

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДЕЛЕЙ ИОНОСФЕРЫ В ЦЕЛЯХ КОРРЕКЦИИ ОДНОЧАСТОТНЫХ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГНСС

А.С. Ясюкевич, Ю.В. Ясюкевич, Д.А. Затолокин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
annpol@iszf.irk.ru

ASSESSING THE PERFORMANCE OF MODELS FOR IONOSPHERIC CORRECTION FOR SINGLE-FREQUENCY GNSS POSITIONING

A.S. Yasyukevich, Yu.V. Yasyukevich, D.A. Zotolokin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
annpol@iszf.irk.ru

Аннотация. В настоящее время существует ряд моделей ионосферы, предназначенных для корректировки координатных измерений глобальных навигационных спутниковых систем. Точность моделей может существенно различаться в зависимости от времени года, местного времени, широты и геофизических условий. В исследовании мы анализируем пять моделей, предназначенных для ионосферной коррекции: модель Клобучара (GPS), ГЛОНАСС, Beidou (BDGIM), NeQuick-G (Galileo), а также модель GEMTEC. Анализ моделей проводится исходя из значений электронного содержания (ПЭС), которое они предоставляют, а также на основе окончательного координатного решения методом одночастотного позиционирования. Для получения релевантной статистики обработан набор данных за длительный период времени (2000–2020 гг.). Сделан вывод, что к наиболее перспективным моделям с точки зрения ионосферной коррекции одночастотного решения следует отнести модели BDGIM и NeQuick.

Ключевые слова: ГНСС, позиционирование, ионосферная коррекция, операционные ионосферные модели.

Abstract. Currently, there are a number of ionospheric models to correct coordinate measurements of global navigation satellite systems. The accuracy of the models can vary significantly depending on the season, local time, latitude and geophysical conditions. In the study, we analyze five models designed for ionospheric correction: Klobuchar's model (GPS), GLONASS, Beidou (BDGIM), NeQuick-G (Galileo), and GEMTEC. Models are analyzed in terms of the total electron content (TEC) they provide, as well as on the basis of the final coordinate solution by the single frequency positioning method. To obtain relevant statistics, a data set for a long period of time was processed (2000–2020). It is concluded that the most promising models in terms of ionospheric correction of a single-frequency solution are the BDGIM and NeQuick models.

Keywords: GNSS, positioning, ionospheric correction, operational ionospheric models.

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) стали одним из стандартов позиционирования [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. При прохождении спутникового сигнала ГНСС через ионосферу происходит его задержка, зависящая от частоты радиосигнала. Эта задержка влияет на качество принимаемого сигнала, и, как следствие, на точность определения координат. Причем качество позиционирования наиболее существенно зависит от ионосферной поправки при работе в одночастотном режиме. Для учета ионосферной ошибки используются операционные модели, рекомендованные соответствующими интерфейсными контрольными документами разных систем ГНСС, а также эмпирические модели. При этом вопрос о точности моделирования ионосферы остается ключевым. В моделях может возникать как систематическая погрешность, так и случайная ошибка [Yasyukevich et al., 2010].

Обычно качество модели оценивается исходя из значений полного электронного содержания (ПЭС), которое она предоставляет [Farah, 2020]. Точность модели может значительно варьироваться в зависимости от сезона, местного времени, широты и геофизических условий. В настоящем исследовании мы анализируем четыре операционные модели ионосферы с позиции данных ПЭС. В исследовании мы также оцениваем эффективность каждой модели на основе величины ошибки окончательного координатного решения методом одночастотного позиционирования с коррекцией по данной модели.

Анализируются следующие модели: модель Клобучара, используемая в системе GPS [Klobuchar, 1987], BDGIM, предложенная для использования в навигационной системе BeiDou [Yuan et al., 2019], NeQuick-G [NeQuick-G, 2016], используемая в системе Galileo, и ГЛОНАСС [ГЛОНАСС, 2016]. Кроме того, рассмотрена эмпирическая модель GEMTEC [Ivanov et al., 2011]. При тестировании моделей в качестве эталона использованы данные ПЭС глобальных карт ионосферы GIM UQRG [Hernández-Pajares et al., 2009].

Точность моделей с точки зрения данных ПЭС

Использовались данные станций ГНСС, расположенных в разных широтных и долготных регионах. Для получения актуальной статистики был обработан набор данных за длительный период времени (2000–2020 гг.). Проведены расчеты отклонений получаемого при моделировании ПЭС и получены функции распределения отклонений ПЭС (ΔI), выдаваемых моделью, от значений ПЭС по данным ионосферных карт. Оценена динамика отклонений ΔI и среднеквадратического отклонения (СКО).

На рис. 1 (слева) представлены функции распределения отклонения ПЭС ΔI для различных моделей на для ст. IRKJ (52° N, 104° E) за весь анализируемый период. Видно, что за исключением модели

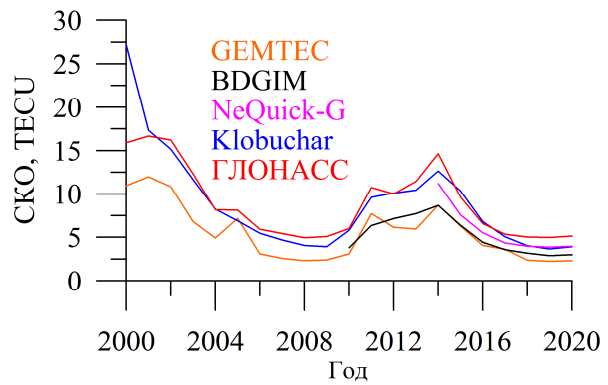
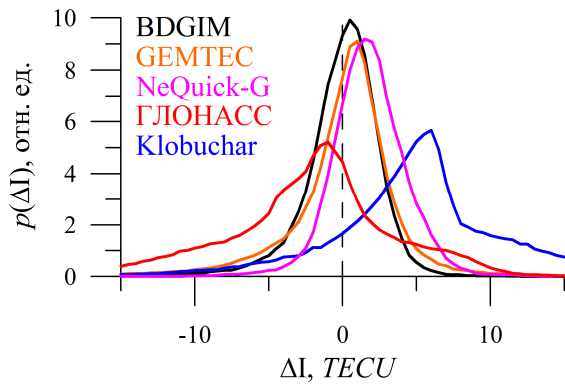


Рис. 1. Функции распределения отклонений ΔI между модельными значениями ПЭС и данными глобальных карт (слева), а также СКО ПЭС для ст. IRKJ за 2000–2020 гг. (справа)

Клобучара все модели дают почти несмещенные оценки ПЭС. При этом наименьшее отклонение между модельными и эталонными значениями ПЭС наблюдается для моделей BDGIM и NeQuick-G. Среднее значение отклонения ΔI не превышает 1 TECU для обеих моделей при любом уровне солнечной активности. Причем для Азиатского региона (где находится станция IRKJ) BDGIM превосходит NeQuick-G. Удовлетворительные результаты оценки ПЭС получены также для модели GEMTEC. Для модели Клобучара наблюдается значительное систематическое смещение в оценке ПЭС. Данная модель систематически завышает значения ПЭС в регионе.

На рис. 1 (справа) показана динамика СКО ПЭС для различных моделей за исследуемый период для ст. IRKJ. Видно, что отклонения в оценке ПЭС и СКО значительно увеличиваются в условиях роста солнечной активности для всех моделей. При этом величина СКО для разных моделей существенно различается. Лучшие результаты получены для моделей BDGIM и GEMTEC для условий как низкой, так и для повышенной солнечной активности. Модели Клобучара и ГЛОНАСС дают наибольшие значения СКО.

Точность моделей с точки зрения одночастотного позиционирования

Для рассмотрения вопроса о качестве вышеуказанных моделей с точки зрения точности позиционирования поведен расчет полной трехмерной ошибки позиционирования σ_{3D} в одночастотном режиме с применением коррекции по исследуемым моделям, а также по данным глобальных ионосферных карт GIM UQRG в качестве эталона. Координаты вычислялись как стандартное итеративное одночастотное решение на основе несглаженных псевдодальностей по C/A-коду. За истинное положение станции принималась суточная медиана полученных координат.

На рис. 2 приведены интегральные функции распределения полной ошибки σ_{3D} для ст. IRKJ с ионосферной коррекцией по данным различных моделей (цветные кривые), а также без коррекции. Видно, что наиболее точное решение получается с применением коррекции по моделям BDGIM и NeQuick-G. Функции распределений ошибки для этих моделей наиболее близки к эталонному решению. Так, для модели NeQuick-G величина полной 3D-ошибки

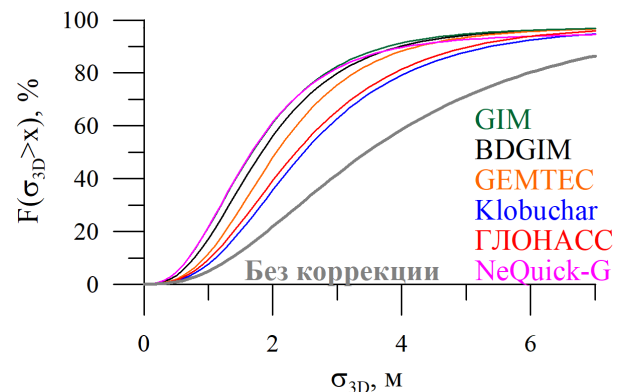


Рис. 2. Функции распределения трехмерной ошибки позиционирования σ_{3D} для ст. IRKJ с ионосферной коррекцией по данным различных моделей (цветные кривые), а также без коррекции (серая кривая)

определения координат относительно истинного положения не превышает 2 м в 60 % случаев, для модели BDGIM — в 55 % случаев, в то время как для моделей Клобучара и ГЛОНАСС — только в ~ 40 % случаев.

На рис. 3 показаны функции распределения полной ошибки σ_{3D} для различных моделей для ст. IRKJ при разных значениях индекса солнечной активности $F10.7$. Видно, что наиболее точное координатное решение получено для моделей NeQuick-G и BDGIM вне зависимости от уровня солнечной активности. При высоком уровне солнечной активности ($F10.7 \geq 250$ с.е.п., рис. 3, справа) использование моделей Клобучара, ГЛОНАСС и GEMTEC приводит к ухудшению точности решения по сравнению с некорректированным решением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделан вывод, что к наиболее перспективным моделям с точки зрения ионосферной коррекции одночастотного решения следует отнести модели BDGIM и NeQuick-G. Недостатком данных моделей является то, что они предоставляют данные только с 2010 и 2016 гг. соответственно (имеется в виду последняя версия NeQuick-G).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках проекта № 20-45-383010, а также Министерства образования и науки РФ.

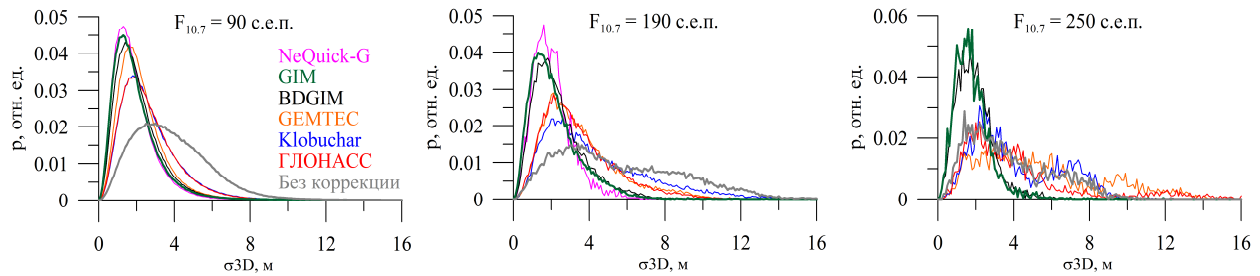


Рис. 3. Распределения σ_{3D} для ст. IRKJ при различных уровнях солнечной активности

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0 / АО «Российские космические системы». М., 2016. 133 с.
- Farah A. Behavior of Broadcast Ionospheric-Delay Models from GPS, Beidou, and Galileo Systems. *Artificial Satellites*. 2020. Vol. 55. P. 61–76.
- Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J. Geodesy*. 2009. Vol. 83. P. 263–275.
- Hofmann-Wellenof B., Lichtenegger H., Wasle E. *GNSS-Global Navigation Satellite Systems*. Springer: Vienna, 2008. 516 p.
- Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. Global Empirical Modeling of the Total Electron Content of the ionosphere for satellite radio navigation systems. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73. P. 1703–1707.
- Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithms for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. Vol. 3. P. 325–331.
- NeQuick-G. *European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users*. 1.2. 2016. URL: http://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Galileo_Ionospheric_Model.pdf.
- Yasyukevich Yu.V., Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Tatarinov P.V. Cross testing of ionosphere models IRI-2001 and IRI-2007, data from satellite altimeters (Topex/Poseidon and Jason-1) and global ionosphere maps. *Adv. Space Res.* 2010. Vol. 46, no. 8. P. 990–1007.
- Yuan Y., Wang N., Li Z., Huo X. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results. *Navigation*. 2019. Vol. 66. P. 55–69.