



Оценка эффективности моделей, используемых для ионосферной коррекции измерений ГНСС

А.О. Куприянов¹✉, Д.А. Морозов¹, Д. Замогильный¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия
✉ gnss@miigaik.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д. Оценка эффективности моделей, используемых для ионосферной коррекции измерений ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69. № 3. С. 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-026.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА ГНСС, спутниковая геодезическая аппаратура, модели ионосферы, ионосферная коррекция измерений, модель Клубучара, NeQuick-G, IRI, полное электронное содержание

АННОТАЦИЯ В данной работе представлены результаты сравнительного анализа эффективности моделей ионосферной коррекции измерений глобальных навигационных спутниковых систем, таких как модель Клубучара, NeQuick-G и IRI-2016. Исследование направлено на оценку точности этих моделей в различных географических регионах, включая территорию Российской Федерации, с учетом особенностей ионосферной активности. Особое внимание уделено методикам вычисления вертикального полного электронного содержания (*англ.* Vertical Total Electron Content, VTEC) и использованию глобальных ионосферных карт (*англ.* Global Ionospheric Map, GIM) для верификации данных. Точность моделей оценивалась на основе среднеквадратической погрешности (СКП) разностей VTEC, рассчитанных по моделям и данным GIM. Проведенный анализ позволил выявить систематические смещения прогнозов и определить наиболее точные модели для различных условий ионосферы. Установлено, что модель NeQuick-G демонстрирует высокую эффективность в условиях спокойной ионосферы, обеспечивая минимальные значения СКП. В то же время модель IRI-2016 показала лучшие результаты при возмущенных состояниях ионосферы, что делает ее предпочтительной для использования в периоды повышенной солнечной активности. Исследование также выявило значительную вариативность точности моделей на территории РФ, что подчеркивает необходимость создания региональных и локальных моделей для достижения наилучших результатов. Полученные данные хорошо соотносятся с другими исследованиями, подтверждая надежность результатов.

1 Введение

Радионавигационные сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), проходя через ионосферу Земли, изменяют скорость своего распространения вследствие дифракции. Из-за этого возникают погрешности измерения псевдодальностей, приводящие в конечном счете к увеличению погрешностей определения координат.

Для повышения точности геодезических работ, выполняемых с использованием спутниковой геодезической аппаратуры, в измерения по сигналам ГНСС вносят поправки за влияние ионосферы. Поправки рассчитываются при помощи выбранной модели ионосферы либо по разности псевдодальностей, измеренных на двух разных частотах.

Основными моделями, применяемыми для ионосферной коррекции измерений ГНСС, являются модель Клобучара, NeQuick-G, IRI и глобальные ионосферные карты (*англ.* Global Ionospheric Map, GIM). Из них первые три могут применяться в режиме, близком к реальному времени. Параметры модели Клобучара транслируются в навигационном сообщении GPS, а для модели NeQuick-G — в навигационном сообщении Galileo. Модель IRI может выполнять моделирование по средним значениям ионосферных индексов за предыдущий период времени. Глобальные ионосферные карты формируются по результатам постобработки измерений на постоянно действующих станциях наблюдения ГНСС и доступны через 24 часа (быстрое решение) или 11 дней (финальное решение)¹.

Поскольку величина ионосферной задержки сигнала зависит от частоты, непосредственно моделируемым параметром является полное электронное содержание (*англ.* Total Electron Content, TEC) ионосферы, которое связано с ионосферной погрешностью кодовых псевдодальностей следующим соотношением [1]:

$$I = \frac{40,308TEC}{f^2},$$

где I — ионосферная задержка, м;
 f — несущая частота радионавигационного сигнала, Гц.

Значения погрешностей, соответствующих $TEC = 1TECU$, приведены на рис. 1.

Рис. 1 
 Ионосферная задержка сигнала при $TEC = 1TECU$
Fig. 1
 Ionospheric signal delay at $TEC = 1TECU$



¹ Ionospheric Products / International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://igs.org/products/#ionosphere> (дата обращения: 25.01.2025).

Сведения о точности получаемых при помощи модели поправок предоставляют только глобальные ионосферные карты, в которых присутствуют оценки среднеквадратической погрешности (СКП) для каждого значения TEC, заданного в узле регулярной сетки. Для современных GIM значения СКП варьируются от 1 до 10 TECU и в среднем составляют 1,523 TECU для рассматриваемого в исследовании периода. Для моделей, доступных в режиме, близком к реальному времени, существуют только апостериорные оценки их точности, полученные в ходе отдельных исследований [2–8]. Такие исследования могут относиться к конкретным станциям [3–6], регионам [7], периодам аномальной солнечной или геомагнитной активности [8]. Это затрудняет выбор модели для использования в конкретных условиях, их совместное применение и назначение весов измерений после внесения в них поправок за ионосферную задержку. В связи с этим актуальными представляются оценка точности и сравнительный анализ моделей ионосферы, используемых для ионосферной коррекции наблюдений ГНСС в режиме, близком к реальному времени. Целью данного исследования является оценка точности вычисления поправок за ионосферную задержку по моделям Клобучара, NeQuick-G и IRI. Оценка выполняется отдельно для всей поверхности Земли, полярных, среднеширотных, экваториальной областей и территории РФ. Полученные результаты позволяют оптимизировать выбор модели для ионосферной коррекции измерений и производить назначение весов измерений с учетом сведений о точности используемого метода ионосферной коррекции.

2 Методика исследования

2.1 Используемые модели ионосферы

Модель Клобучара — это официальный алгоритм ионосферной коррекции, принятый системой GPS. Для вычисления вертикального полного электронного содержания (*англ.* Vertical Total Electron Content, VTEC) по модели Клобучара используются алгоритм, изложенный в интерфейсно-контрольном документе GPS², и некоторые пояснения к нему, приведенные в оригинальной публикации³. Параметры модели ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) выбираются из навигационного файла GPS в формате RINEX на соответствующую дату.

Модель NeQuick-G — это официальный алгоритм ионосферной коррекции, принятый системой Galileo [9] и являющийся оптимизированной версией модели NeQuick [10]. Для вычисления VTEC по модели NeQuick-G⁴ используется ее эталонная реализация в виде программы NeQuickG_JRC.exe на языке программирования C. Параметры модели (a_{i0}, a_{i1}, a_{i2}), используемые для расчета эффективного уровня ионизации A_z , выбираются из навигационного файла Galileo в формате RINEX на соответствующую дату.

Для вычисления VTEC по модели IRI выбрана версия модели IRI-2016 [11] как наиболее распространенная на текущий момент. В частности, используется ее эталонная реализация в виде программы на языке программирования Fortran `iritest.for`⁵, доработанная авторами для проведения необходимых

2 IS-GPS-200. Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kaf401.rloc.ru/files/icd200d.pdf> (дата обращения: 25.01.2025).

3 Klobuchar J.A. A first-order, worldwide, ionospheric, time-delay algorithm // Air Force Surveys in Geophysics. 1975. No. 324. P. 1–24.

4 European GNSS (Galileo) Open Service. Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_Ionospheric_Model.pdf (дата обращения: 16.11.2024).

5 Index of IRI-2016 / International reference ionosphere. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iramodel.org/IRI-2016/> (дата обращения: 25.01.2025).

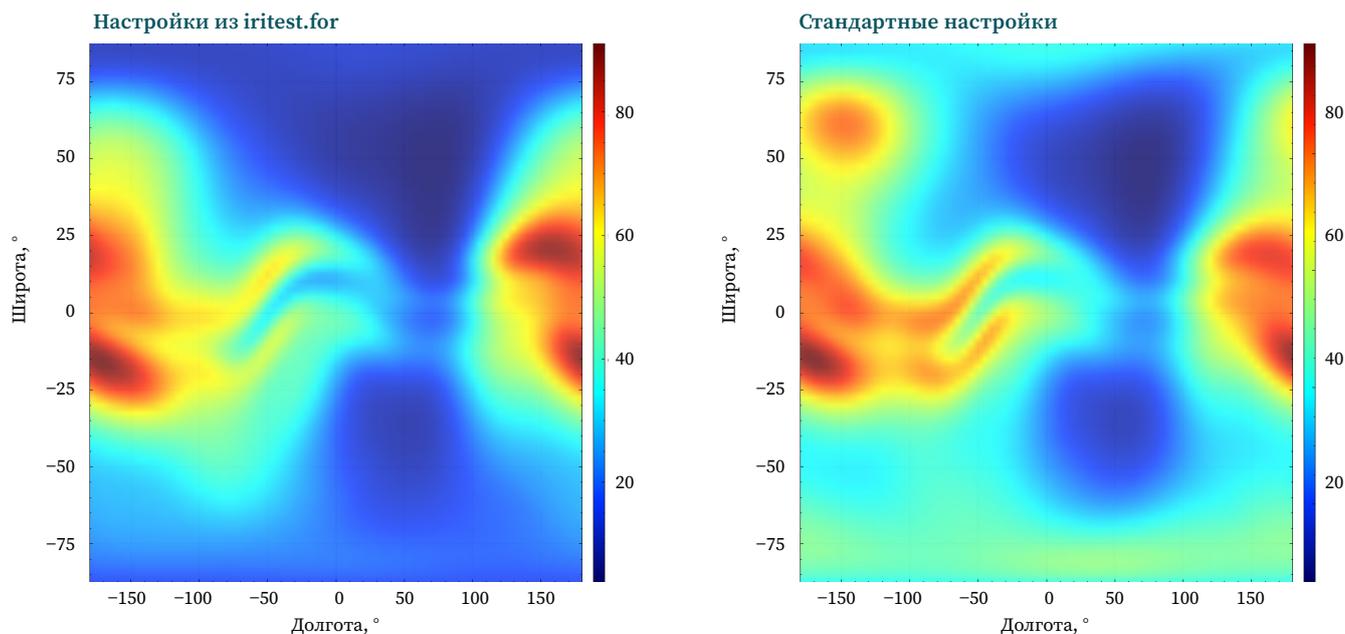


Рис. 2  Тепловая карта VTEC, полученная при стандартных настройках и при настройках из iritest.for

Fig. 2 VTEC heat map obtained with standard settings and with settings from iritest.for

вычислений. Рассматривались два варианта настройки параметров программы: представленные в IRI-Switches-options как стандартные параметры, используемые по умолчанию в программе iritest.for. Результаты вычисления VTEC с разными настройками существенно различаются, тепловые карты VTEC, полученные с обоими вариантами настроек, представлены на рис. 2.

Результаты, полученные при стандартных настройках, сильно смещены (на 10–20 TECU) относительно остальных моделей, при использовании параметров из iritest.for такого не наблюдается. В связи с этим в данном исследовании применяются параметры, принятые в iritest.for.

2.2 Методика оценки точности

В качестве критерия эффективности модели будем использовать СКП VTEC в рамках региона, которое вычислено на одну эпоху по разностям значений, полученных из исследуемой модели и по глобальной ионосферной карте с учетом ее погрешностей. Для оценки точности выбраны 12 суток в течение 2023 года, а именно первые сутки каждого месяца. Данные выбраны на предыдущий год относительно момента проведения исследования как наиболее актуальные, а конкретные даты определены для обеспечения равномерного покрытия диапазона внешних условий и оптимизации объемов вычислений.

В качестве характеристики точности модели используется СКП разности VTEC, вычисленного по оцениваемой модели, и VTEC, вычисленного по глобальной ионосферной карте:

$$2 \quad \Delta VTEC = VTEC_{MOD} - VTEC_{GIM},$$

где $VTEC_{MOD}$ — вертикальное полное электронное содержание, вычисленное при помощи исследуемой модели;

$VTEC_{GIM}$ — вертикальное полное электронное содержание, вычисленное по GIM.

Для вычисления СКП используются значения VTEC, полученные в узлах регулярной сетки на заданный момент времени. Применяется формула Бесселя:

$$3 \quad m_{\Delta VTEC} = \sqrt{\frac{\sum \Delta VTEC^2}{n-1}},$$

где n — число значений $\Delta VTEC$, используемых для вычисления.

Параметры используемой регулярной сетки аналогичны параметрам GIM в формате IONEX, формируемым IGS, а именно:

- границы по широте от 87,5° до -87,5°;
- границы по долготе от -180° до +180°;
- шаг по широте 2,5°;
- шаг по долготе 5,0°.

Поскольку значения выбираются непосредственно из узлов регулярной сетки, они не отягощены дополнительными погрешностями интерполяции.

Вычисления производятся для каждого рассматриваемых суток на моменты времени начиная с 0:00 с интервалом в 2 часа (всего 13 эпох для каждого суток). Это также соответствует интервалам, используемым GIM, и позволяет не отягощать результат погрешностями интерполяции по времени.

Вычисления производятся отдельно для следующих регионов:

- вся поверхность Земли (в границах регулярной сетки, указанных выше);
- полярные области ($|B| > 66,562^\circ$);
- среднеширотные области ($23,43722^\circ < |B| < 66,562^\circ$);
- экваториальная область ($|B| < 23,43722^\circ$);
- территория РФ ($41,1833^\circ < B < 81,8500^\circ$, $L > 19,6333^\circ$ или $-180^\circ < L < -169,0000^\circ$).

Перейти по СКП разностей непосредственно к СКП вычисления VTEC по модели можно, используя следующее соотношение, полученное для функции (2) при помощи формулы СКП функции общего вида:

$$4 \quad m_{VTEC} = \sqrt{m_{\Delta VTEC}^2 - m_{\Delta VTEC_GIM}^2}$$

где m_{VTEC} — СКП вычисления VTEC при помощи исследуемой модели; $m_{\Delta VTEC_GIM}$ — СКП вычисления VTEC при помощи исследуемой GIM.

Следует отметить, что формула (4) может привести к вычислительной ошибке (извлечение корня из отрицательного числа), вследствие чего для ее практического применения предпочтительна ситуация, когда $m_{VTEC} > m_{VTEC_GIM}$. В настоящем исследовании m_{VTEC} как минимум в два раза больше, чем m_{VTEC_GIM} , и, следовательно, такой проблемы не ожидается.

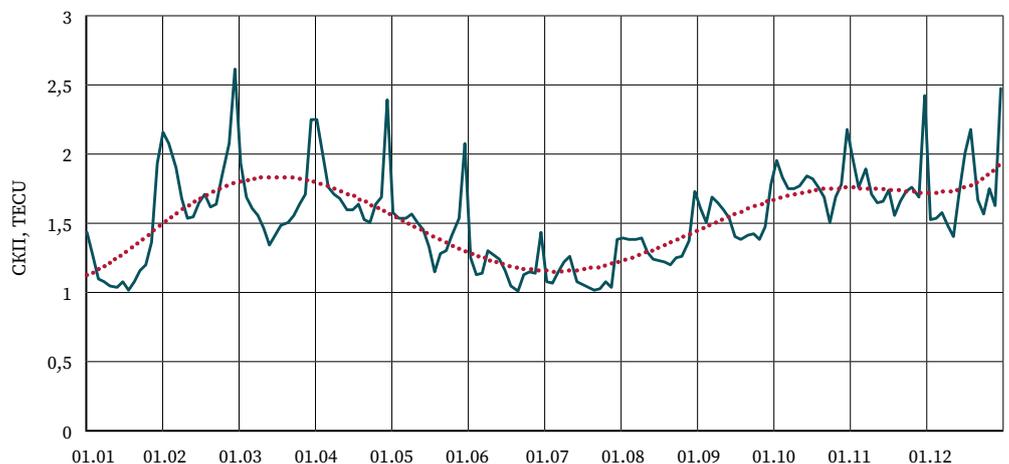
В качестве значения m_{VTEC_GIM} используется осредненное по всем использованным узлам среднее квадратическое отклонение VTEC, приведенное в GIM. График вычисленных средних значений m_{VTEC_GIM} на рассматриваемые эпохи приведен на рис. 3. Далее при анализе результатов будем рассматривать как $m_{\Delta VTEC}$, так и m_{VTEC} .

На рис. 3 наблюдается явная суточная динамика. Максимальные значения m_{VTEC_GIM} соответствуют моментам начала и конца суток, а минимальные — середине суток. Это обусловлено использованием при получении GIM суточных файлов наблюдений ГНСС, вследствие чего для первой и последней эпох используется меньший объем измерений, чем для остальных.

Для практической реализации представленной методики использовано специальное программное обеспечение, разработанное авторами на языке программирования C++ с применением фреймворка QT. Кроме выполнения необходимых расчетов программное обеспечение позволяет визуализировать данные в виде тепловых карт.

Рис. 3 Средние значения m_{VTEC_GIM} на рассматриваемые эпохи

Fig. 3 Average values m_{VTEC_GIM} for the considered epochs



Условные обозначения
 — СКП GIM
 Полиномиальная (СКП GIM)

Рис. 4 

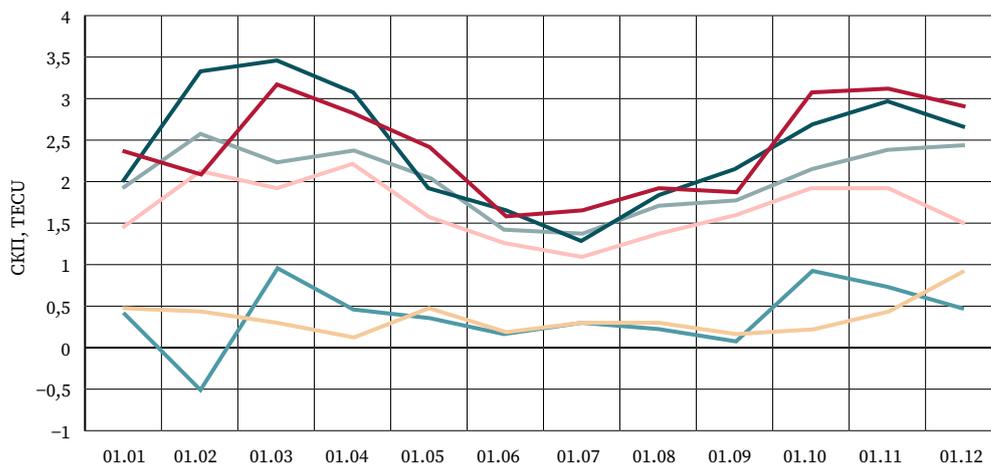
Значения m_{VTEC_GIM} из файла GIM и оцененные по общим эпохам

Fig. 4

m_{VTEC_GIM} values from the GIM file and estimated by common epochs

Условные обозначения

- 0:00 – GIM
- 24:00 – GIM
- 0:00 – Оценка
- 24:00 – Оценка
- 0:00 – Δ
- 24:00 – Δ



2.3 Верификация данных GIM

Каждая глобальная ионосферная карта составляется на одни сутки с интервалом по времени, равным двум часам. Карта содержит 13 эпох. Это означает, что в ней имеются данные на 0:00 текущих суток и 0:00 следующих суток. Таким образом, каждая GIM содержит две повторяющихся эпохи: первую и последнюю. Каждая GIM составляется с использованием наблюдений на постоянно действующих станциях ГНСС продолжительностью одни сутки, обработка соседних суток производится независимо, таким образом, полученные результаты обработки (GIM) также являются независимыми.

Выполнив сравнение данных на общую эпоху GIM, можно оценить $m_{\Delta VTEC}$ по формуле (3). В то же время $m_{\Delta VTEC}$ можно вычислить, преобразовав формулу (4) и используя осредненные значения m_{VTEC_GIM} , полученные из GIM на данную эпоху. Сравнив полученные двумя способами значения, можно сделать выводы о надежности данных о m_{VTEC_GIM} , приведенных в GIM, и корректности их использования для вычислений по формуле (4).

Выполним расчеты для каждой применяемой в исследовании GIM (12 карт) для начальной и конечной эпох (24 значения), используя GIM на соседние даты (дополнительно использовано 24 файла GIM). Для каждого из исходных 12 файлов выполнялась оценка точности на эпоху 0:00 и 24:00. На рис. 4 приведены оцененные таким способом m_{VTEC_GIM} , средние значения m_{VTEC_GIM} из файла IONEX и разности между ними.

Оцененные значения в среднем на 0,379 TECU, или на 21 %, больше, чем представленные в файле IONEX. При этом динамика изменения m_{VTEC_GIM} в течение года одинакова для всех рассматриваемых рядов. Исходя из этого, можно заключить, что оценки точности GIM несколько занижены, но в общем репрезентативны.

3 Результаты

По результатам выполненных вычислений получены $m_{\Delta VTEC}$ на 156 эпох по каждому рассматриваемому региону. Результаты представлены на рис. 5–7 для модели Клубочара, NeQuick-G и IRI-2016 соответственно.

Средние значения $m_{\Delta VTEC}$ за все рассматриваемые эпохи для всех регионов по каждой модели приведены на рис. 8. Аналогичные данные о m_{VTEC} , вычисленные по формуле (4), представлены на рис. 8. При вычислении использовалось наиболее консервативное значение $m_{VTEC_GIM} = 2,4$ TECU, а именно среднее значение, полученное в ходе оценки по общим эпохам. При таком расчете расхождение между $m_{\Delta VTEC}$ и m_{VTEC} не превышает 20 % (для территории РФ

и полярных регионов). Если использовать среднее значение m_{VTEC_GIM} непосредственно из файла IONEX, равное 1,5 TECU, то расхождение между $m_{\Delta VTEC}$ и m_{VTEC} не превышает 7 %.

Вычисленные средние значения $\Delta VTEC$ (систематические смещения прогноза) приведены на рис. 9. Наименее смещенный прогноз получен для IRI-2016, а наиболее смещенные модели Клобучара.

Рис. 5 ➤

Графики $m_{\Delta VTEC}$ для модели Клобучара

Fig. 5

$m_{\Delta VTEC}$ graphs for the Klobuchar model

Условные обозначения

- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ

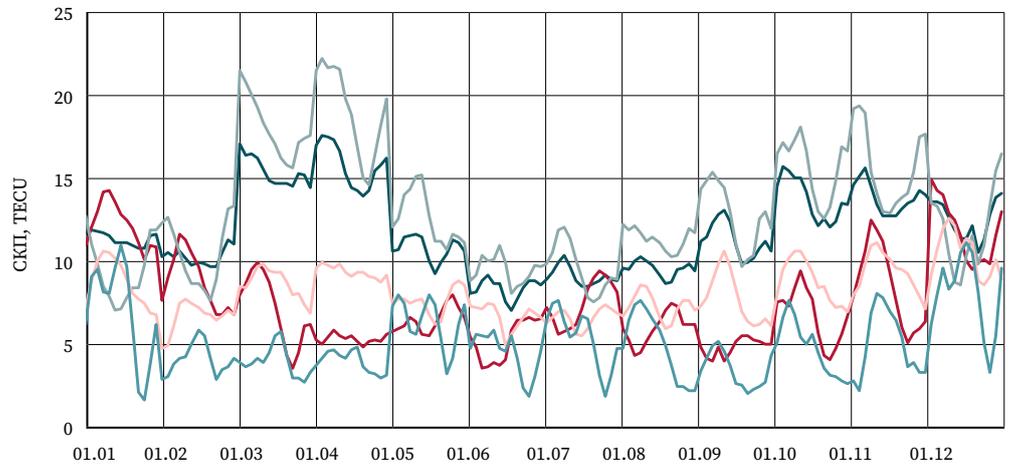


Рис. 6 ➤

Графики $m_{\Delta VTEC}$ для модели NeQuick-G

Fig. 6

$m_{\Delta VTEC}$ graphs for the NeQuick-G model

Условные обозначения

- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ

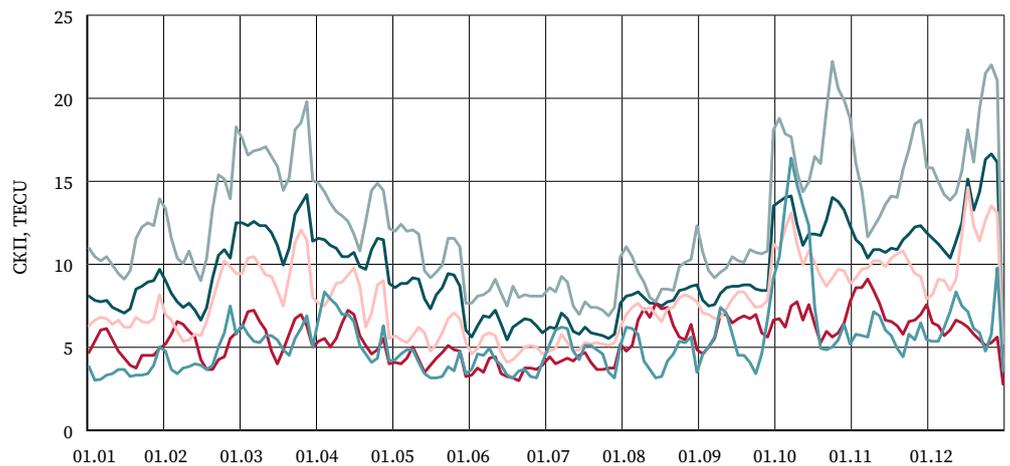


Рис. 7 ➤

Графики $m_{\Delta VTEC}$ для модели IRI-2016

Fig. 7

$m_{\Delta VTEC}$ graphs for the IRI-2016 model

Условные обозначения

- Вся поверхность
- Полярные регионы
- Тропический регион
- Среднеширотные регионы
- Территория РФ

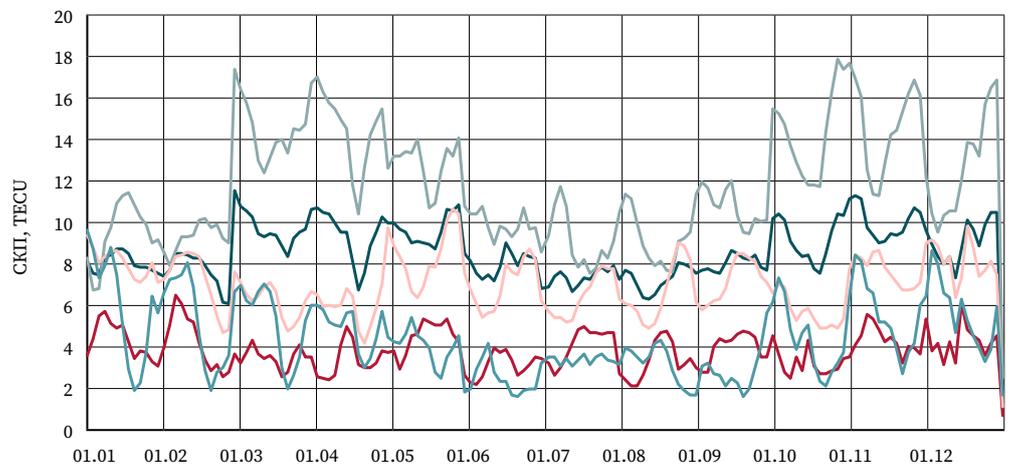


Рис. 8 
Средние значения $m_{\Delta VTEC}$ и m_{VTEC}

Fig. 8
Average values of $m_{\Delta VTEC}$ and m_{VTEC}

Условные обозначения
 m_{VTEC} (Кло)  $m_{\Delta VTEC}$ (NeQ)
 $m_{\Delta VTEC}$ (Кло)  m_{VTEC} (IRI)
 m_{VTEC} (NeQ)  $m_{\Delta VTEC}$ (IRI)

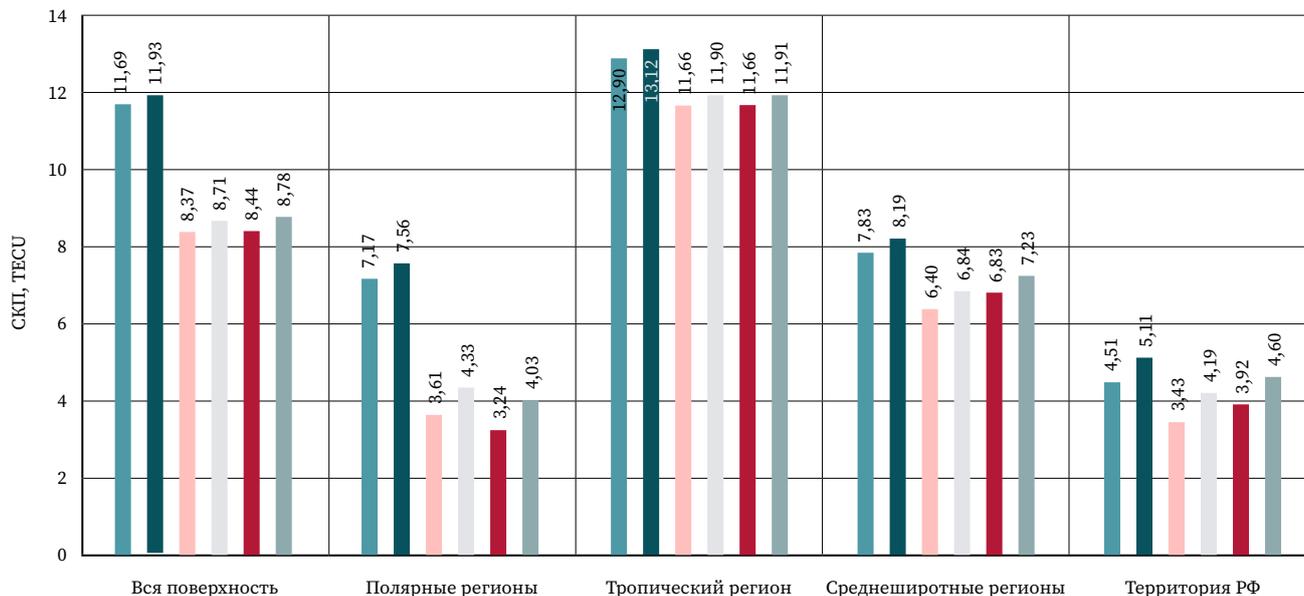


Рис. 9 
Средние значения $\Delta VTEC$

Fig. 9
Average $\Delta VTEC$ values

Условные обозначения
 Клобучар
 NeQuick-G
 IRI-2016



Следует отметить, что для территории РФ получены значения, сопоставимые с полярными регионами, так как этот регион был единственным ограниченным по долготе и, соответственно, часть значений m_{VTEC} получена в условиях, когда все узлы (или большая их часть) находятся в неосвещенной части поверхности Земли. Если исключить из анализа периоды времени с 14:00 до 22:00 по UTC, то $m_{\Delta VTEC}$ будут равны 5,784 для модели Клобучара, 4,702 — для NeQuick-G и 5,335 — для IRI-2016. Это лучше соответствует ожидаемым средним показателям между среднеширотными и полярными регионами.

4 Обсуждение

Для всех моделей наблюдается суточная цикличность изменения $m_{\Delta VTEC}$ при рассмотрении территории РФ. Поскольку этот регион ограничен по долготе, точность вычисления VTEC в ночное время лучше, чем в дневное. В такой ситуации более показательным является результат, выраженный в процентах от самого значения VTEC.

Несмотря на то что средние $m_{\Delta VTEC}$ для NeQuick-G и IRI-2016 близки, при детальном рассмотрении результатов модели проявляют разные тенденции. NeQuick-G для ряда суток позволила получить $m_{\Delta VTEC}$ менее 2 TECU на территории РФ, что сопоставимо с точностью GIM. При этом для других суток СКП превышало 20 TECU. Модель IRI-2016 при этом позволила получить данные с СКП не менее чем 4 TECU, но и максимальное значение не превышает 8–10 TECU. На рис. 10 приведена тепловая карта VTEC на эпоху 01.10.23 6:00 (UTC) с наибольшим значением $m_{\Delta VTEC}$ для NeQuick-G. В частности, отчетливо видно возмущение в области средних широт, приводящее к появлению столь высокого СКП. Рассмотрев тепловую карту разностей NeQuick-G и GIM на эту эпоху, представленную на рис. 11, можно сделать вывод, что данный эффект является неточностью работы модели, а не реальным явлением.

Полученные данные в части сопоставимых значений СКП для NeQuick-G и IRI-2016 хорошо соотносятся с другими исследованиями, в частности 3,5 и 3,2 TECU в работе [4].

Рис. 10  Тепловые карты VTEC, полученные по модели NeQuick-G для восточного полушария и для территории РФ

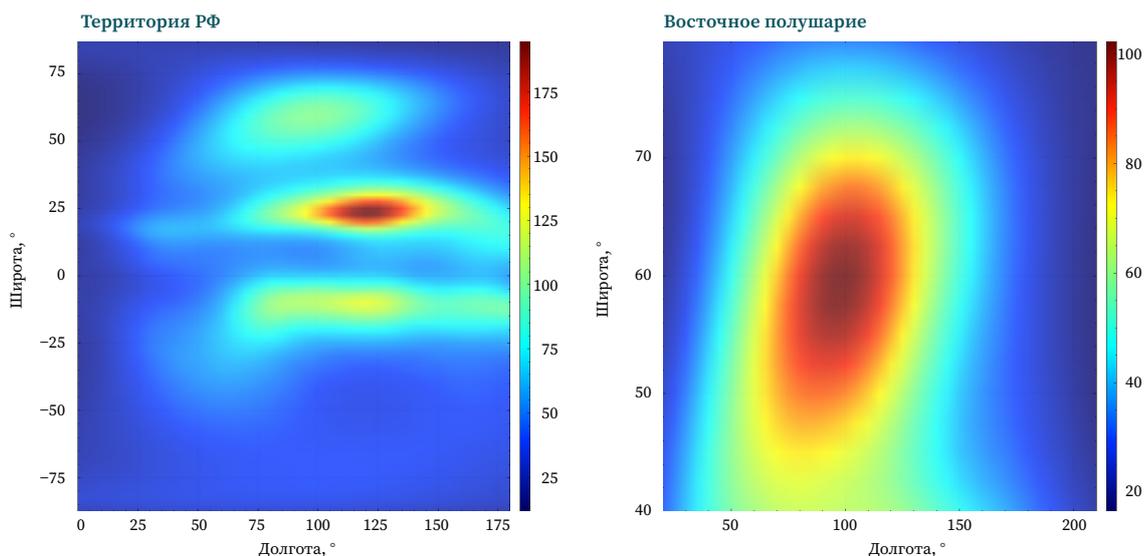


Рис. 11  Тепловые карты разностей VTEC, полученные по модели NeQuick-G и GIM для восточного полушария и для территории РФ

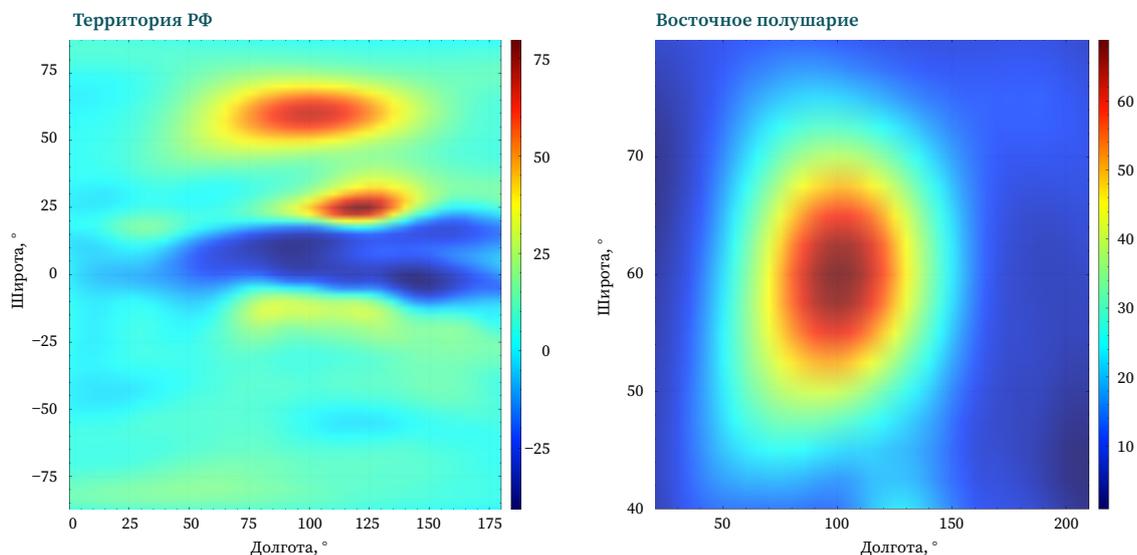
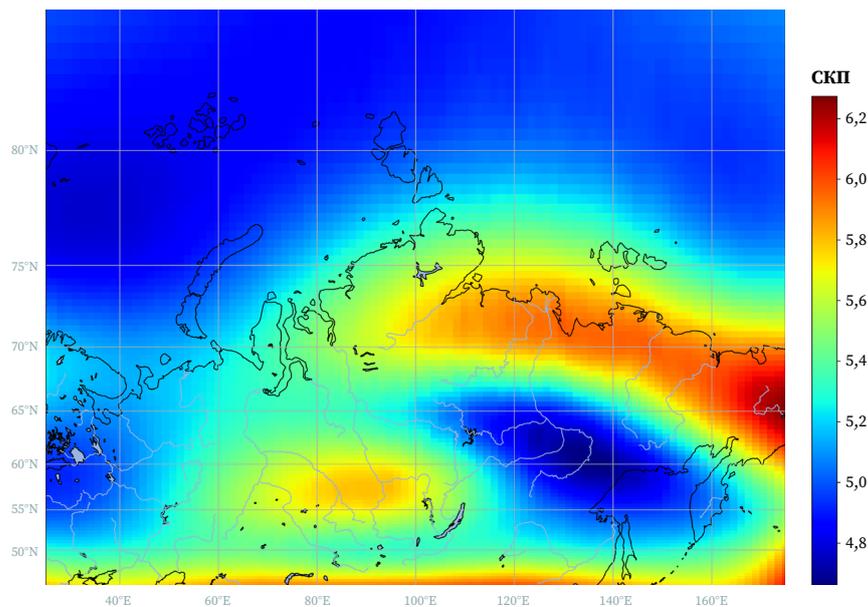


Рис. 12

Картограмма пространственного распределения $m_{\Delta VTEC}$ для NeQuick-G на территории РФ

Fig. 12

Cartogram of the spatial distribution of $m_{\Delta VTEC}$ for NeQuick-G in the territory of the Russian Federation



Результаты опираются на ограниченную выборку периодов времени в течение года. Чтобы удостовериться, что это не оказало существенного влияния на качество результатов, и для получения более детальных по точности моделей на территории РФ были выполнены дополнительные вычисления для модели NeQuick-G. Для этих вычислений использованы данные о TЕС, полученных по моделям NeQuick-G и GIM, на весь 2023 год с интервалом по времени 15 мин. на сетке с шагом в $5,0^\circ$ по широте и долготе. Расчеты были выполнены в соответствии с приведенной выше методикой как для всего набора данных (9 776 160 значений $\Delta VTEC$), так и для каждого отдельного узла (35 040 значений $\Delta VTEC$).

На рис. 12 представлена картограмма распределения $m_{\Delta VTEC}$, полученная для сетки с шагом в $5,0^\circ$ по широте и долготе.

Для рассматриваемого региона $m_{\Delta VTEC}$ варьируется в пределах от 4,7 до 6,3 TECU, а m_{VTEC} , вычисленная по всем данным выборки, составила 5,3 TECU. На картограмме явно просматривается пространственное распределение $m_{\Delta VTEC}$, что свидетельствует о наличии зависимости величины погрешностей модели от пространственного положения точки. Наибольшие значения СКП соответствуют южной границе региона и северо-восточной его части. Полученное по всей выборке значение $m_{\Delta VTEC}$ на 1,1 TECU выше, чем полученное ранее по ограниченной выборке. Это может быть обусловлено многими факторами, в частности дополнительными погрешностями, возникающими при интерполяции данных GIM по времени (для интервала в 15 мин.), использованием большего шага по широте и потенциальным наличием суток с большими расхождениями (выбросами) между NeQuick-G и GIM (аналогично наблюдаемому 01.10.2023). При этом расхождение примерно в 20 % между оценками, полученными по разному объему входных данных, позволяют составить более качественные представления о вариативности $m_{\Delta VTEC}$ и репрезентативности данных.

5 Выводы

По результатам проведенного исследования получены оценки точности ($m_{\Delta VTEC}$ и m_{VTEC}) для моделей Клобушара, NeQuick-G, IRI-2016 по пяти рассматриваемым регионам. Исходя из результатов оценки и других данных, выявленных в процессе исследования, можно сделать следующие выводы:

1. Модель Клобушара имеет точность в среднем на 27 % ниже, чем NeQuick-G или IRI-2016 (для всей поверхности). Наихудшим образом модель

проявляет себя в полярных регионах, где ее точность ниже на 45 %, а наилучшим — в экваториальном, где ее точность ниже на 9 %.

2. Модели NeQuick-G и IRI-2016 имеют практически одинаковые $m_{\Delta VTEC}$ и m_{VTEC} для всех рассматриваемых регионов. При этом IRI-2016 позволяет получить более предсказуемый результат, а NeQuick-G — более точный результат в отдельных случаях. Если рассматривать в качестве характеристики стабильности результата СКП от мгновенных значений $m_{\Delta VTEC}$ по всей поверхности, то для NeQuick-G получим 2,75 TECU, а для IRI-2016 — 1,21 TECU.
3. Наибольшие СКП для всех моделей относятся к экваториальному региону, а наименьшие — к полярным регионам. Для территории РФ получены промежуточные значения между среднеширотными и полярными регионами. Тенденция наблюдается для всех трех рассматриваемых моделей.
4. Наилучшими из рассмотренных моделей для ионосферной коррекции наблюдений ГНСС на территории РФ являются NeQuick-G (для периодов со спокойным состоянием ионосферы) и IRI-2016 (для периодов с возмущенным состоянием ионосферы).
5. Для территории Российской Федерации, которая включает как среднеширотные, так и полярные регионы, наблюдается значительная вариативность точности моделей. Это подчеркивает необходимость создания региональных и локальных моделей для достижения наилучших результатов на территории РФ.

В ходе дальнейших исследований планируется:

- 1) рассмотреть более широкий перечень моделей ионосферы, в частности IRI-Plas 2017, IRI-2020, BDGIM [12, 13], GEMTEC [14], модель ионосферы ГЛОНАСС (параметры для которой транслируются в навигационном сообщении сигнала L3) и др.;
- 2) провести анализ с использованием большего объема данных на более длительные периоды времени;
- 3) оценить точность при комбинировании данных нескольких моделей;
- 4) сравнить эффективность моделей непосредственно для повышения точности позиционирования.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: монография: в 2 т. М.: Картогеоцентр, 2005. Т. 1. 334 с.
2. Yasyukevich Y., Zatolokin D., Yasyukevich A., et al. Ionosphere Models Validation: TEC and Positioning Domain // AGU Fall Meeting Abstracts. New Orleans LA, 2021. P. SA44B-09.
3. Nibigira J. de D., Ratnam D.V., Sivakrishna K. Performance Analysis of NeQuick-G, IRI-2016, IRI-Plas 2017 and AfriTEC Models over the African Region during the Geomagnetic Storm of March 2015 // Geomagnetism and Aeronomy. 2023. Vol. 63. P. 83–98. DOI:10.1134/s0016793223600601.
4. Yasyukevich Y.V., Zatolokin D., Padokhin A., et al. Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains // Sensors. 2023. Vol. 23. No. 10. P. 4773. DOI:10.3390/s23104773.
5. Tian Y., Li S., Shen H., et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models // Astrophysics and Space Science. 2022. Vol. 367. No. 8. P. 78. DOI:10.1007/s10509-022-04109-7.
6. Gatica-Acevedo V.J., Sergeeva M.A., Maltseva O.A., et al. TEC variations and IRI-2016, IRI-2020 and IRI-Plas performance in Mexico // Advances in Space Research. 2025. Vol. 75. No. 5. P. 4260–4273. DOI:10.1016/j.asr.2024.03.046.
7. Liu J., Jia X., Zhu Y., et al. Comparing GNSS TEC data from the African continent with IRI-2016, IRI-Plas, and NeQuick predictions. Advances in Space Research // Advances in Space Research. 2022. Vol. 69. No. 7. P. 2852–2864. DOI:10.1016/j.asr.2022.01.008.
8. Atıcı R., Sağır S., Emelyanov L.Y., et al. Investigation of ionospheric electron density change during two partial solar eclipses and its comparison with predictions of NeQuick 2 and IRI-2016 Models // Wireless Personal Communications. 2021. Vol. 118. P. 2239–2251. DOI:10.1007/s11277-021-08122-x.

9. Aragon-Angel A., Zürn M., Rovira-Garcia A. Galileo ionospheric correction algorithm: An optimization study of NeQuick-G // Radio science. 2019. Vol. 54. No. 11. P. 1156–1169. DOI:10.1029/2019RS006875.
10. Montenbruck O., González Rodríguez B. NeQuick-G performance assessment for space applications // GPS solutions. 2020. Vol. 24. P. 13. DOI:10.1007/s10291-019-0931-2.
11. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. Huang International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. No. 15. P. 418–429. DOI:10.1002/2016SW001593.
12. Yuan Y., Wang N., Li Z., et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results // Navigation. 2019. Vol. 66. No. 1. P. 55–69. DOI:10.1002/navi.292.
13. Zhu Y., Tan S., Zhang Q., et al. Accuracy evaluation of the latest BDGIM for BDS-3 satellites // Advances in space research. 2019. Vol. 64. No. 6. P. 1217–1224. DOI:10.1016/j.asr.2019.06.021.
14. Ivanov V.B., Gorbachev O.A., Kholmogorov A.A., et al. Optimization and testing of the GEMTEC model of total electron content in the ionosphere // Cosmic Research. 2015. Vol. 53. P. 267–271. DOI:10.1134/S0010952515040036.

АВТОРЫ **Куприянов Андрей Олегович**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
канд. техн. наук, доцент
 0009-0008-9222-5579

Морозов Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
 0009-0002-1254-9095

Замогильный Дмитрий

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
 0009-0008-3242-1471

Поступила 08.02.2025. Принята к публикации 23.06.2025. Опубликовано 30.06.2025.



Assessment of the effectiveness of models used for ionospheric correction of GNSS measurements

Andrey O. Kupriyanov¹✉, Dmitry A. Morozov¹, Dmitry Zamogilny¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ gnss@miigaik.ru

CITATION Kupriyanov AO, Morozov DA, Zamogilny D. Assessment of the effectiveness of models used for ionospheric correction of GNSS measurements. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(3): 8–21. DOI:10.30533/GiA-2025-026.

KEYWORDS GNSS, GNSS receiver, ionospheric models, ionospheric measurement correction, Klobuchar model, NeQuick-G, IRI, total electron content

ABSTRACT Global navigation satellite systems (GNSS) are significantly affected by ionospheric delays, which impact on the accuracy of coordinate determination. In this study, the performance of three ionospheric correction models was evaluated: Klobuchar, NeQuick-G, and IRI-2016 – in various geographic regions, including the territory of the Russian Federation. The research is based on data from the first day of each month in 2023, using vertical total electron content (VTEC) values calculated at regular grid points with a 2.5° latitude and 5.0° longitude step. The accuracy of these models is assessed using the root mean square (RMS) of the difference in VTEC calculated by the models and global ionospheric maps (GIM). The analysis covers the entire Earth's surface, polar regions, mid-latitude regions, equatorial regions, and the territory of the Russian Federation. The Klobuchar model demonstrates the lowest accuracy, particularly in polar regions, where its accuracy values do not exceed 45 % and lower than that of the other models. In equatorial regions, its accuracy is only 9 % lower. The NeQuick-G and IRI-2016 models show similar overall accuracy, but NeQuick-G provides more accurate results in specific cases, with RMS values as low as 2 TECU, while IRI-2016 offers more predictable results with RMS values not exceeding 8–10 TECU. For the territory of the Russian Federation, the NeQuick-G model is most effective during calm ionospheric periods, with an RMS of 4.702 TECU, and the IRI-2016 model is preferred during disturbed conditions, with an RMS of 5.335 TECU.

REFERENCES 1. Antonovich KM. *Ispol'zovanie sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [The use of satellite radio navigation systems in geodesy] [monograph]. In 2 vols. Vol. 1. Moscow: Kartgeocenter; 2005. 334 p. (In Russian).

2. Yasyukevich Y, Zatolokin D, Yasyukevich A, et al. Ionosphere Models Validation: TEC and Positioning Domain. *AGU Fall Meeting Abstracts*. New Orleans LA; 2021: SA44B-09.
3. Nibigira JdeD, Ratnam DV, Sivakrishna K. Performance Analysis of NeQuick-G, IRI-2016, IRI-Plas 2017 and AfriTEC Models over the African Region during the Geomagnetic Storm of March 2015. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2023;63: 83–98. DOI:10.1134/s0016793223600601.
4. Yasyukevich YV, Zatolokin D, Padokhin A, et al. Klobuchar, NeQuickG, BDGIM, GLONASS, IRI-2016, IRI-2012, IRI-Plas, NeQuick2, and GEMTEC Ionospheric Models: A Comparison in Total Electron Content and Positioning Domains. *Sensors*. 2023;23(10): 4773. DOI:10.3390/s23104773.
5. Tian Y, Li S, Shen H, et al. Comparative analysis of BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar ionospheric broadcast models. *Astrophysics and Space Science*. 2022;367(8): 78. DOI:10.1007/s10509-022-04109-7.
6. Gatica-Acevedo VJ, Sergeeva MA, Maltseva OA, et al. TEC variations and IRI-2016, IRI-2020 and IRI-Plas performance in Mexico. *Advances in Space Research*. 2025;75(5): 4260–4273. DOI:10.1016/j.asr.2024.03.046.
7. Liu J, Jia X, Zhu Y, et al. Comparing GNSS TEC data from the African continent with IRI-2016, IRI-Plas, and NeQuick predictions. *Advances in Space Research*. 2022;69(7): 2852–2864. DOI:10.1016/j.asr.2022.01.008.
8. Atıcı R, Sağır S, Emelyanov LY, et al. Investigation of Ionospheric Electron Density Change During Two Partial Solar Eclipses and Its Comparison with Predictions of NeQuick 2 and IRI-2016 Models. *Wireless Personal Communications*. 2021;118: 2239–2251. DOI:10.1007/s11277-021-08122-x.
9. Aragon-Angel A, Zürn M, Rovira-Garcia A. Galileo Ionospheric Correction Algorithm: An Optimization Study of NeQuick-G. *Radio Science*. 2019;54(11): 1156–1169. DOI:10.1029/2019RS006875.
10. Montenbruck O, González Rodríguez B. NeQuick-G performance assessment for space applications. *GPS Solutions*. 2020;24: 13. DOI:10.1007/s10291-019-0931-2.
11. Bilitza D, Altadill D, Truhlik V, et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017;15: 418–429. DOI:10.1002/2016SW001593.
12. Yuan Y, Wang N, Li Z, et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results. *Navigation: journal of the Institute of Navigation*. 2019;66(1): 55–69. DOI:10.1002/navi.292.
13. Zhu Y, Tan S, Zhang Q, et al. Accuracy evaluation of the latest BDGIM for BDS-3 satellites. *Advances in Space Research*. 2019;64(6): 1217–1224. DOI:10.1016/j.asr.2019.06.021.
14. Ivanov VB, Gorbachev OA, Kholmogorov AA, et al. Optimization and testing of the GEMTEC model of total electron content in the ionosphere. *Cosmic Research*. 2015;53(4): 267–271. DOI:10.1134/S0010952515040036.

AUTHORS**Andrey O. Kupriyanov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
 PhD in Engineering
 0009-0008-9222-5579

Dmitry A. Morozov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
 0009-0002-1254-9095

Dmitry Zamogilny

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
 0009-0008-3242-1471

Submitted: February 08, 2025. Accepted: June 23, 2025. Published: June 30, 2025.