

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.4>

УДК: 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ОПЕРАЦИОННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ МОДЕЛЯХ КЛОБУЧАРА, BDGIM И NEQUICKG

Ч. Чэнь¹, А.М. Падохин^{1,2,3}, А.К. Иванов¹, И.А. Павлов^{1,2,3}

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН
108840, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Статья поступила в редакцию 12 ноября 2024.

Аннотация. В статье рассматриваются особенности оценки глобального электронного содержания (GEC) ионосферы на основе простых эмпирических моделей Клобучара, BDGIM и NeQuickG, использующихся в системах спутниковой навигации GPS, Beidou и Galileo. С использованием данных наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем за практически полный 24-й цикл солнечной активности и глобальных ионосферных карт CODG исследована статистика отклонений и спектральные характеристики вариаций GEC, оцениваемых в моделях и наблюдаемых экспериментально. Показано, что среднее отклонение и СКО оценок GEC по моделям BDGIM и NeQuickG от данных CODG составляет (-0.041GECu и 0.092GECu) и (-0.025GECu и 0.042GECu), соответственно. Таким образом, модель NeQuickG может быть использована в приложениях, требующих оперативной оценки GEC. Модель BDGIM дает сопоставимые результаты, однако дисперсия

отклонений модельных оценок GEC от экспериментально наблюдаемых для нее выше, чем для NeQuickG, особенно в периоды максимума солнечной активности. Модель Клобучара дает существенно смещенные оценки GEC, как в минимуме (0.172GECu), так и в максимуме 24-го цикла солнечной активности (-0.243GECu) и не может быть рекомендована для оценки GEC. В тоже время модель BDGIM требует улучшений в части надежного воспроизводства амплитуд 27-дневных и полугодовых вариаций GEC, особенно в периоды максимальной солнечной активности, что в перспективе должно также улучшить учет ионосферной задержки в навигационных задачах в одночастотном режиме.

Ключевые слова: ионосфера, глобальные навигационные спутниковые системы, глобальное электронное содержание, модель Клобучара, BDGIM, NeQuickG.

Финансирование: Российский научный фонд проект № 23-17-00157.

Автор для переписки: Падохин Артем Михайлович, padokhin@izmiran.ru

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) используются в различных отраслях экономической деятельности: автономное сельское хозяйство, мониторинг транспорта, беспилотные перевозки, навигация космических аппаратов, геодезия и многое другое [1]. Научное сообщество использует данные ГНСС для мониторинга состояния окружающей среды, зондирования ионосферы [2] и атмосферы [3], движения тектонических плит [4], стихийных бедствий [5] и т.д.

Поскольку существенное число потребителей ГНСС по-прежнему использует одночастотное оборудование [6], задача надежной оценки ионосферной задержки, а по сути полного электронного содержания (TEC) на луче спутник-приемник, дающей значительный вклад в ошибки позиционирования, остается весьма актуальной. Интерфейсные контрольные документы ГНСС [7, 8, 9] рекомендуют использовать для этого различные

операционные модели – модель Клобучара [10] в системе GPS, NeQuickG [11] в системе Galileo и BDGIM [12] в системе BeiDou. Исследованиям особенностей данных моделей посвящено большое число работ. В большинстве из них используется два критерия оценки точности операционных моделей. Первый основан на ошибках определения координат в одночастотном режиме при использовании сравниваемых моделей, второй на ошибках определения TEC. Так, в одном из наиболее подробных, как по числу рассмотренных моделей, так и по временному интервалу тестирования 2000-2020 гг., исследований [13] на примере 13 станций IGS [14], находившихся в различных регионах, показано, что использование операционных моделей приводит к уменьшению ошибок местоопределения в одночастотном режиме по сравнению с решением, не учитывающим ионосферную задержку, на 15,3% для модели BDGIM, 13,3% для NeQuickG и 13,2% для модели Клобучара. При этом смещение TEC и средние абсолютные ошибки TEC относительно глобальных ионосферных карт IGSG [15] для моделей оказались следующими: BDGIM – -0,7 и 2,9 TECU, NeQuickG – -1,5 и 3,5 TECU, модель Клобучара – 1,2 и 4,9 TECU. Несколько другие результаты, полученные на данных 10 южноамериканских станций за период 2020-2021 гг. в минимуме солнечной активности, приведены в работе [16]. Авторы также делают вывод о превосходстве модели BDGIM в задаче одночастотной навигации, указывая, что максимальное снижение ошибок позиционирования, достигнутое путем коррекции ионосферы, составляет 49% для модели Клобучара, 45% для NeQuickG и 51% для BDGIM. При этом авторы утверждают, что модель NeQuickG имеет тенденцию недооценивать TEC в рассматриваемом регионе, тогда как модели Клобучара и BDGIM имеют тенденцию переоценивать ее. Данный результат для модели BDGIM, таким образом, оказывается противоположным, полученному в [13] на большем интервале тестирования и для всего земного шара в среднем. Подобный разброс результатов в зависимости от региона, уровня солнечной активности, методологии исследований свидетельствует о том, что вопрос эффективности операционных ионосферных моделей нельзя считать вполне закрытым.

Помимо ТЕС, еще одним важным интегральным параметром, описывающим состояние ионосферы, является глобальное электронное содержание (ГЕС) – общее число электронов во всей ионосфере. Данный параметр и методика его определения на основе глобальных распределений ТЕС были предложены в пионерских работах профессора Э.Л. Афраймовича [17]. В настоящее время этот параметр активно используется, как для тестирования, так и для параметризации различных моделей ионосферы [18, 19]. Основой для его определения являются данные глобальных ионосферных карт GIM, представляемых несколькими центрами обработки данных с различной временной задержкой [20]. Вместе с тем ГЕС можно легко оценить и с использованием данных операционных ионосферных моделей. В связи с этим возникает еще одна, менее исследованная, метрика сравнения ионосферных моделей – по ошибке оценивания ГЕС. Это и является предметом исследования настоящей работы.

1. Операционные модели ионосферы

В данной работе проведено исследование особенностей представления ГЕС в трех операционных ионосферных моделях, активно используемых в настоящее время. Система GPS использует модель ионосферы Клобучара для одночастотной коррекции. Эта модель была разработана в 1970-1980-х годах [10] и имеет простую математическую формулировку, что обеспечивает низкие вычислительные затраты. Модель Клобучара двумерная и описывает пространственное распределение вертикального ТЕС, а определение ионосферных задержек на наклонных лучах спутник-приемник осуществляется с помощью картирующей функции. Модель основана на постоянном значении вертикального ТЕС (9.2 TECu) в ночное время и положительной ветви косинусоидальной функции в дневное время, амплитуда и фаза которой в искомой точке в заданный момент времени определяются на основе 8 коэффициентов, передаваемых в навигационном сообщении. Эти коэффициенты определяются на основе наблюдений на базовых станциях и

обновляются по мере необходимости в зависимости от состояния космической погоды. Модель обеспечивает ~ 50%-ную коррекцию ионосферных задержек.

Китайская навигационная система BeiDou использует модель BDGIM для коррекции ионосферной задержки [12]. Также как и модель Клобучара, BDGIM является двумерной моделью, описывающей пространственное распределение вертикального TEC и использующей картирующую функцию для определения ионосферных задержек на наклонных лучах. Пространственное распределение TEC задается в модели с помощью коэффициентов разложения по сферическим гармоникам в геомагнитной системе координат локального времени. При этом 17 коэффициентов разложения являются фиксированными, а 9 коэффициентов меняются в зависимости от состояния космической погоды и передаются в навигационном сообщении BeiDou с частотой обновления 2 ч. Модель BDGIM дает возможность уменьшить связанные с ионосферой ошибки позиционирования на 25-98% в зависимости от уровня солнечной активности [21].

Система Galileo использует в своей работе разработанную Европейским космическим агентством (ESA) модель ионосферы NeQuickG [11], которая, в свою очередь, основана на разработанной Международным центром теоретической физики имени Абдуса Салама (ICTP) в сотрудничестве с Университетом Граца модели NeQuick [22]. Эта модель, в отличие от моделей Клобучара и BDGIM, трехмерная и описывает высотный профиль электронной концентрации в E, F1 и F2 слое ионосферы с помощью 6 полуслоев Эпштейна, параметры которых определяются медианными распределениями foE, foF1, foF2 и M(3000)F2, получаемыми на основе коэффициентов разложения по сферическим гармоникам CCIR для заданного уровня солнечной активности, являющегося входным параметром модели. В отличие от модели NeQuick, использующей одно значение потока солнечного радиоизлучения F10.7 в качестве входного параметра для всего земного шара, модель NeQuickG для более точного описания распределения электронной плотности использует распределение эффективного солнечного потока (A_z) по земному шару,

которое задается в виде функции модифицированной геомагнитной широты точки наблюдения. Коэффициенты этой функции (a_0 , a_1 и a_2) передаются в навигационном сообщении Galileo и определяются с помощью наблюдений на сети базовых станций. NeQuickG отличается высокой производительностью для одночастотной ионосферной коррекции, как для наземных, так и для космических пользователей [23, 24].

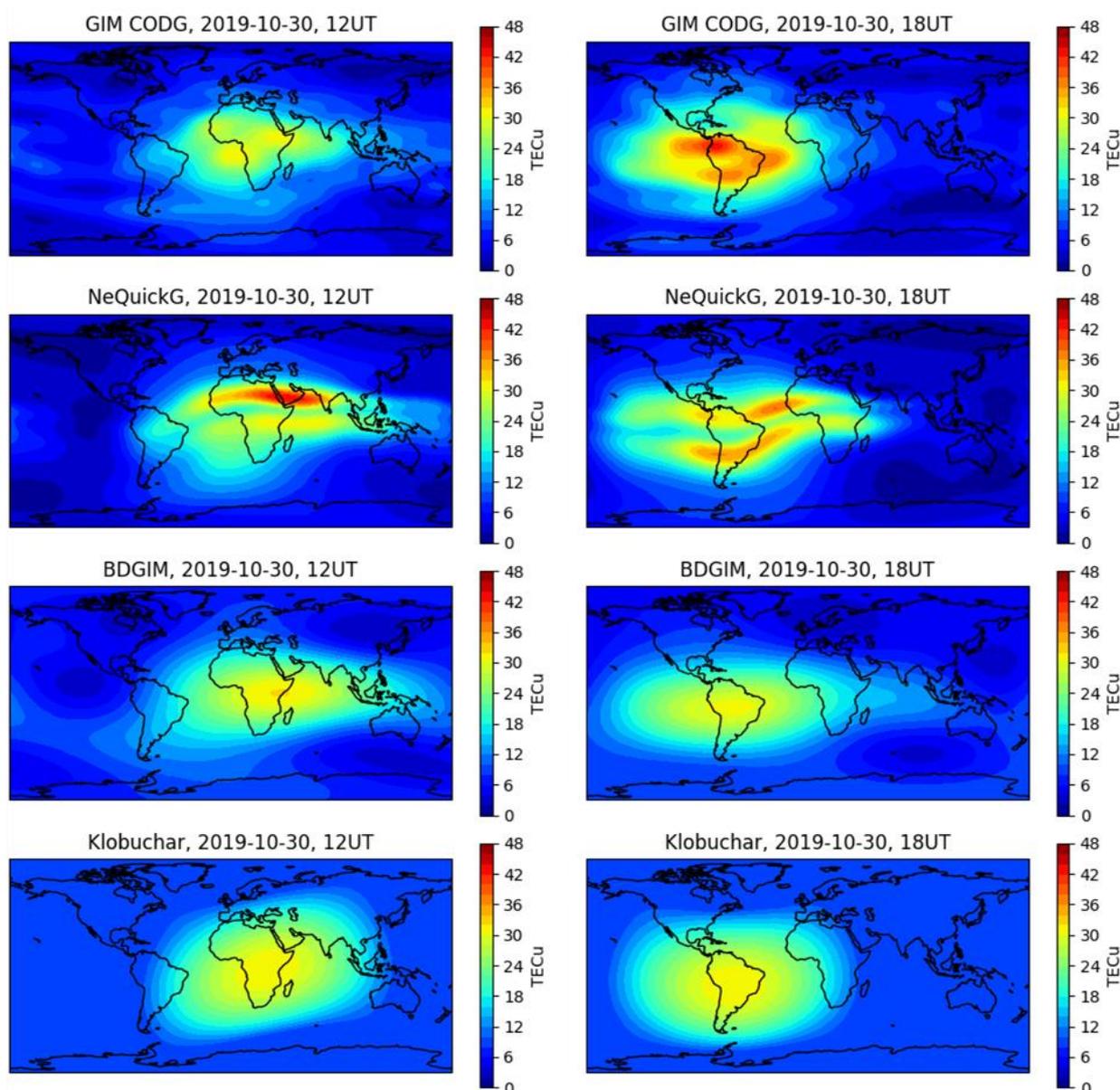


Рис. 1. Пространственные распределения вертикального TEC для 12UT и 18UT 30 октября 2019 г. по данным глобальных ионосферных карт CODG и моделей NeQuickG, BDGIM и Клобучара.

На рисунке 1 приведены примеры пространственных распределений вертикального TEC для 12UT и 18UT 30 октября 2019 г., полученных на основе

описанных выше операционных моделей, в сравнении с глобальными ионосферными картами, предоставляемыми европейским центром определения орбит (CODG) [20], на основе анализа данных порядка 300 базовых станций сети IGS [14]. Хорошо видно, что модели достаточно сильно отличаются, как по абсолютным значениям, так и по особенностям воспроизводимых пространственно-временных распределений TEC. Так, например, модель Клобучара и BDGIM не могут корректно описать два гребня экваториальной аномалии, которая явно воспроизводится в модели NeQuickG. Кроме того, модель Клобучара не может описать морфологические особенности ионосферы высоких широт и ночного полушария, прежде всего главный ионосферный провал. Вместе с тем отличия моделей на уровне GEC могут быть и не столь существенны из-за интегрального характера этого параметра, приводящего к усреднению рассматриваемых распределений TEC по пространству.

2. Глобальное электронное содержание ионосферы

Глобальное электронное содержание (GEC) – параметр введенный в работах Афраймовича [17], описывающий общее число электронов во всей ионосфере. Единицей измерения GEC является $1GECu = 10^{32}$ электронов. Основой для вычисления GEC являются глобальные ионосферные карты GIM TEC [20], обычно имеющие пространственное разрешение $2.5^\circ \times 5^\circ$ по широте и долготе соответственно. Таким образом, для получения оценки GEC необходимо просуммировать значения TEC_{ij} в узлах GIM с весами, соответствующими площадям ячеек карт S_{ij} , учитывая их зависимость от широты [17]:

$$GEC = \sum_{i,j} TEC_{ij} S_{ij} = \sum_{i,j} TEC_{ij} R_E^2 \delta\phi [\sin\theta_j - \sin(\theta_j + \delta\theta)], \quad (1)$$

где R_E – радиус Земли, $\delta\theta$ и $\delta\phi$ – шаг GIM по широте и долготе соответственно, j и i – индексы узлов GIM по широте и долготе соответственно. Отметим, что, как показано в [25], определение GEC согласно (1) может приводить к недооценке значений GEC, за счет неучета высоты тонкого ионосферного слоя h_{pp} , на котором задается GIM, что может быть исправлено заменой R_E на

$R_E+h_{\text{ГРР}}$ в (1). Таким образом исследуемые вариации GEC, которые собственно и представляют интерес, будут отличаться лишь нормировочным множителем. Т.е. для задачи сравнения операционных моделей стоящей в настоящей работе важно лишь, чтобы оценки GEC для них производились одинаково. В рамках данной работы мы использовали (1) без корректировок, как это изначально было предложено Афраймовичем.

3. Источники данных

В работе анализируются данные за период 2012-2020 гг, т.е. практически покрывающий весь 24й цикл солнечной активности, характеристики которой – индекс F10.7 – были получены из обсерватории Пентиктон в Канаде [26]. Для определения реального состояния ионосферы и оценки GEC использовались глобальные ионосферные карты европейского Центра определения орбит CODG [27]. Данные TEC по модели Клобучара, представленные также в виде глобальных ионосферных карт были получены из ГНСС службы Европейского космического агентства [27]. Данные TEC по моделям NeQuickG и BDGIM также в формате глобальных ионосферных карт были получены в Китайской академии наук [28], при этом входные параметры моделей определялись на основе 30 распределенных по земному шару станций с использованием алгоритмов описанных в [29, 30]. На основе модельных распределений TEC и данных GIM CODG в работе проводились оценки GEC согласно (1) и сопоставление качества оценки GEC с использованием операционных моделей, результаты которых приведены в следующем разделе.

4. Полученные результаты

Вариации GEC в 24-м цикле солнечной активности (2012-2020 гг), оцененные по операционным моделям Клобучара, BDGIM и NeQuickG и глобальным ионосферным картам CODG представлены на верхней панели рисунка 2. На нижней панели приведены вариации индекса F10.7. Хорошо видно, что в целом оценки вариаций GEC по операционным моделям неплохо

воспроизводят вариации GEC по данным глобальных ионосферных карт. При этом коэффициенты корреляции для среднесуточных значений F10.7 и GEC по модели NeQuickG и картам CODG оказываются практически одинаковыми и составляют 0.88, а по моделям BDGIM и Клобучара 0.86 и 0.83, соответственно. Можно также отметить, что модель Клобучара дает завышенные оценки GEC по сравнению с другими рассматриваемыми моделями и GIM CODG в минимуме солнечной активности и скорее заниженные оценки GEC в максимуме солнечной активности. Модели NeQuickG и BDGIM при этом лучше справляются с оценками абсолютных значений GEC в течение всего рассматриваемого периода.

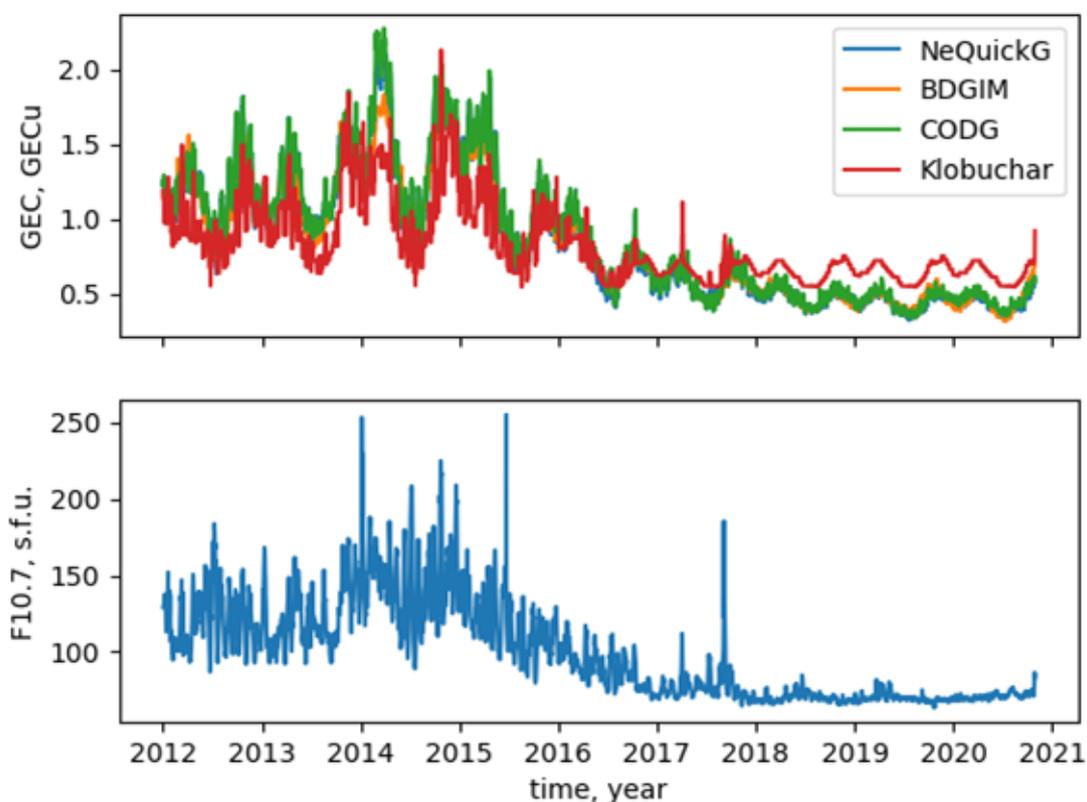


Рис. 2. Вариации GEC по данным моделей Клобучара, NeQuickG и BDGIM, а также глобальных ионосферных карт CODG (верхняя панель) в сравнении с вариациями индекса солнечной активности F10.7 (нижняя панель).

Для более детального анализа рассмотрим статистику отклонений модельных оценок GEC от оценок GEC по данным GIM CODG. Соответствующие распределения плотности вероятности отклонений для максимума (2015 г) и минимума (2020 г) солнечной активности, а также для

всего периода исследований (2012-2020 гг) представлены на рисунке 3. Видно, что для модели BDGIM смещение оценки GEC уменьшается с уменьшением солнечной активности от -0.085GECu в 2015 году до -0.013GECu в 2020 году, при этом СКО также уменьшается с уменьшением солнечной активности от 0.111GECu до 0.05GECu , соответственно. Для модели NeQuickG смещение оценки GEC практически не меняется в зависимости от солнечной активности и составляет -0.025GECu , при этом СКО также уменьшается с уменьшением солнечной активности от 0.049GECu в 2015 году до 0.019GECu в 2020 году. Для всего рассматриваемого периода смещение и СКО оценок GEC для моделей BDGIM и NeQuickG составляет $(-0.041\text{GECu}, 0.092\text{GECu})$ и $(-0.025\text{GECu}, 0.042\text{GECu})$, соответственно.

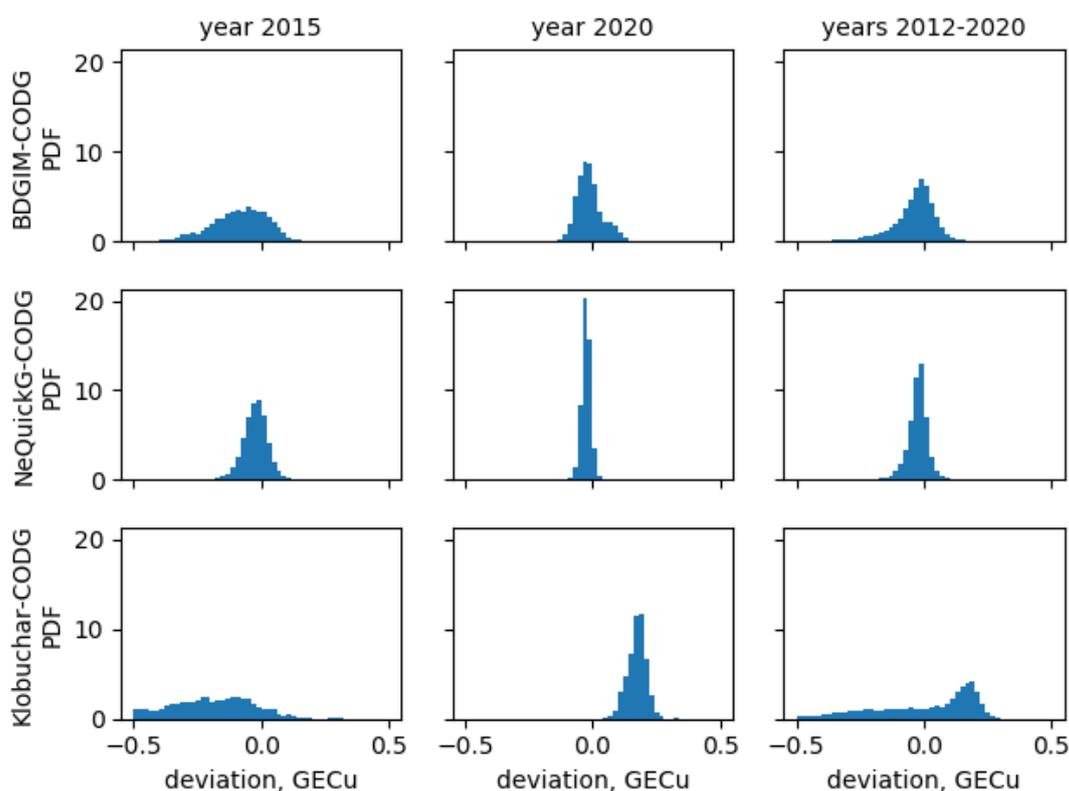


Рис. 3. Функции плотности вероятности отклонений модельных оценок GEC от оценок GEC по данным GIM CODG для максимума (слева) и минимума (по центру) солнечной активности, а также всего интервала 2012-2020 гг (справа).

Данные для модели BDGIM представлены в верхней строке, для модели NeQuickG в средней, для модели Клобучара в нижней.

Здесь интересно отметить, что при сравнении по параметру GEC, модель NeQuickG таким образом показывает себя лучше модели BDGIM, в то время

как согласно результатам [13], при сравнении ТЕС и точности позиционирования в одночастотном режиме выигрывает модель BDGIM. Это может быть связано как с тем, что результаты в [13] получены на ограниченном наборе приемных пунктов, так и с тем, что в настоящей работе, в отличие от [13] использовались не вещаемые в навигационном сообщении параметры модели NeQuickG, а оцененные оптимальным образом согласно [29, 30]. Для модели Клобучара, как было отмечено выше, наблюдается разнонаправленное смещение оценок GEC для максимума и минимума солнечной активности. Для года максимума (2015 г) наблюдается самое большое среди всех рассматриваемых моделей отрицательное смещение оценки GEC -0.243GECu и самое большое СКО 0.204GECu . Для года минимума (2020 г) напротив наблюдается большое положительное смещение оценки GEC 0.172GECu при меньшем СКО 0.036GECu , что приблизительно соответствует СКО BDGIM для этого периода. Это приводит к тому, что на графике плотности вероятности для модели Клобучара за весь исследуемый период, в отличие от двух других рассмотренных моделей, наблюдается существенно негауссово распределение, состоящее из двух разных семейств. Такое поведение оценок GEC по данным модели Клобучара можно объяснить тем, что данная модель использует постоянное значение ТЕС во всем ночном полушарии вне зависимости от уровня солнечной активности. Таким образом, в минимуме, когда ночные значения ТЕС, заложенные в модель, превышают реально наблюдаемые, ночная сторона вносит вклад в переоценку GEC, напротив, в максимуме, когда реально наблюдаемые значения ночного ТЕС могут превосходить модельные, это приводит к недооценке GEC. Очевидным выходом из ситуации могло бы быть введение зависимости ТЕС в ночном полушарии от уровня солнечной активности в модели Клобучара.

Как хорошо видно на рисунке 2, GEC, будучи интегральным параметром, является чувствительным индикатором изменчивости ионосферы в целом в широком диапазоне временных масштабов, связанных как с эффектами космической погоды, так и с процессами, протекающими в нейтральной

атмосфере [17, 25]. В данной работе также рассмотрены основные периодики, которые наблюдаются в спектре GEC, и то, как они воспроизводятся в моделях BDGIM и NeQuickG. Модель Клобучара здесь не рассматривается из-за ее особенностей, описанных выше. На рисунке 4 приведены спектры вариаций GEC, полученных по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении со спектром F10.7 в диапазоне периодов до 500 дней.

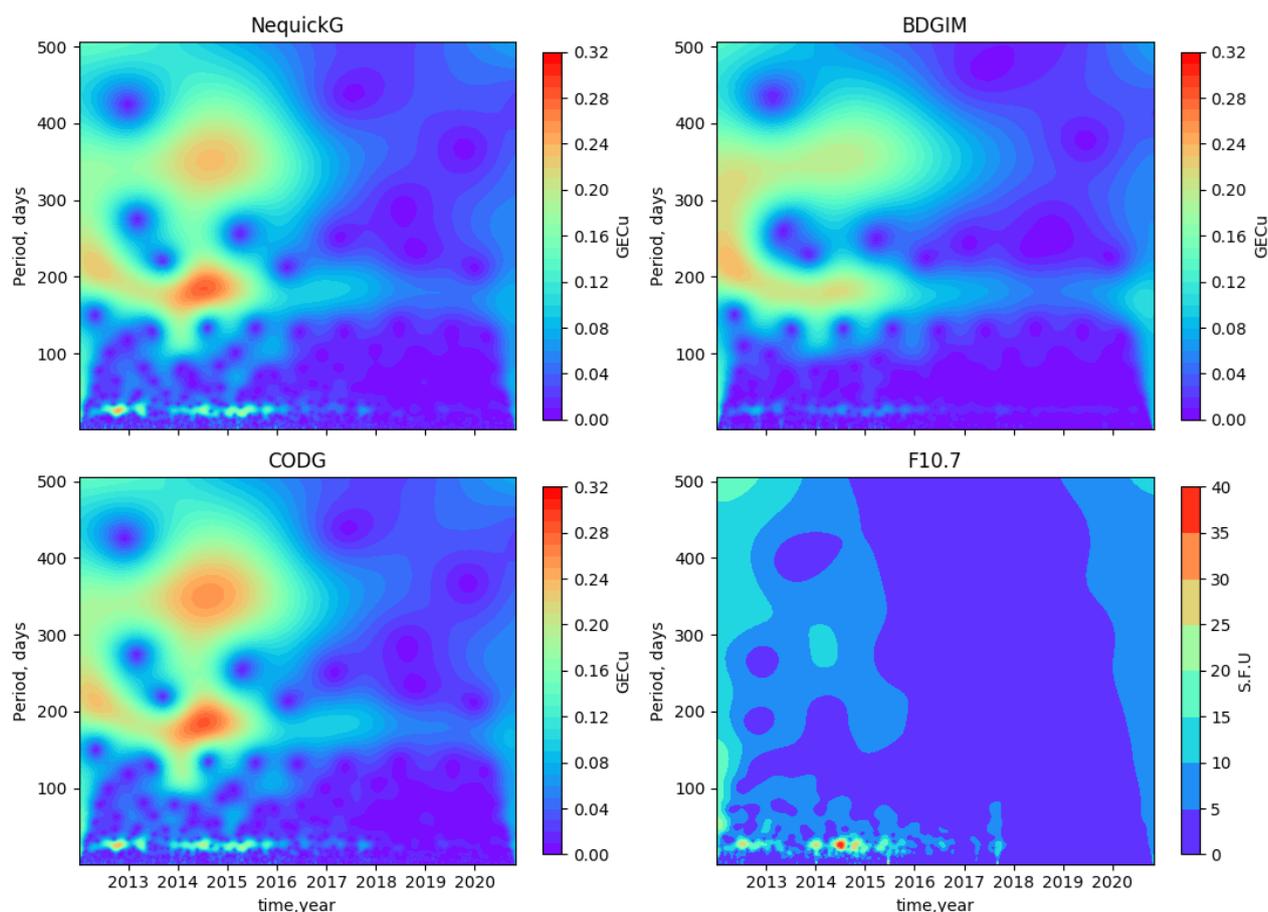


Рис. 4. Вейвлет-спектры вариаций GEC по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG в сравнении с вейвлет-спектром F10.7.

Отметим, что спектры GEC по данным GIM CODG и F10.7 хорошо согласуются с результатами [17], полученными для 23-го цикла солнечной активности. Максимальные значения амплитуд 27-дневной гармоник в вариациях GEC и F10.7 наблюдаются на фазе роста и спада солнечной активности, что соответствует механизму, описанному в [17]. В спектре GEC присутствуют полугодовая и годовая гармоник, особенно ярко проявляющиеся в годы максимума солнечной активности (2014-2015). В тоже

время эти гармоники отсутствуют в спектре солнечной активности, что свидетельствует об их атмосферном происхождении и может быть объяснено особенностями циркуляции верхней атмосферы в рамках механизма термосферной ложки [31].

Если сравнить спектры ГЕС по данным GIM CODG и моделей BDGIM и NeQuickG можно отметить следующие основные моменты. Модель BDGIM недооценивает амплитуды, как 27-дневной гармоники, связанной с солнечной активностью, так и полугодовой и годовой гармоник, связанных с атмосферной циркуляцией, особенно в периоды максимума солнечной активности. Модель NeQuickG при этом адекватно воспроизводит амплитуды этих гармоник. Это можно объяснить тем фактом, что коэффициенты CCIR, на основе которых строятся модели семейства NeQuick, уже содержат в себе сезонную изменчивость ионосферы, в то время как 17 невещаемых коэффициентов модели BDGIM не зависят от сезона. Таким образом, за счет передаваемых в навигационном сообщении коэффициентов, в случае модели NeQuickG происходит адаптация в основном к эффектам солнечной активности, в то время как в модели BDGIM с использованием ограниченного числа вещаемых коэффициентов дополнительно к ним необходимо параметризовать и сезонную ионосферную изменчивость, что, по-видимому, менее эффективно. Возможным решением данной проблемы является замена текущего набора невещаемых коэффициентов модели BDGIM на аналогичные среднемесячные наборы, что позволит достаточно просто учесть сезонную изменчивость ионосферы в модели и осуществлять ее адаптацию к условиям солнечной активности за счет вещаемых коэффициентов.

Важно отметить, что способность операционных ионосферных моделей адаптироваться к текущим гелиогеофизическим условиям на основе наблюдений на достаточно ограниченном наборе приемных пунктов ГНСС, позволяет оценивать ГЕС с точностями, лучшими, чем согласно [17], демонстрируют эмпирические модели IRI и NeQuick. Таким образом, операционные модели, в первую очередь могут быть использованы для

экспресс-оценки GEC, например, для дальнейшей параметризации более сложных моделей

Заключение

В настоящей работе на основе анализа ГНСС данных практически за полный 24-й цикл солнечной активности показаны особенности оценки GEC с использованием операционных ионосферных моделей Клобучара, BDGIM и NeQuickG. Показано, что вне зависимости от фазы солнечной активности модели BDGIM и NeQuickG имеют тенденцию в среднем недооценивать значения GEC по сравнению с данными глобальных ионосферных карт CODG. При этом СКО отклонений для обеих моделей растет с ростом солнечной активности, а СКО для модели NeQuickG меньше, чем для модели BDGIM. Для модели Клобучара наблюдается разнонаправленное поведение оценок GEC с переоценкой по сравнению с CODG в периоды максимума солнечной активности и недооценкой в периоды минимума. Также это модель характерна максимальными значениями СКО оценок GEC. Модель BDGIM имеет особенность недооценивать амплитуды 27-дневных, годовых и полугодовых вариаций GEC по сравнению с моделью NeQuickG и данными CODG, особенно в периоды максимума солнечной активности. Результаты работы показывают, что операционные модели ионосферы, в первую очередь NeQuickG, могут быть использованы для экспресс-оценки GEC по ограниченному набору ГНСС наблюдений, например для дальнейшей параметризации более сложных моделей. Результаты работы также показывают возможные пути усовершенствования модели BDGIM, которые в перспективе могут не только улучшить оценки GEC, но и точности позиционирования в одночастотном режиме с использованием данной модели.

Финансирование: Российский научный фонд проект № 23-17-00157.

Литература

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Springer Science & Business Media, 2007.
2. Afraimovich E.L. et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2013. – Т. 3. – С. A27.
3. Gendt G. et al. Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany // Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II. – 2004. – Т. 82. – №. 1B. – С. 361-370.
4. Larson K.M., Freymueller J.T., Philipson S. Global plate velocities from the Global Positioning System // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. – 1997. – Т. 102. – №. B5. – С. 9961-9981.
5. Vergados P., Komjathy A., Meng X. GNSS observation for detection, monitoring, and forecasting natural and man-made hazardous events // Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications. – 2020. – Т. 1. – С. 939-969.
6. EUSPA EO and GNSS market report // Publications Office of the European Union. – 2022. – №. 1.
7. NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces; IS-GPS-200-N; Interface Specification Document; GPS.gov: USA, 2022. Available online: <https://www.gps.gov/technical/icwg/>
8. BeiDou Navigation Satellite System Signal In Space Interface Control Document Open Service Signal B1C, China, 2017. Available online: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201806/P020180608519640359959.pdf>
9. Galileo open service signal-in-space interface control document, EU, 2023. Available online: <https://www.gsc-europa.eu/>

10. Klobuchar J. A. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. – 1987. – №. 3. – С. 325-331.
11. European GNSS (Galileo) Open Service–Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users; European Commission. 2016. Available online: <https://www.gsc-europa.eu/>
12. Yuan Y. et al. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results // Navigation. – 2019. – Т. 66. – №. 1. – С. 55-69.
13. Yasyukevich Y.V. 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. – Т. 23. – №. 10. – С. 4773.
14. Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems // Journal of geodesy. – 2009. – Т. 83. – С. 191-198.
15. Hernández-Pajares M. et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // Journal of Geodesy. – 2009. – Т. 83. – С. 263-275.
16. Setti Jr P.T., da Silva C.M., Alves D.B.M. Assessing GNSS ionospheric models at low latitudes: BDGIM, NeQuick-G, and Klobuchar // GPS Solutions. – 2025. – Т. 29. – №. 1. – С. 15.
17. Afraimovich E.L. et al. Global electron content: a new conception to track solar activity // Annales Geophysicae. – Göttingen, Germany: Copernicus Publications, 2008. – Т. 26. – №. 2. – С. 335-344.
18. Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Two-phase storm profile of global electron content in the ionosphere and plasmasphere of the Earth // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2012. – Т. 117. – №. A9.

19. Sezen U., Gulyaeva T.L., Arikan F. Performance of solar proxy options of IRI-Plas model for equinox seasons // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – Т. 123. – №. 2. – С. 1441-1456.
20. Roma-Dollase D. et al. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle // Journal of Geodesy. – 2018. – Т. 92. – С. 691-706.
21. Wang N. et al. BeiDou Global Ionospheric delay correction Model (BDGIM): performance analysis during different levels of solar conditions // GPS solutions. – 2021. – Т. 25. – №. 3. – С. 97.
22. Nava B., Coisson P., Radicella S. M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics. – 2008. – Т. 70. – №. 15. – С. 1856-1862.
23. Prieto-Cerdeira R. et al. Performance of the Galileo single-frequency ionospheric correction during in-orbit validation // GPS world. – 2014. – Т. 25. – №. 6. – С. 53-58.
24. Montenbruck O., González Rodríguez B. NeQuick-G performance assessment for space applications // GPS solutions. – 2020. – Т. 24. – №. 1. – С. 13.
25. Yasyukevich Y. et al. Ionospheric Global and Regional Electron Contents in Solar Cycles 23–25 // Symmetry. – 2023. – Т. 15. – №. 10. – С. 1940.
26. Space Weather Canada. <https://www.spaceweather.gc.ca/solarflux/sx-en.php>
27. ESA GNSS Science Support Centre. <ftp.gssc.esa.int/gnss/products/ionex/>
(открывается через программы доступа к ftp серверам)
28. CAS Ionospheric Service <ftp.gipp.org.cn/product/> (открывается через программы доступа к ftp серверам)
29. Wang N. et al. An examination of the Galileo NeQuick model: comparison with GPS and JASON TEC // GPS solutions. – 2017. – Т. 21. – С. 605-615.
30. Wang N. et al. Refinement of global ionospheric coefficients for GNSS applications: Methodology and results // Advances in space research. – 2019. – Т. 63. – №. 1. – С. 343-358.

31. Jones Jr M. et al. Origins of the thermosphere-ionosphere semiannual oscillation: Reformulating the “thermospheric spoon” mechanism // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2018. – Т. 123. – №. 1. – С. 931-954.

Для цитирования:

Чэнь Ч., Падохин А.М., Иванов А.К., Павлов И.А. Особенности представления ГЕС в операционных ионосферных моделях Клобучара, BDGIM и NeQuickG. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.1.4>