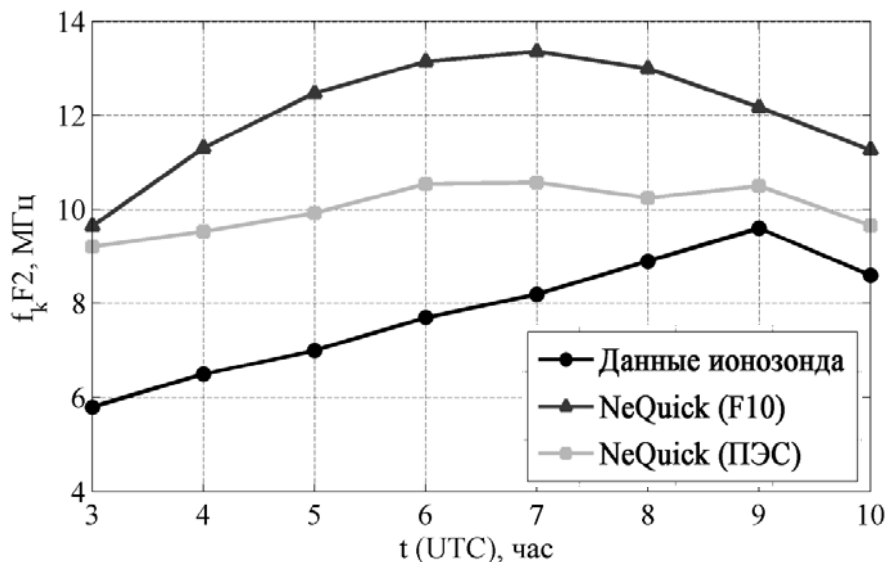


Рис. 4. Зависимости $f_k F_2$ от времени суток для Подкаменной Тунгуски

Предложен способ оценки адаптирующего параметра по данным глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. Экспериментальные исследования показали, что данный способ позволяет повысить точность прогнозирования критической частоты слоя F2 даже для точек, находящихся на расстоянии 700–1300 км от места зондирования.

Библиографические ссылки

1. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
2. Авдюшин С. И. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. М. : ИПГ им. академика Е. К. Федорова, 2008. 210 с.
3. Ground- and space-based GPS data ingestion into the NeQuick model / С. Brunini [et al.] // Journal of Geodesy. 2011. Vol. 85 (12). P. 931–939.
4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science. 2001. Vol. 36, № 2. P. 261–275.

5. Bilitza D. International reference ionosphere 2000: examples of improvements and new features // Advances in Space Research. 2003. Vol. 31, № 3. P. 757–767.
6. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications // PhD thesis, Delft University of Technology. 2009. 208 pp.
7. Radicella S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution // Annals of Geophysics. 2009. Vol. 52, № 3/4. P. 417–422.
8. Radicella S. M. Ionospheric models for GNSS single frequency range delay corrections // Fisica de la Tierra. 2008. Vol. 20. P. 27–39.
9. Андреева Е. С. Анализ ионосферных параметров по радиозатменным, ионозондовым измерениям и данным моделей IRI, NeQuick // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т. 15, № 8. С. 44–52.
10. Coisson P. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models // Annals of Geophysics. 2002. Vol. 45, № 1. P. 111–116.

11. Васенина А. А. Методика коррекции индексов солнечной активности // Техника радиосвязи / Омский НИИ приборостроения. 2013. 2 (20). С. 27–34.

12. Березовский В. А., Васенина А. А., Бензик А. В. Влияние точности определения критической частоты слоя F2 на поведение лучевых траекторий // Омский научный вестник. 2012. № 3 (113). С. 294–298.

13. Брюнелли Б. Е., Намгладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.

14. Блинов И. В. Солнечная активность // Соросовский образовательный журнал. 2004. Т. 8, № 2. С. 64–68.

15. TEC Measurement By Single Dual-frequency GPS Receiver / Y. Zhang [et al.] // Proceedings of the 2003 International Symposium on GPS/GNSS (November 2003). URL: <http://tsgps.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/TEC.pdf>. (дата обращения: 02.11.2014).

16. ITU-R Reference Ionospheric Characteristics // Recommendation ITU-R P.1239-2. 2010. 30 p.

References

1. Kunitsyn V. E., Tereshchenko E. D., Andreeva E. S. *Radiotomografiya ionosfery* [Ionospheric tomography]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 336 p. (In Russ.).
2. Avdyushin S. I. *Radiozondirovanie ionosfery sputnikovymi i nazemnymi ionozondami* [Radiosounding ionospheric satellite and ground ionosonde]. Moscow, IPG im. akademika E. K. Fedorova Publ., 2008, 210 p. (In Russ.).
3. Brunini C., Azpilicueta F., Gende M., Camilion E., Aragon-Angel M., Hernandez-Pajares M., Juan M., Sanz J., Salazar D. Ground- and space-based GPS data ingestion into the NeQuick model. *Journal of Geodesy*, 2011, vol. 85 (12), p. 931–939.
4. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*, 2001, vol. 36, no 2, p. 261–275.
5. Bilitza D. International reference ionosphere 2000: examples of improvements and new features. *Advances in Space Research*, 2003, vol. 31, no 3, p. 757–767.
6. Memarzadeh Y. Ionospheric modeling for precise GNSS applications. *PhD thesis, Delft University of Technology*, 2009, 208 p.
7. Radicella S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution. *Annals of Geophysics*, 2009, vol. 52, no. 3/4, p. 417–422.
8. Radicella S. M. Ionospheric models for GNSS single frequency range delay corrections. *Fisica de la Tierra*, 2008, vol. 20, p. 27–39.
9. Andreeva E. S. [Analysis of ionospheric parameters by radio occultation, ionozondovym measurements and data models IRI, NeQuick]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2010, vol. 15, no 8, p. 44–52 (In Russ.).
10. Coisson P. Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models. *Annals of Geophysics*, 2002, vol. 45, no 1, p. 111–116.
11. Vasenina A. A. [Methods of correction of solar activity indices]. *Tekhnika radio svyazi. Omskiy NII priborostroeniya*, 2013, vol. 2(20), p. 27–34 (In Russ.).
12. Berezovskiy V. A., Vasenina A. A., Benzik A. V. [Influence the accuracy of determination of the critical frequency of the F2 layer on the behavior of ray trajectories]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2012, no. 3 (113), p. 294–298 (In Russ.).
13. Bryunelli B. E., Namgladze A. A. *Fizika ionosfery*. [The physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 528 p. (In Russ.).
14. Blinov I. V. [Solar activity]. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 2004, vol. 8, no 2, p. 64–68 (In Russ.).
15. Zhang Y., Wu F., Kubo N., Yasuda A. TEC Measurement By Single Dual-frequency GPS Receiver. *Proceedings of the 2003 international Symposium on GPS/GNSS*, November 2003. Available at: <http://tsgps.denshi.e.kaiyodai.ac.jp/kubo/TEC.pdf> (accessed 02.11.2014).
16. ITU-R Reference Ionospheric Characteristics. *Recommendation ITU-R P. 1239*, 2010, 30 p.