

УДК 550.388.2

АЭРОНОМИЧЕСКАЯ И ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ GTEC ДЛЯ ВОЗМУЩЕННЫХ УСЛОВИЙ

© 2023 г. В. Н. Шубин¹*, Т. Л. Гуляева¹, М. Г. Деминов¹¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троцк, Россия

*e-mail: shubin@izmiran.ru

Поступила в редакцию 30.08.2022 г.

После доработки 20.09.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.

Предложена аэрономическая и динамическая коррекция медианной глобальной модели полного электронного содержания GTEC для возмущенных условий ($A_p \geq 15$ нТл). Глобальная медианная модель GTEC построена для спокойных условий ($A_p < 15$ нТл) в зависимости от географических координат, мирового времени UT, дня года и уровня солнечной активности — потока солнечного радиоизлучения F10.7. Модель основана на сферическом гармоническом анализе глобальных ионосферных карт GIM-TEC (1996–2019 гг.), предоставленных лабораторией JPL (Jet Propulsion Laboratory, NASA). Предлагаемая глобальная динамическая модель GDMTEC (Global Dynamic Model of TEC) состоит из медианной модели GTEC и ряда динамических и аэрономических поправок к ней, связанных с образованием главного ионосферного провала, аврорального максимума ионизации, а также с изменениями температуры и состава термосферы. Преимущество предлагаемой коррекции медианной модели по сравнению с ассимиляцией текущих наблюдательных данных заключается в независимости прогноза от наличия этих данных в реальном времени. Апробация модели для возмущенных условий показывает улучшение результатов прогноза по сравнению со справочной ионосферной моделью IRI-Plas.

DOI: 10.31857/S0016794022600491, EDN: ADCXDC

1. ВВЕДЕНИЕ

Все параметры ионосферы испытывают флуктуации относительно некоторого фона, за который обычно принимают спокойную медиану. Знание свойств ионосферы для спокойных условий важно при выделении и анализе возмущений любой природы, поскольку параметры ионосферы для спокойных условий служат фоном, относительно которого определяются эти возмущения. Флуктуации ионосферной плазмы обусловлены как постоянно существующими факторами (например, приливы, планетарные волны и внутренние гравитационные волны в атмосфере), так и эффектами, связанными с магнитосферными суббурями и бурями [Деминов, 2015]. Значительные по амплитуде флуктуации параметров ионосферы называют ионосферными возмущениями.

Основными механизмами ионосферных возмущений являются изменения состава нейтральной атмосферы, термосферные ветры и электродинамические процессы. Оценка и прогноз этих явлений в реальном времени все еще нуждаются в улучшении из-за ограниченности средств мониторинга и точных методов прогноза. Поэтому наиболее надежными средствами для их описа-

ния являются модели нейтральной атмосферы и ионосферы. Они находят широкое применение в космических навигационных и радиолокационных системах, которые требуют ионосферной коррекции для учета задержки сигнала или ошибок дальности. Широко известны 3-мерные эмпирические модели ионосферы, позволяющие выполнять долгосрочные (на месяцы и годы) прогнозы ключевых ионосферных параметров [Bilitza et al., 2017; Gulyaeva and Bilitza, 2012 и ссылки там]. Для более детальных краткосрочных ионосферных прогнозов (на часы и дни) применяются адаптивные модели, использующие ассимиляцию наблюдательных данных в реальном времени [Кринберг и др., 1986; Gulyaeva et al., 2013; Galkin et al., 2022]. В литературе представлены краткосрочные прогнозы карт полного электронного содержания GIM-TEC с применением нейронных сетей [Cesaroni et al., 2020; Liu et al., 2020]. Статистические методы успешно применяются для прогноза глобальных карт GIM-TEC с заблаговременностью от 1 до 10 дней [Lean, 2019; Iuore and Lu, 2022]. Однако для применения этих методов на практике требуется специальное вы-

числительное обеспечение, что не всегда возможно для заинтересованных пользователей.

Альтернативная возможность — адаптация медианной модели ионосферы по аэрономическим и динамическим параметрам, связанным с движением высокоширотных структур, выраженным аналитически, как это было принято в динамической модели критической частоты слоя F_2 [Шубин и Деминов, 2019]. Преимущество такой коррекции медианной модели по сравнению с ассимиляцией текущих наблюдательных данных заключается в независимости от наличия этих данных в реальном времени.

Ошибки распространения радиосигнала в ионосфере пропорциональны общему содержанию электронов в ионосфере ТЕС на пути радиолуча. Поэтому удобная для пользователя модель ТЕС, охватывающая глобальный масштаб и все уровни солнечной и геомагнитной активности, может быть полезной в различных приложениях. В данной работе предложена аэрономическая и динамическая коррекция глобальной медианной модели полного электронного содержания GTEC (Shubin and Gulyaeva, 2022), подобно динамической модели критической частоты foF_2 [Шубин и Деминов, 2019]. В разделе 2 представлены подробности аэрономической и динамической коррекции медианной модели GTEC. В разделе 3 приведены примеры применения адаптированной модели GDMTEC. В разделе 4 дано обсуждение результатов и в разделе 5 приведены выводы.

2. АДАПТАЦИЯ МЕДИАННОЙ МОДЕЛИ GTEC К ВОЗМУЩЕННЫМ УСЛОВИЯМ

Для построения адаптированной модели GDMTEC нами применен аэрономический подход к описанию ионосферной бури. Он основан на учете физических процессов, происходящих в термосфере. Впервые попытка использовать этот подход для моделирования foF_2 была предпринята в работе [Шубин и Аннакулиев, 1995]. В даль-

нейшем с появлением более совершенных термосферных моделей типа NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] и более надежных лабораторных измерений констант скоростей основных ионно-молекулярных реакций [Hierl et al., 1997] данный подход получил свое развитие [Шубин и Аннакулиев, 1997; Аннакулиев и др., 2005]. Результаты его применения для прогноза foF_2 изложены в работе [Шубин и Деминов, 2019]. Использование эмпирической модели термосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002] в качестве составной части полуэмпирической модели бури в ионосфере позволяет отразить важное свойство ионосферы, а именно, зависимость $TEC(t)$ от предыстории изменения геомагнитной активности через соответствующую зависимость параметров термосферы.

В медианной модели GTEC [Shubin and Gulyaeva, 2022] для того, чтобы отразить предысторию изменения $TEC(t)$ мы ввели новый индекс солнечной активности в виде соотношения:

$$FF = (2F10.7(\tau) + F10.7)/3, \quad (1)$$

где интегральный индекс $F10.7(\tau = 0.96)$ представляет собой ряд суточных значений $F10.7$ с экспоненциальным сглаживанием, предшествующих заданному дню [Шубин и Деминов, 2019]. Индекс $F10.7$ — это поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см в заданный день. Индексы $F10.7$ измеряются в единицах 10^{-22} Вт/(Гц м²). Из $\tau = \exp(-3/T)$ следует, что характерное время T индекса FF составляет около 27 дней, что соответствует одному обороту Солнца.

Модель GTEC для геомагнитно-спокойных условий с $Ap < 15$ нТл, где Ap — суточный индекс геомагнитной активности, была построена на географической сетке с ячейками 5° по долготе и 2° по широте. Зависимость GTEC от географических координат в фиксированный момент мирового времени UT для двух уровней солнечной активности — низкой L ($F10.7 \leq 80$) и высокой H ($F10.7 \geq 120$) представляется в виде:

$$\begin{cases} GTEC(\varphi, \lambda, FF, UT) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=m}^N P_n^m(\cos(\vartheta)) \left[g_n^m(UT)_L \cos(m\lambda) + h_n^m(UT)_L \sin(m\lambda) \right] \\ GTEC(\varphi, \lambda, FF, UT) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=m}^N P_n^m(\cos(\vartheta)) \left[g_n^m(UT)_H \cos(m\lambda) + h_n^m(UT)_H \sin(m\lambda) \right], \end{cases} \quad (2)$$

где $\vartheta = 90^\circ - \varphi$; φ — широта; λ — долгота; g_n^m и h_n^m — коэффициенты разложения, а $P_n^m(\cos \vartheta)$ — присоединенные функции Лежандра. Для интерполяции по времени было использовано разложение Фурье с периодом $T = 24$ ч. Для пространственного разложения было использовано $N = 15$ по ши-

роте и $M = 10$ по долготе сферических гармоник. Количество коэффициентов в разложениях (2) определяется соотношением: $J = M(2N - M + 1) + N + 1$. Таким образом, для каждого уровня солнечной активности, месяца и часа UT было получено $J = 226$ коэффициентов. Модель основана на анализе сферических гармоник глобальных карт

полного электронного содержания ионосферы GIM-TEC, построенных в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института, Пасадена, США (https://side-show.jpl.nasa.gov/pub/iono_daily/).

Метод построения адаптированной модели GDMTEC аналогичен построению модели GDMF2 [Шубин и Деминов, 2019]. В ней модель отрицательной фазы ионосферной бури для критической частоты f_oF2 выражена в зависимости от спокойного фонового уровня с помощью коэффициента коррекции C_{storm} . Соответствующее соотношение для отрицательной фазы ионосферной бури полного электронного содержания имеет вид:

$$\text{TEC}(t) = C_{\text{storm}} \text{GTEC}, \quad (3)$$

где $C_{\text{storm}} = R(t)/R_q(t)$, с функциями из (4) представляет собой отношение параметров термосферы на высоте 300 км для геомагнитно-возмущенных $R(t)$ и спокойных $R_q(t)$ условий, а GTEC — глобальная медианная модель (2) [Shubin and Gulyaeva, 2022]:

$$R(t) = \left(\frac{n(\text{O})}{\beta^\mu} \right)^{1.30}, \quad \beta = k_1 n(\text{N}_2) + k_2 n(\text{O}_2), \quad (4)$$

$$\mu = \frac{m(\text{O})(x+1)}{[m(\text{N}_2)x + m(\text{O}_2)]}.$$

Здесь $n(\text{O})$, $n(\text{N}_2)$ и $n(\text{O}_2)$ — концентрации нейтральных составляющих верхней атмосферы; $m(\text{O})$, $m(\text{N}_2)$ и $m(\text{O}_2)$ — молекулярные веса нейтральных составляющих; β — коэффициент линейной рекомбинации ионов O^+ ; k_1 и k_2 — коэффициенты ионно-молекулярных реакций $\text{O}^+ + \text{N}_2$ и O_2 [Hierl et al., 1997]. Так как $\text{TEC}(t) \sim (f_oF2)^2(t)$, показатель степени в выражении для $R(t)$ уравнения (4) равен 1.30, в отличие от показателя 0.65, полученного для f_oF2 [Аннакулиев и др., 2005].

Для определения $R(t)$ используется эмпирическая модель NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], которая является глобальной моделью термосферы, применимой при любом уровне солнечной и геомагнитной активности. В ней косвенно учтено, что основной причиной изменений параметров термосферы в периоды геомагнитных бурь является Джоулев нагрев термосферы высоких широт.

В субавроральной и авроральной ионосфере мы вводим динамические поправки к медианному распределению GTEC. Тогда адаптированная модель GTEC будет иметь следующий вид:

$$\text{GDMTEC} = C_{\text{MIT}} \left[(C_{\text{storm}} \text{GTEC})^2 + C_{\text{AVR}} \exp\left(-[(\Phi - \Phi_{\text{AVR}})/\Delta\Phi_1]^2\right) \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Поправка к GTEC в области главного ионосферного провала (ГИП) обозначена C_{MIT} , а в авроральном овале — C_{AVR} . Поправка C_{AVR} вычисляется по известным исправленным геомагнитным широтам аврорального пика — Φ_{AVR} и минимума ГИП — Φ_{MIT} . Модели положений минимума провала Φ_{MIT} , аврорального максимума Φ_{AVR} , а также аэрономические поправки C_{MIT} и C_{AVR} в уравнении (5) представлены в виде аналитических зависимостей от местного геомагнитного времени, геомагнитной активности и географической долготы. Выражения для $\Delta\Phi_1$ имеют вид:

$$\Delta\Phi_1 = 1.0(\Phi_{\text{AVR}} - \Phi_{\text{MIT}})/2, \text{ если } \Phi \leq \Phi_{\text{AVR}},$$

$$\Delta\Phi_1 = 1.5(\Phi_{\text{AVR}} - \Phi_{\text{MIT}})/2, \text{ если } \Phi > \Phi_{\text{AVR}}$$

(более подробно см. в статьях [Деминов и Шубин, 2018 и Шубин и Деминов, 2019]). Инвариантные геомагнитные широты в уравнениях аэрономических поправок находятся из модели IGRF-13 [Alken et al., 2021]. В качестве индикатора геомагнитной активности нами был введен средневзвешенный по времени индекс $K^*(t, \tau) = 2.1 \ln(0.2a_p(t, \tau) + 1.0)$, где коэффициент $\tau = 0.6$ определен из условия минимума отклонения моделей от экспериментальных данных, a_p — 3-часовой индекс геомагнитной активности. Из $\tau = \exp(-3/T)$ следует, что характерное время T для индекса $K^*(t, \tau)$ составляет около 6 ч.

Величина C_{storm} также зависит от геомагнитной активности, но с характерным временем $T \sim 11$ ч, что следует из модели NRLMSISE-00 в уравнениях (3, 4). Таким образом, косвенно учитывается, что реакция аврорального пика ионизации на изменение геомагнитной активности происходит с двумя характерными временами. Вначале изменяется положение и величина этого пика, связанная с изменениями потока высыпавшихся авроральных электронов и области локализации этих высыпаний, затем происходит дополнительное изменение величины аврорального пика ионизации, связанное с изменениями температуры и состава термосферы [Деминов и Шубин, 2019; Деминов и др., 2021]. Поправки C_{AVR} и C_{MIT} существенны только в области аврорального максимума ионизации и ГИП, соответственно они применяются в этих областях наряду с корректирующим выражением $C_{\text{storm}} \text{GTEC}$ в уравнении (5). Вне этих областей $C_{\text{AVR}} \exp\left(-[(\Phi - \Phi_{\text{AVR}})/\Delta\Phi_1]^2\right) \ll 1$ и $C_{\text{MIT}} = 1$, поэтому $\text{TEC}(t) = C_{\text{storm}} \text{GTEC}$ (уравнение 3) на широтах, расположенных к экватору от ГИП [Деминов и Шубин, 2018].

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ GDMTEC

Рассмотрим несколько примеров применения адаптированной модели GDMTEC в периоды геомагнитных возмущений. Для качественной и количественной оценки корректности GDMTEC нами были выбраны три геомагнитные бури в разные сезоны 2021 г.: 19.02–24.02.2021 г. ($Kp = 4.3$ и $Dst = -32$ нТл), 27.08–01.09.2021 г. ($Kp = 5.0$ и $Dst = -82$ нТл) и 17.10–22.10.2021 г. ($Kp = 4.0$ и $Dst = -55$ нТл), где в скобках приведены максимальное значение Kp -индекса и минимальное значение Dst для каждой бури при низкой солнечной активности $F10.7$ от 71.3 до 86.0. Из этих данных следует, что анализируемые бури можно отнести к слабым и умеренным геомагнитным бурям.

Более детально параметры геомагнитной активности и ионосферы для геомагнитной бури 19.02–24.02.2021 г. представлены на рис. 1–3. На верхней панели рис. 1 представлены изменения геомагнитных индексов Kp и Dst с местным временем. На нижней панели точками показаны суточные вариации VTEC (вертикального полного содержания электронов) на трех станциях глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Нами были выбраны станции в разных долготных и широтных зонах. Станция Обнинск располагается на средних широтах. Станция Норильск относится к высокоширотной зоне и, как будет показано ниже во время выбранных для тестирования ионосферных бурь она находилась в авроральном овале. Станция Магадан лежит в субавроральной зоне вблизи минимума ГИП. Разработанная нами модель GDMTEC представлена сплошными кривыми, модель IRI-Plas [Gulyaeva and Bilitza, 2012], используемая без адаптации к текущим измерениям TEC, отмечена штриховыми линиями. Международная справочная модель ионосферы IRI, расширенная до плазмосферы – IRI-Plas, является одной из наиболее известных эмпирических моделей ионосферы и плазмосферы. Интегрирование электронной плотности в модели IRI-Plas производится от 60 км до 20200 км, которая примерно соответствует высоте орбиты ГНСС. Следует отметить, что при вычислениях VTEC в медианной модели IRI-Plas нами были использованы коэффициенты “URSI” с опцией “STORM”. На осях абсцисс отложено местное время LT, на осях ординат величины VTEC в единицах $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/см}^2$. На рис. 1 вертикальными линиями выделены местные времена, для которых на рис. 2 для фиксированного времени 14 UT показаны широтные изменения VTEC на долготах, соответствующих трем выбранным наземным станциям ГНСС. На рис. 2 сплошные линии соответствуют модели GDMTEC, штриховые линии – модели IRI-Plas, точки – значения VTEC, полученные из GIM-TEC, крестики – зна-

чения VTEC на соответствующих станциях ГНСС. Значения VTEC на этом и последующих рисунках приведены с точностью $\pm 1^\circ$ по долготе и $\pm 0.3\text{h}$ по UT. Отметим, что использованные для тестирования модели GDMTEC данные VTEC из GIM за 2021 г. не входили в построенную нами ранее медианную модель GTEC [Shubin and Gulyaeva, 2022]. Для наглядности на рис. 3 показаны положения анализируемых станций относительно границ аврорального овала ионизации и минимума ГИП в географических координатах в то же самое фиксированное мировое время, что на рис. 2. Эти границы являются элементами модели GDMTEC. Сплошной кривой обозначено положение минимума ГИП, штриховой кривой – положение экваториальной границы, точками – положение полярной границы аврорального овала, штрихпунктирной кривой – положение максимума ионизации в авроральном овале. Крестиками обозначены положения станций ГНСС, символом $\oplus$ обозначен Северный геомагнитный полюс. Видно, что согласно модели GDMTEC ст. Норильск в 14 UT оказывается в авроральной области, точнее, вблизи экваториальной границы этой области. Станция Магадан расположена в субавроральной области, ст. Обнинск – на средних широтах.

Аналогичные параметры геомагнитной активности, ионосферы, а также модели GDMTEC и IRI-Plas для бури 27.08–01.09.2021 г. представлены на рис. 4–6, а для бури 17.10–22.10.2021 г. – на рис. 7–9. Из данных на рис. 6 и 9 можно видеть, что ст. Норильск находилась почти в центре авроральной области, ст. Магадан – в области минимума ГИП для фиксированных моментов мирового времени в эти геомагнитные бури.

Для оценки эффективности модели GDMTEC были проведены ее сопоставления с величинами VTEC, полученными с помощью наземных приемников ГНСС и из GIM-TEC, а также с моделью IRI-Plas. В качестве количественных оценок результатов сопоставления моделей с наблюдавшимися величинами VTEC используются среднеквадратическая ошибка RMSE (TECU) и среднее относительное отклонение MRD (%) модельных значений $VTEC_{\text{mod}}$ от наблюдаемых данных $VTEC_{\text{obs}}$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (VTEC_{\text{mod}}^i - VTEC_{\text{obs}}^i)^2},$$

$$MRD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{VTEC_{\text{mod}}^i - VTEC_{\text{obs}}^i}{VTEC_{\text{obs}}^i} \right| \times 100\%,$$

где N – число часовых значений VTEC наземных приемников ГНСС и GIM-TEC, которые были использованы для оценок в каждой геомагнитной буре. Результаты представлены в табл. 1 и 2.

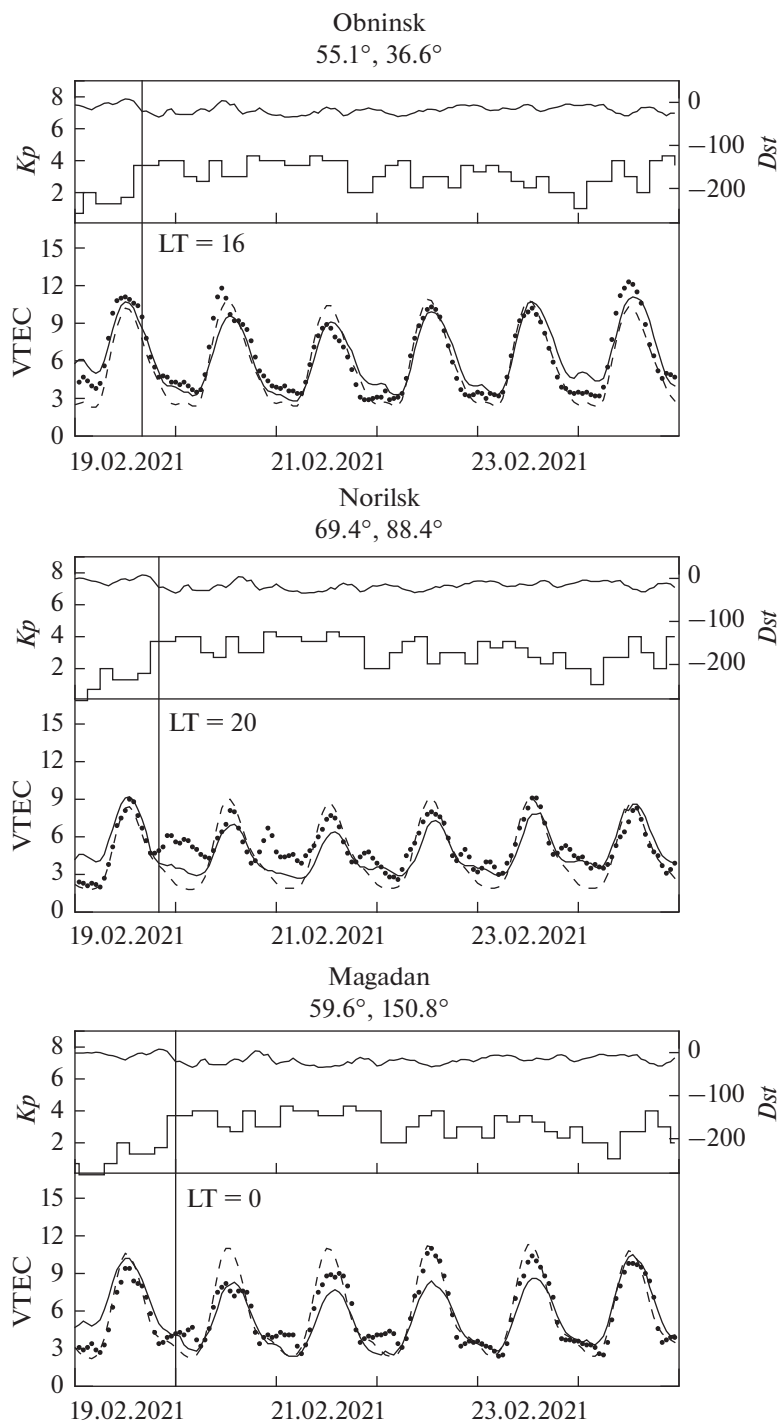


Рис. 1. Буря 19.02–24.02.2021 г. На верхних панелях приведены изменения геомагнитных индексов Kp и Dst . На нижних панелях — суточные вариации VTEC на станциях ГНСС, которые обозначены точками, сплошными линиями — модель GDMTEC, штриховыми линиями — модель IRI-Plas. По оси абсцисс отложено локальное время LT.

В таблице 1 приведены результаты расчета по модели IRI-Plas с двумя разными файлами IG_RZ.dat (с прогнозом до 11.2023 г.), созданными 09.2021 г. (IRI-Plas 1) и 02.2022 г. (IRI-Plas 2). Как видно из этой таблицы, ошибки с IG_RZ.dat от 09.2021 г. (IRI-Plas 1) существенно больше

ошибок с IG_RZ.dat от 02.2022 г. (IRI-Plas 2). Файл IG_RZ.dat со скользящими средними за 12 месяцев индексами IG12 и R12 используется в моделях IRI-Plas [Gulyaeva and Bilitza, 2012] и IRI-2016 [Bilitza et al., 2017]. Наибольшие ошибки в моделях IRI-Plas 1 и IRI-Plas 2 достигаются для

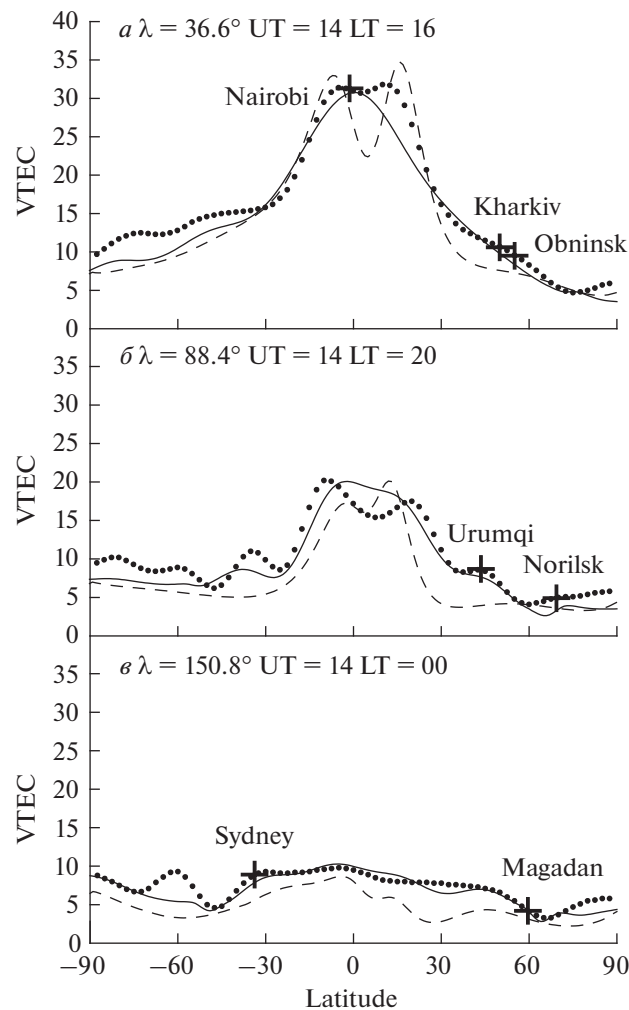


Рис. 2. Буря 19.02–24.02.2021 г. Широтные изменения модели GDMTEC в географической системе координат обозначены сплошными линиями, модели IRI-Plas на долготах станций ГНСС – штриховыми линиями. Крестиками обозначены значения VTEC на соответствующих станциях ГНСС, точками обозначены VTEC полученные из карт GIM-TEC.

Таблица 1. Среднеквадратичные RMSE (в TECU) и средние MRD (в %) отклонения данных VTEC по моделям GDMTEC, IRI-Plas 1, IRI-Plas 2 от наблюдаемых VTEC на станциях ГНСС (рис. 1, 4, 7). Количество значений $N = 144$

События	Станции ГНСС	GDMTEC		IRI-Plas 1		IRI-Plas 2	
		RMSE (TECU)	MRD (%)	RMSE (TECU)	MRD (%)	RMSE (TECU)	MRD (%)
19.02–24.02 2021	Обнинск	1.05	15.73	1.10	16.96	1.10	16.95
	Норильск	1.20	21.33	1.42	22.82	1.43	22.80
	Магадан	1.16	19.27	1.11	16.44	1.10	16.33
27.08–31.08 2021	Обнинск	1.39	12.39	1.32	12.92	1.90	17.97
	Норильск	1.40	15.14	1.41	11.78	2.02	18.38
	Магадан	1.03	11.27	1.54	15.91	1.15	11.97
17.10–22.10 2021	Обнинск	2.42	22.23	4.71	35.25	2.59	22.75
	Норильск	1.61	26.41	3.28	39.31	1.86	21.47
	Магадан	2.16	36.12	5.18	70.66	3.22	42.02

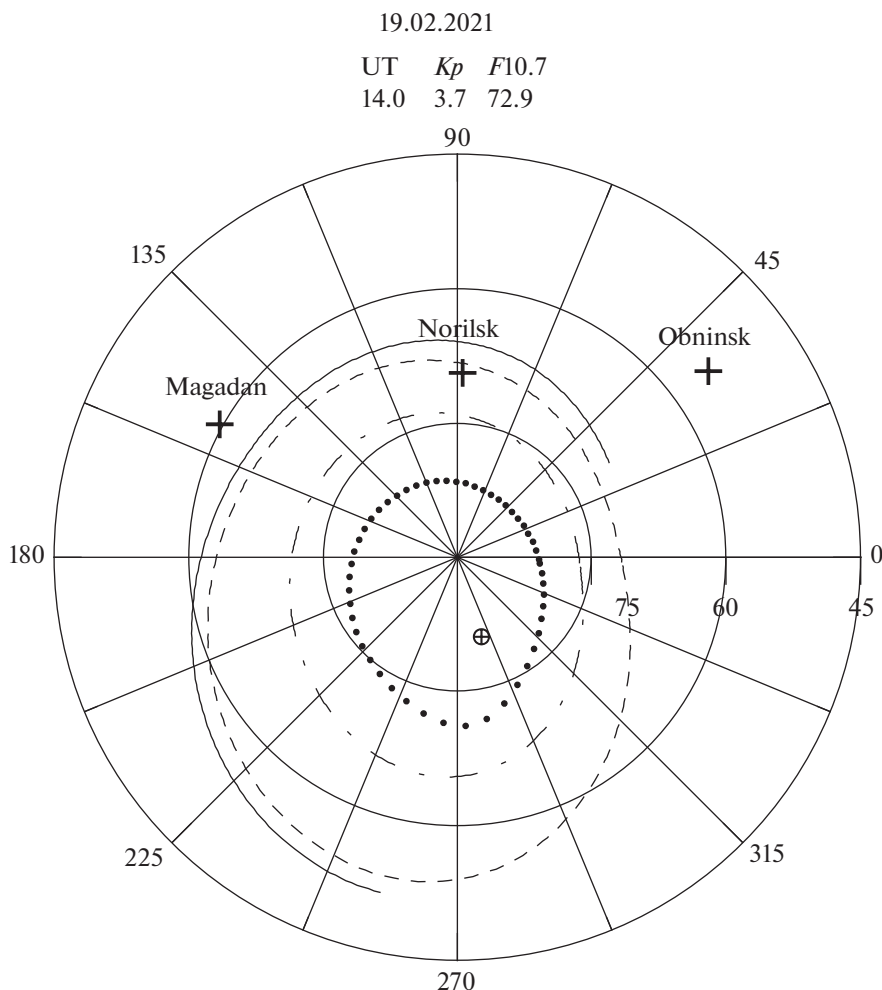


Рис. 3. Буря 19.02–24.02.2021 г. Расположения границ аврорального овала ионизации и минимума ГИП в Северном полушарии в географических координатах. Сплошной кривой обозначено положения минимума ГИП, штриховой кривой – положение экваториальной границы аврорального овала, точками – положение полярной границы аврорального овала, штрихпунктирной кривой – положение максимума ионизации в авроральном овале. Крестиками обозначены положения станций ГНСС, символом $\oplus$ обозначен Северный магнитный полюс.

геомагнитной бури 17.10–22.10.2021 г., так как для этого периода индексы IG12 и R12 являются прогнозными. Результаты количественной оценки, как видно из табл. 1, свидетельствуют о том, что производительность модели GDMTEC, за исключением событий выделенных жирным шрифтом, лучше модели IRI-Plas для всех сезонов.

Количественная оценка точности широтного поведения моделей GDMTEC и IRI-Plas приведена в табл. 2.

В качестве примера на рис. 10 приведено глобальное распределения VTEC для 00 UT 20.02.2021 г., рассчитанное по GDMTEC. Пример показан для возмущенных условий ($a_p = 15$ нТл, $K_p = 3.0$). Белыми линиями показано асимметричное положение главного ионосферного провала в Северном и Южном полушариях.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее в работе [Шубин и Деминов, 2019] было показано применение аэрономической и динамической коррекции $foF2$ во время геомагнитных бурь на средних и высоких широтах. В данном исследовании такая коррекция была осуществлена к VTEC. Применение адаптированной модели GDMTEC продемонстрировано на трех геомагнитных бурях в условиях низкой солнечной активности, в разные сезоны. Валидация модели GDMTEC была проведена на 3 наземных станциях ГНСС в разных долготных и широтных зонах: среднеширотной ст. Обнинск (55.1° N, 36.6° E), авроральной ст. Норильск (69.4° N, 88.4° E) и субавроральной ст. Магадан (59.6° N, 150.8° E).

Выше отмечалось, что для входных геофизических индексов IG12 и R12 в моделях IRI-Plas и

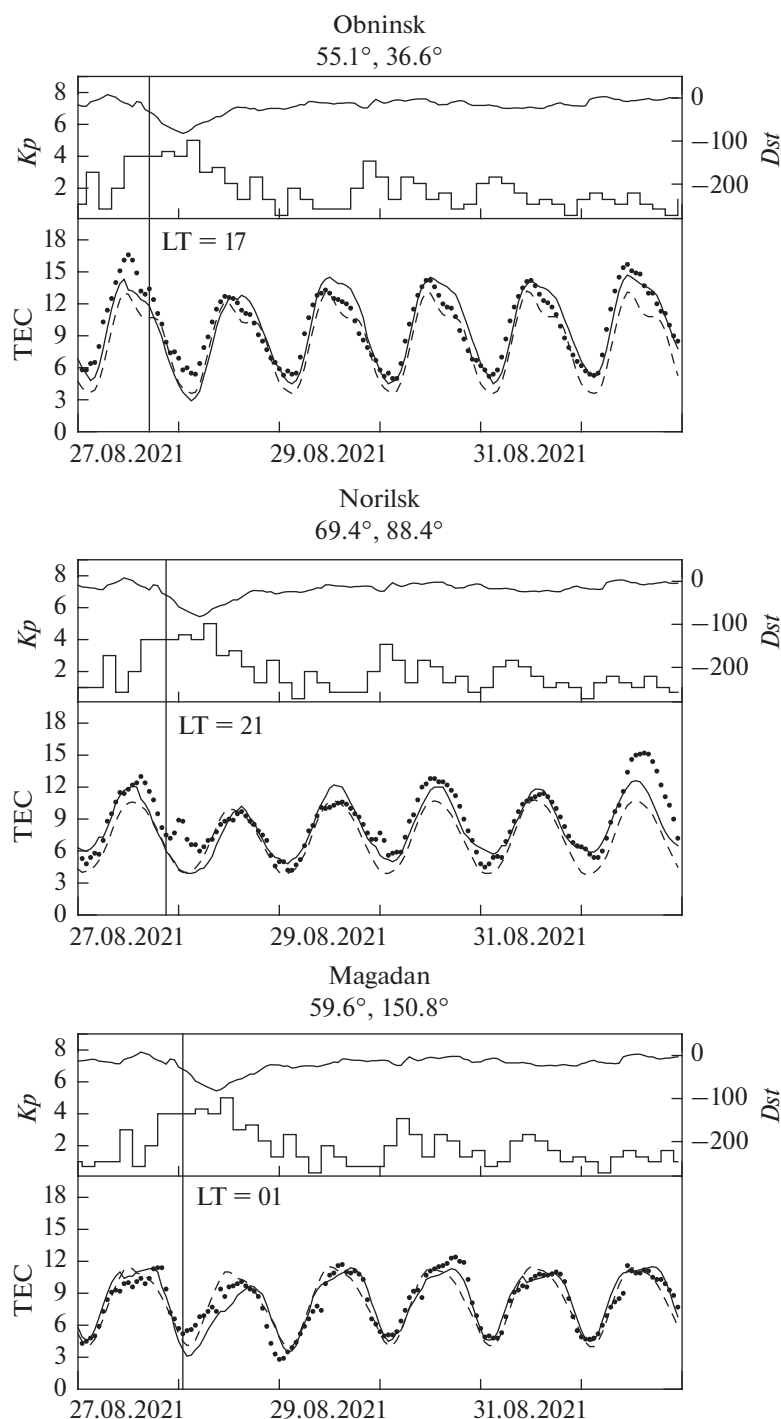


Рис. 4. Буря 27.08–01.09.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1.

IRI-2016 используется файл IG_RZ.dat. Этот файл обновляется примерно 2 раза в год. Поэтому эти модели применяются в основном для научных исследований или для долгосрочного прогноза параметров ионосферы в качестве климатических моделей. Преимущество введенного нами индекса FF (уравнение 1) состоит в том, что в нем учитывается предыстории изменения $F10.7$.

Из этого следует, что построенная нами адаптированная модель GDMTEC может использоваться для краткосрочного прогноза VTEC.

В каждой геомагнитной буре, выбранной для проверки модели GDMTEC, для событий 14 UT 19.02.2022 г., 15 UT 27.08.2022 г. и 20 UT 17.10.2022 г. нами были проведены сравнения GDMTEC

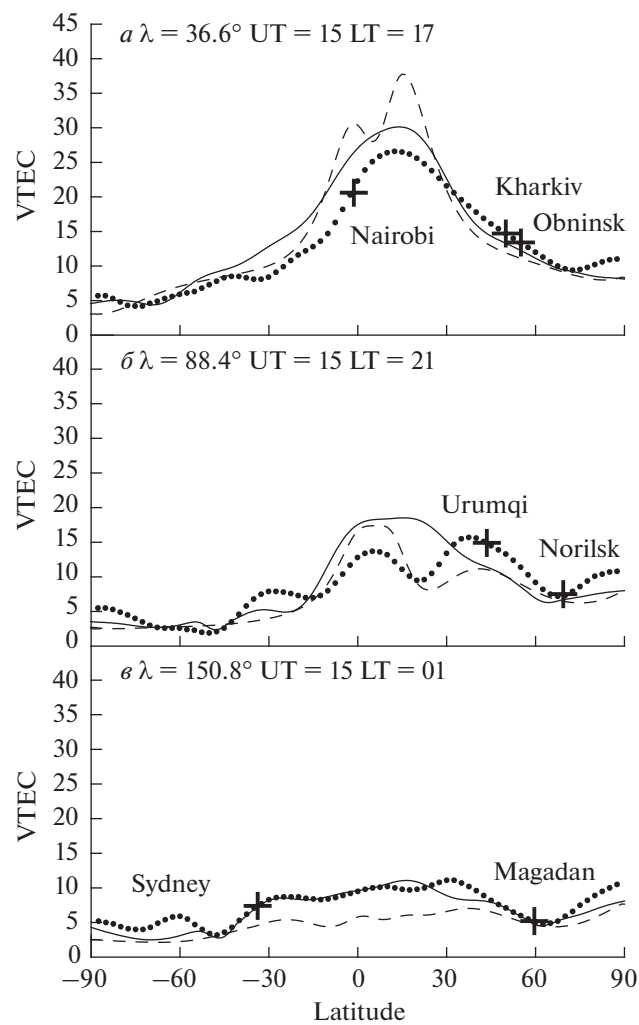


Рис. 5. Буря 27.08–01.09.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 2.

Таблица 2. Среднеквадратичные RMSE (в TECU) и средние MRD (в %) отклонения VTEC по моделям GDMTEC, IRI-Plas (с файлом IG_RZ.dat от 02.2022 г.) от наблюдаемых данных GIM-TEC (рис. 2, 5, 8). Количество значений $N = 71$

События	Долгота, время, ч	GDMTEC		IRI-Plas	
		RMSE (TECU)	MRD (%)	RMSE (TECU)	MRD (%)
19.02.2021 14UT	$\lambda = 36.6^\circ$, LT = 16	2.07	12.32	3.05	17.21
	$\lambda = 88.4^\circ$, LT = 20	1.88	18.33	3.93	19.40
	$\lambda = 150.8^\circ$, LT = 00	1.13	11.27	2.91	35.89
27.08.2021 15UT	$\lambda = 36.6^\circ$, LT = 17	3.45	21.18	4.19	21.41
	$\lambda = 88.4^\circ$, LT = 21	2.87	28.12	2.65	26.47
	$\lambda = 150.8^\circ$, LT = 01	1.26	14.31	2.98	36.27
17.10.2021 20UT	$\lambda = 36.6^\circ$, LT = 22	2.95	26.33	3.69	30.35
	$\lambda = 88.4^\circ$, LT = 02	1.48	17.21	2.64	28.14
	$\lambda = 150.8^\circ$, LT = 06	1.03	11.25	1.23	13.10

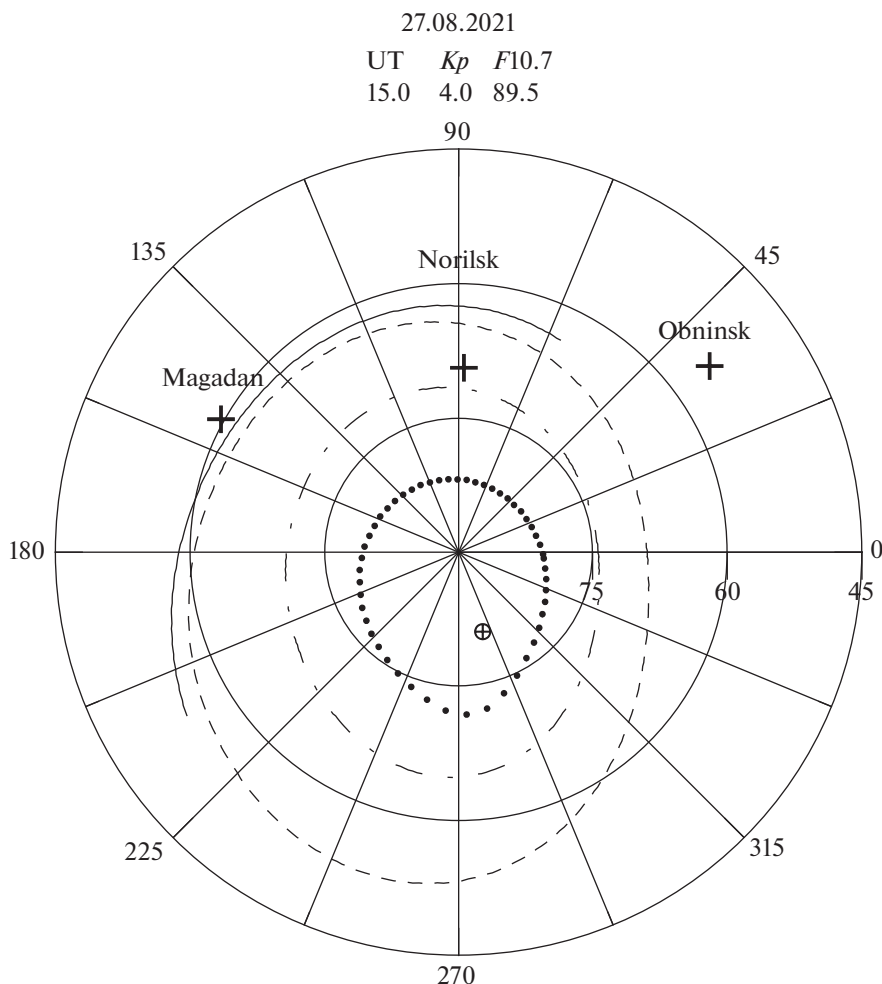


Рис. 6. Буря 27.08–01.09.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 3.

вдоль долгот соответствующих станциям ГНСС — Обнинск, Норильск, Магадан. Соответствующие широтные изменения модельных и экспериментальных VTEC показаны на рис. 2, 5 и 8. На рис. 3, 6 и 9 расположение этих станций относительно высокоширотных границ представлено в полярной системе координат. На этих рисунках нами была использована модель IRI-Plas с файлом IG_RZ.dat от 02.2022 г.

Как видно из рис. 2 и 3 ст. Обнинск находилась на средних широтах, ст. Магадан — на экваториальной границе ГИП, а ст. Норильск — на экваториальной границе аврорального овала. При этом модель GDMTEC адекватно описывает широтные изменения как значений VTEC, полученных из GIM-TEC, так и VTEC на станциях ГНСС. Заметные расхождения наблюдаются в Южном полушарии и в области экваториальной аномалии. Модель IRI-Plas, за исключением 16 LT вблизи экватора, практически везде недооценивает VTEC.

Как изображено на рис. 5 и 6 в 15 UT 27.08.2022 г. ст. Магадан за счет смещения высокоширотных границ оказалась практически в минимуме ГИП, а ст. Норильск — в максимуме аврорального овала. Из рис. 5 следует, что модель GDMTEC более адекватно отражает поведение VTEC на долготах ст. Обнинск и ст. Магадан на средних широтах и переоценивает VTEC в области экватора. Модель IRI-Plas по-прежнему почти везде, за исключением области экватора на долготах Обнинска и Норильска, недооценивает VTEC.

Во время бури 17.10–22.10.2021 г. ст. Норильск остается вблизи максимума аврорального овала, ст. Магадан — на экваториальной границе ГИП и ст. Обнинск — в среднеширотной ионосфере. Модель GDMTEC достаточно точно оценивает величины VTEC на всех наземных станциях ГНСС, положение которых в пространстве и времени удовлетворяли условиям $\Delta\lambda = \pm 1^\circ$ и $\Delta UT = 0.3$ ч.

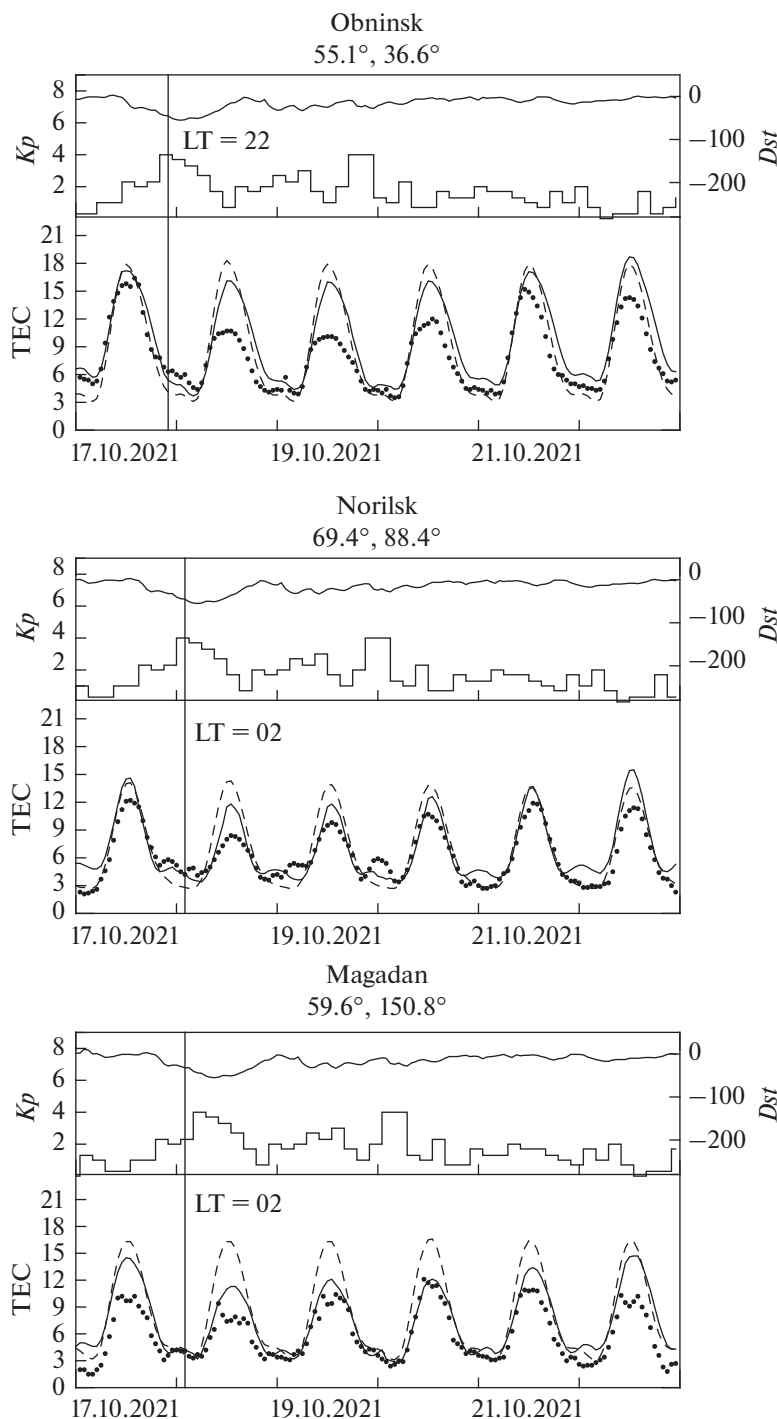


Рис. 7. Буря 17.10–22.10.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1.

Как видно из табл. 2, ошибки GDMTEC значительно на 20–60% меньше, чем ошибки IRI-Plas, за исключением широтного хода VTEC в 21 LT 27.08.2022 г. на долготе Норильска (рис. 5). Соответствующие значения RMSE и MRD в табл. 2 выделены жирным шрифтом. Основные расхождения наблюдаются на субавроральных и

авроральных широтах, где ионосфера наиболее изменчива.

Как следует из проведенной проверки модели GDMTEC, аэрономическая поправка позволяет адекватно моделировать отрицательные возмущения VTEC во время геомагнитных возмущений. Вместе с этим используемые в ней изменяю-

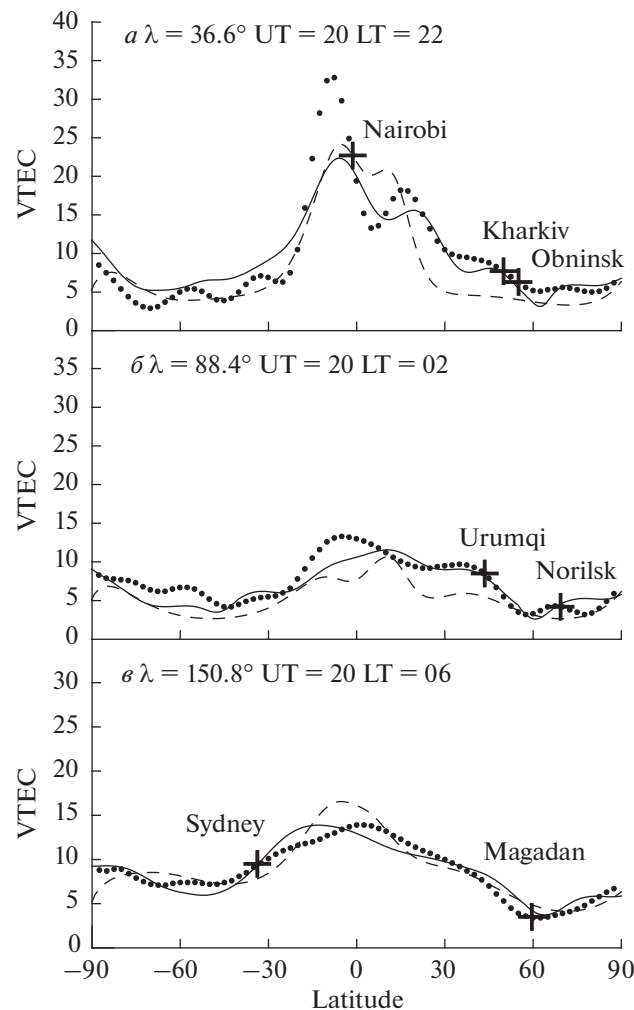


Рис. 8. Буря 17.10–22.10.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 2.

щиеся границы аврорального овала и положения минимума ГИП во время геомагнитных возмущений достаточно точно описывают изменения VTEC на разных широтах и долготах, а также в разные сезоны. Следует отметить, что точность GDMTEC определяется также точностью используемой медианной модели GTEC в качестве фона для геомагнитно-спокойных условий и модели термосферы NRLMSISE-00 во время геомагнитных бурь.

Следует отметить, что в GDMTEC учтена аэрономическая поправка на изменение температуры, а также состава термосферы и не учтена поправка на изменение скорости термосферного ветра во время геомагнитных бурь. По этой причине модель GDMTEC может недооценивать возможное увеличение VTEC в периоды геомагнитной бури, когда скорость ветра может сильно изменяться. Учет дополнительной поправки в VTEC на изменение скорости термосферного ветра во время геомагнитной бури требует специального

рассмотрения, что выходит за рамки данной работы.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Динамические пространственно-временные вариации ионосферы, в конечном счете, зависят от солнечного ультрафиолетового излучения и геомагнитных возмущений. Преимущество аэрономической и динамической коррекции медианной модели по сравнению с ассимиляцией текущих наблюдательных данных заключается в независимости прогноза от наличия этих данных в реальном времени.

Использование в качестве входных параметров модели GDMTEC интегральных индексов солнечной $F10.7$ и геомагнитной a_p активности, которые учитывают предысторию их изменения, позволяют осуществлять краткосрочный прогноз ТЕС. При этом продолжительность и качество прогноза ТЕС будет определяться точностью про-

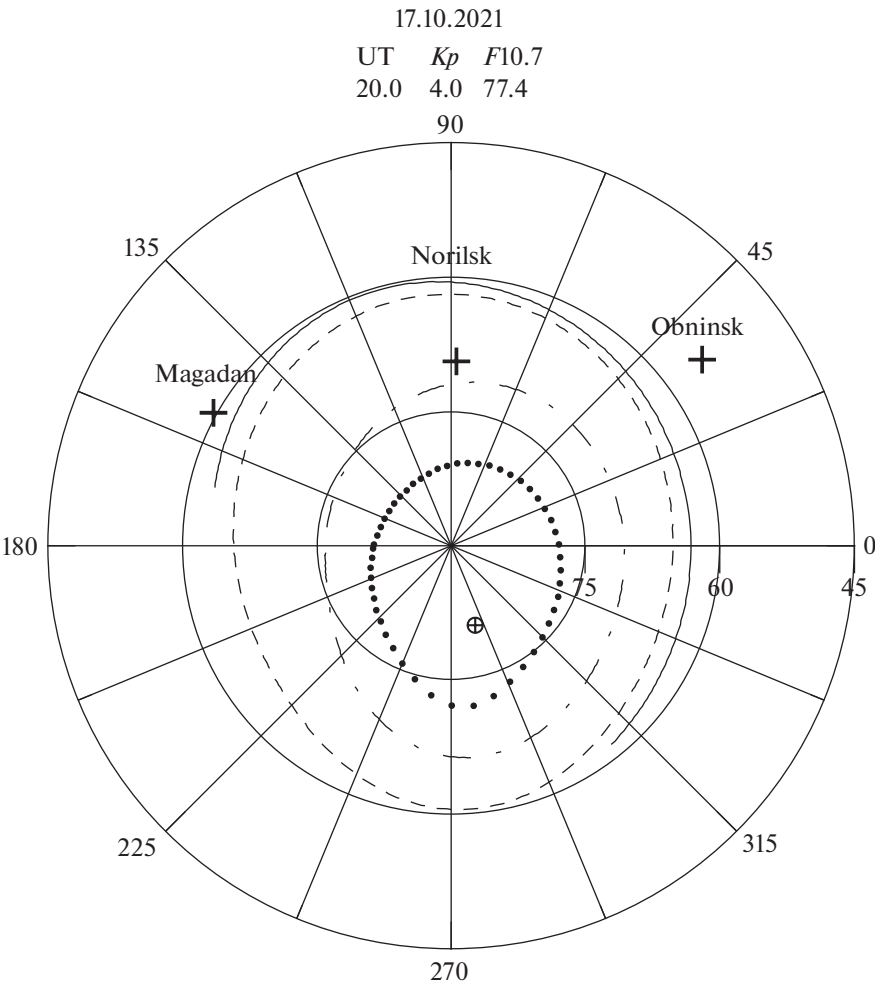


Рис. 9. Буря 17.10–22.10.2021 г. Обозначения соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 3.

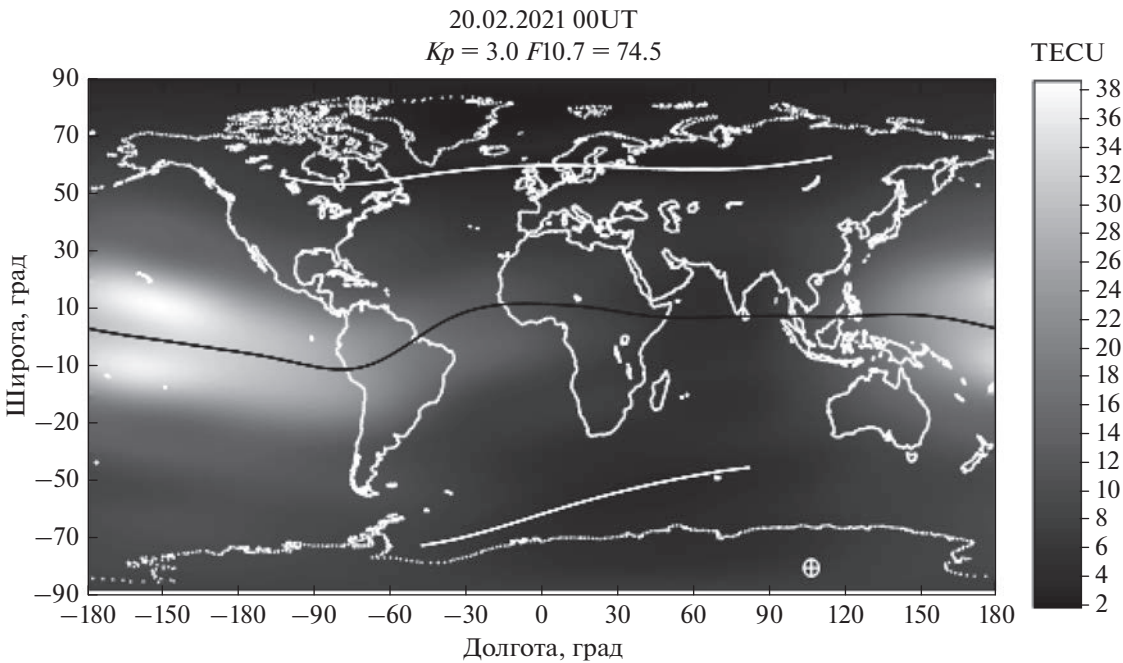


Рис. 10. Глобальное распределения VTEC для 00 UT 20.02.2021 г., рассчитанное по GDMTEC. Белые линии — положения минимума ГИП. Черной линией обозначен геомагнитный экватор.

гнозов солнечных $F10.7$ - и геомагнитных a_p -индексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аннакулиев С.К., Деминов М.Г., Шубин В.Н. Полуэмпирическая модель бури в ионосфере средних широт // Солнечно-земная физика. Вып. 8. С. 145–146. 2005.
- Деминов М.Г. Ионосфера Земли: закономерности и механизмы // Электромагнитные и плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. Ред. В.Д. Кузнецов. М.: ИЗМИРАН. С. 295–346. 2015.
<https://www.izmiran.ru/IZMIRAN75/>
- Деминов М.Г., Шубин В.Н. Эмпирическая модель положения главного ионосферного провала // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 58. № 3. С. 366–373. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018030070>
- Деминов М.Г., Шубин В.Н., Бадин В.И. Модель критической частоты Е-слоя для авроральной области // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 5. С. 610–617. 2021.
<https://doi.org/10.31857/S0016794021050059>
- Кринберг И.А., Выборов В.И., Кошелев В.В., Попов В.В., Сутырин Н.А. // Адаптивная модель ионосферы. Ред. Л.А. Щепкин. М.: Наука. С. 1–133. 1986.
- Шубин В.Н., Аннакулиев С.К. Модель отрицательной фазы ионосферной бури на средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 35. № 3. С. 79–87. 1995.
- Шубин В.Н., Аннакулиев С.К. Полуэмпирическая модель $foF2$ ночной субавроральной ионосферы в период отрицательной фазы интенсивных ионосферных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 37. № 4. С. 26–34. 1997.
- Шубин В.Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты $F2$ слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019040151>
- Alken P., Thébaud E., Beggan C. et al. International Reference Geomagnetic Field: the thirteenth generation // Earth Planets Space. V. 73. 2021.
<https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
- Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: from ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. P. 418–429. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
- Cesaroni C., Spogli L., Aragon-Angel A., Fiocchi M., Dear V., De Franceschi G., and Tomanov V. Neural network based model for global total electron content forecasting // J. Space Weather Space Clim. V. 10. 11. 2020.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2020013>
- Galkin I., Fron A., Reinisch B. et al. Global monitoring of ionospheric weather by GIRO and GNSS data fusion // Atmosphere. V. 13. 371. 2022.
<https://doi.org/10.3390/atmos13030371>
- Gulyaeva T. L., Bilitza D. Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model // New Developments in the Standard Model. Ed. R. J. Larsen. N.Y.: NOVA Sci. Pub. P. 1–39. 2012.
- Gulyaeva T. L., Arikian F., Hernandez-Pajares M., Stanislawski I. GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 102. P. 329–340. 2013.
- Hierl P.M., Dotan I., Seeley J.V., Van Doren J.M., Morris R.A., Viggiano A.A. Rate constants for the reactions of O^+ with N_2 and O_2 as a function of temperature (300–1800 K) // J. Chem. Phys. V. 106. P. 3540–3544. 1997.
- Iluore K., Lu J. Long short-term memory and gated recurrent neural networks to predict the ionospheric vertical total electron content // Adv. Space Res. V. 70. № 3. P. 652–665. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.04.066>
- Lean J.L. One- to 10-day forecasts of ionospheric total electron content using a statistical model // Space Weather. V. 17. P. 313–338. 2019.
<https://doi.org/10.1029/2018SW002077>
- Liu L., Zou S., Yao Y., Wang Z. Forecasting global ionospheric TEC using deep learning approach // Space Weather. V. 18. № 11. 2020.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002501>
- Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLM-SISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. V. 107. P. 1468–1483. 2002.
- Shubin V.N., Gulyaeva T.L. Global mapping of Total Electron Content from GNSS observations for updating IRI-Plas model // Adv. Space Res. V. 69. № 1. P. 168–175. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.032>