

ГЕОФИЗИКА/GEOPHYSICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80> EDN: UYORQS

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ ВБЛИЗИ МАКСИМУМА 25 ЦИКЛА ПО ДАННЫМ СТАНЦИИ РОСТОВ

Научная статья

Мальцева О.А.^{1,*}, Никитенко Т.В.²¹ORCID : 0000-0001-5679-8849;^{1,2} Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (oamaltseva[at]sfedu.ru)

Предложена: 10.04.2026; Принята: 30.06.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

Состояние ионосферы, определяющей условия функционирования различных технологических систем, можно задавать с помощью эмпирических моделей, в которых важнейшими и равноценными параметрами являются критическая частота foF2 и полное электронное содержание ТЕС, однако пункты их измерения сильно различаются как числом, так и распределением по земному шару, поэтому важно исследовать возможность использования ТЕС для определения foF2 в зонах, где нет ионозондов. Эта возможность может быть реализована при наличии связи между параметрами. Известно, что большая связь существует в спокойных условиях и при низкой солнечной активности. В данной работе исследуется связь foF2 и ТЕС в период очень высокой солнечной и геомагнитной активности по данным станции Ростов. Особенностью является сравнение среднемесячных значений метрик с метриками во время возмущенных периодов. Получено, что среднемесячные значения коэффициентов корреляции $\rho(\text{foF2-TEC})$ превышают 0.8, что свидетельствует о сильной связи, однако оказалось, что этот коэффициент имеет суточный ход, когда $\rho(\text{foF2-TEC})$ может опускаться до значений 0.2-0.4. Адаптация модели IRI-Plas к экспериментальным значениям ТЕС обеспечила точность определения foF2 со среднеквадратичной ошибкой $\text{RMSE} < 0.8$ МГц как в течение месяца, так и в периоды магнитных бурь.

Ключевые слова: ионосфера, критическая частота, полное электронное содержание, солнечная активность, магнитная буря, модель IRI-Plas.

INFLUENCE OF GEOMAGNETIC DISTURBANCES ON IONOSPHERIC PARAMETERS NEAR THE CYCLE 25 MAXIMUM ACCORDING TO THE ROSTOV STATION

Research article

Maltseva O.A.^{1,*}, Nikitenko T.V.²¹ORCID : 0000-0001-5679-8849;^{1,2} Scientific Research Institute of Physics of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

* Corresponding author (oamaltseva[at]sfedu.ru)

Suggested: 10.04.2026; Accepted: 30.06.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

The state of the ionosphere, which determines the operating conditions of various technological systems, can be set using empirical models in which the critical frequency foF2 and the total electronic content are the most important and equivalent parameters, but their measurement points vary greatly both in number and distribution around the globe, so it is important to explore the possibility of using TEC to determine foF2 in zones where there are no ionosondes. This feature can be implemented if there is a relationship between the parameters. It is known that a close connection exists in quiet conditions and with low solar activity. In this paper, the relationship between foF2 and TEC is investigated during a period of very high solar and geomagnetic activity according to the Rostov station. A special feature is the comparison of the monthly average values of metrics with metrics during disturbed periods. It was found that the average monthly values of the correlation coefficients $\rho(\text{foF2-TEC})$ exceed 0.8, which indicates a strong relationship, but it turned out that this coefficient has a daily course when $\rho(\text{foF2-TEC})$ can drop to values 0.2-0.4. Adaptation of the IRI-Plas model to experimental values of TEC ensured the accuracy of determining foF2 with $\text{RMSE} < 0.8$ MHz both during the month and during periods of magnetic storms.

Keywords: ionosphere, critical frequency, total electronic content, solar activity, magnetic storm, IRI-Plas model.

Введение

Космическая погода оказывает всё большее влияние на жизнь человечества. Достаточно отметить, что сообщения о состоянии и прогноз космической погоды стали каждодневной практикой. Наиболее сильное влияние испытывает околоземное космическое пространство и его ионизованная часть ионосфера, которая определяет функционирование огромного числа наземных и космических технологических систем, включая работу загоризонтных радаров, высокочастотную КВ-радиосвязь, глобальные навигационные спутниковые системы GNSS, низкочастотную радиоастрономию и др.

Важнейшим параметром, определяющим состояние ионосферы, является критическая частота foF2, от которой зависит качество работы любой модели ионосферы. Важность этого параметра подчеркивается постоянным развитием техники ионосферного зондирования, последним шагом которого является, например, создание системы IonoNet ионозондов для наклонного и вертикального зондирования с полным анализом данных, допускающих отображение крупномасштабных ионосферных неоднородностей, проверку правильности глобальных моделей, исследование локальных возмущений [1]. Однако ионозондов, обеспечивающих измерение foF2, на земном шаре не больше нескольких сотен. Другим, не менее важным параметром является полное электронное содержание TEC (Total Electron Content), измеряемое приемниками GPS (Global Positioning System) по времени распространения сигналов от спутников. Более того, он начинает играть всё большую роль, поскольку GPS приемников в сотни раз больше. В данной работе в дополнение к таким его важнейшим приложениям, как высокоточное позиционирование, спутниковые геодезические приложения, решение ассимиляционных задач (например, [2]), делается акцент на его роль в определении foF2, особенно в тех регионах, где нет ионозондов.

Космическая погода определяет вариации этих параметров на различных временных и пространственных масштабах. Наиболее сильное влияние имеет место во время максимума солнечной активности и в периоды магнитных бурь, вызывающих сильные геомагнитные возмущения.

Настоящий период времени представляет интерес, поскольку пройден максимум 25 цикла солнечной активности, который отличается от соответствующего периода 24 цикла (одиннадцати летней давности) более высокой солнечной и геомагнитной активностью. Настоящая работа посвящена исследованию поведения параметров TEC и foF2 и их связи в этот период. Если ориентироваться на индекс F10.7 (солнечный радиопоток на частоте 10.7 см (2800 МГц), характеризующий солнечную активность), то его максимум приходится на август 2024, поэтому выбран период, отстоящий на 12 месяцев для предшествующих и последующих месяцев с августа 2023 по август 2025. Поведение индекса F10.7 (левая панель) в единицах sfu и минимальных значений storm-time disturbance индекса Dst в единицах nT (правая панель) в этот период показано на рис. 1.

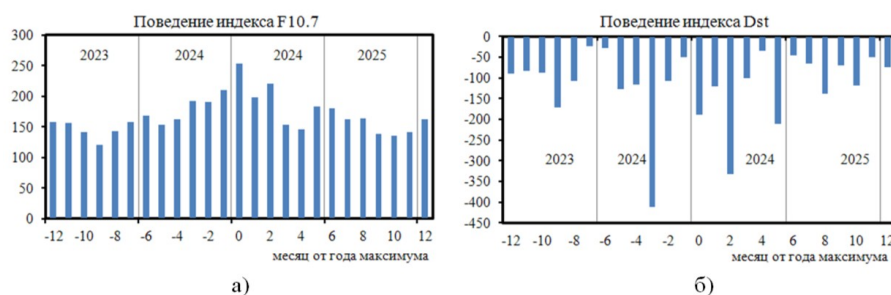


Рисунок 1 - Поведение индексов в период максимума солнечной активности:
а) F10.7; б) Dst

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.1>

Средние значения индекса F10.7 составили 167.9 sfu за весь период и 163.1 sfu и 165.6 sfu за предшествующий и последующий периоды соответственно (без значения в августе 2024). Для Dst эти значения составили соответственно -118.1 nT, -117.0 nT и -113.4 nT, т.е. средние активности на нарастающей и ниспадающей ветвях примерно одинаковые, однако видны некоторые определенные вариации. Для F10.7 в первые 4 месяца имеет место уменьшение индекса, затем увеличение до максимального значения и после этого начинается ниспадающая ветвь солнечного цикла. Среднее значение индекса Dst связано с его неравномерным распределением, при котором на нарастающей ветви выделяется один самый мощный всплеск, а на ниспадающей ветви ряд сильных возмущений меньшей интенсивности.

Методы и принципы исследования

В работе используется набор значений TEC глобальной карты UPC, рассчитанных из IONEX файлов с шагом 2 часа (<https://cdis.nasa.gov/archive/gnss/products/ionex>, <https://urs.earthdata.nasa.gov>, вход по паролю) за выбранные месяцы 2023-2025 для среднеширотной станции Ростов (47.2° N, 39.7° E). По указанным адресам расположены файлы для каждого дня, представляющие значения TEC на сетке широт в диапазоне 87.5° N÷87.5° S с шагом 2.5° и на сетке долгот в диапазоне -180°E ÷180°E с шагом 5° для различных времен UT с шагом 2 часа. Значения TEC для конкретного пункта и времени UT вычисляются по разработанной программе. Значения foF2 выбраны на сайте ИПГ (<http://ipg.geospace.ru/>) с марта 2024 по август 2025, остальные значения отсутствовали. На сайте ИПГ необходимо перейти по ссылке службы, далее геофизический центр, ионосферные данные, далее архив и задать дату. Данные солнечного потока F10.7 и индекса Dst выбраны на вебсайте (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>). Поскольку одной из задач является оценка точности эмпирической модели IRI-Plas [3], модельные значения параметров TEC и foF2 рассчитывались онлайн на сайте (<http://www.ionolab.org/index.php?language=en>) для двух вариантов: исходной модели и модели, адаптированной к экспериментальным значениям TEC(obs). Процедура расчета и адаптация проводились так, как это описано в статье [4]. Любая эмпирическая модель ионосферы предоставляет среднемесячные значения ее параметров путем задания даты и расположения пункта наблюдения. Эти значения в общем случае отличаются от мгновенных значений параметров, необходимых для работы технологических систем в реальном времени. Особенностью модели IRI-Plas является возможность адаптации к мгновенному значению TEC, при которой

новые адаптированные значения должны быть ближе к экспериментальным, чем среднемесячные. Для этого предусмотрен ввод соответствующего значения TEC. В работе расчеты проводились для исходной (init) и адаптированной (adapt) опций модели IRI-Plas. Близость экспериментальных и модельных значений, характеризующая точность модели, оценивалась с использованием средней абсолютной ошибки MAE, среднеквадратической ошибки RMSE, средней абсолютной процентной ошибки MAPE. Оценки проводились для всего месяца и для периода наиболее сильного возмущения в каждом месяце.

Эти данные позволили поставить следующие задачи:

- 1) определить особенности поведения параметров ионосферы вблизи максимума 25 солнечного цикла;
- 2) оценить коэффициент корреляции между ними;
- 3) оценить точность модели IRI-Plas.

Их решение является целью работы.

Особенности поведения параметров ионосферы вблизи максимума 25 солнечного цикла

Пример поведения параметров TEC и foF2 и их относительных отклонений от соответствующих медиан приведен на рис. 2 для апреля 2024.

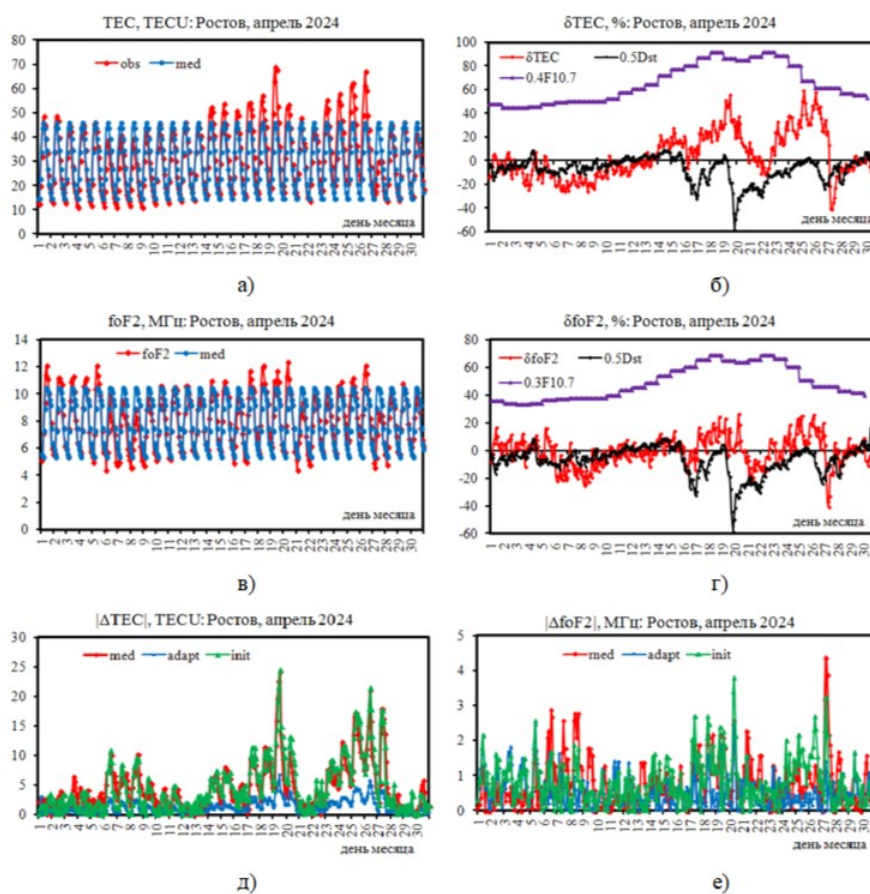


Рисунок 2 - Поведение параметров ионосферы на примере апреля 2024: а) TEC; б) δTEC ; в) foF2; г) δfoF2 ; д) $|\Delta\text{TEC}|$; е) $|\Delta\text{foF2}|$

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.2>

На рис. 2а показано поведение TEC вместе с месячной медианой. Для каждого дня представлен суточный ход TEC и медиан. Дополнительно показаны значения индексов F10.7 и Dst, уменьшенные для определенного соответствия масштабов. Для индекса F10.7 дано одно значение, поскольку оно является постоянным в течение суток. Даже визуально видно влияние физических процессов, отражающихся в вариациях индексов. Средний ряд включает результаты для foF2. Видна определенная аналогия поведения TEC и foF2. Последний ряд показывает результаты, используемые при оценке точности модели IRI-Plas, где сравниваются отклонения медиан от экспериментальных значений, характеризующие изменения день ото дня и влияние возмущений, а также разности между экспериментальными и модельными значениями параметров для двух вариантов: исходной модели и модели, адаптированной к экспериментальным значениям TEC(obs).

Необходимо пояснить, что для практических приложений широко используются глобальные эмпирические модели ионосферы, позволяющие получать ее параметры в любой точке земного шара. Модель IRI-Plas выбрана, поскольку она позволяет рассчитывать TEC до высоты спутников, а, главное, включает процедуру коррекции модели с использованием экспериментальных значений TEC(obs) в данной точке и данный момент времени.

Видно, что точность исходной модели близка к значениям для медиан, что можно считать естественным, поскольку исходная модель является медианной. Для этих точностей будет приведена статистика по всем месяцам.

В заключение раздела на рис. 3 приводится количественная оценка связи параметров ТЕС и δ ТЕС с индексами F10.7 и Dst с помощью коэффициентов корреляции, поскольку данные foF2 не полные.

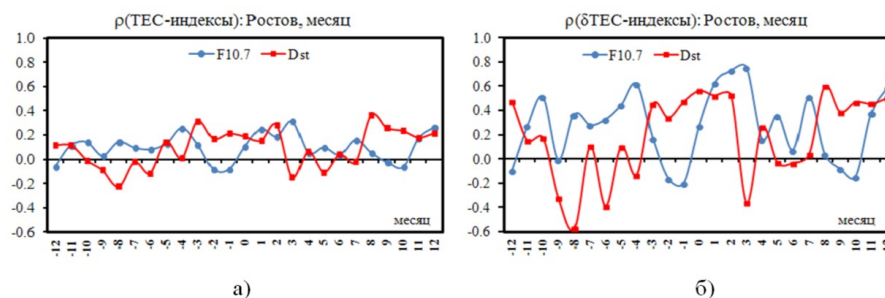


Рисунок 3 - Связь параметров с индексами F10.7 и Dst:
а) ТЕС; б) δ ТЕС

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.3>

Для ТЕС диапазон ρ для F10.7 и Dst составляет $-0.2 \div 0.4$, коэффициенты имеют различные знаки. Для δ ТЕС диапазон ρ составляет $-0.6 \div 0.8$, часто указывая на преобладающее влияние одного или другого индекса, соответственно, физического фактора, на вариации ТЕС. Оба коэффициента распределены неравномерно по отношению к месяцам. Такая оценка важна для построения регрессионных моделей.

Обсуждение

4.1. Корреляция параметров ТЕС и foF2

Связь этих параметров важна, потому что оба описывают состояние ионосферы и используются для его прогнозирования, однако их точки измерения распределены неравномерно: количество ионозондов, обладающих большой точностью измерения foF2, не превышает нескольких сотен, а число GPS приемников превышает несколько сотен тысяч, поэтому важно исследовать, насколько параметры взаимозаменяемы, что позволит, например, определять foF2 с использованием ТЕС в зонах отсутствия ионозондов. Для этого в ряде работ исследовалась их связь. В одной из последних работ [5] по данным 4 китайских станций за 9 лет тестировались 4 модели зависимости ТЕС от foF2 (линейная, квадратичная, экспоненциальная и составная экспоненциальная). Была выделена квадратичная зависимость, что не удивительно, потому что по определению $TEC = \tau \cdot NmF2$ (например, [6]), где τ эквивалентная толщина ионосферы, а $NmF2$ — максимальная плотность электронов, пропорциональная квадрату foF2. Тем не менее, на практике традиционно используется коэффициент корреляции между ТЕС и foF2. Считается, что эта связь может нарушаться во время максимума солнечной активности и в периоды магнитных бурь, поэтому в данной работе получены коэффициенты корреляции ТЕС и foF2 именно в таких условиях (рис. 4). В левой части рис. 4 даны среднемесячные коэффициенты, рассчитанные для всего месяца, и для периода возмущений в каждом месяце.

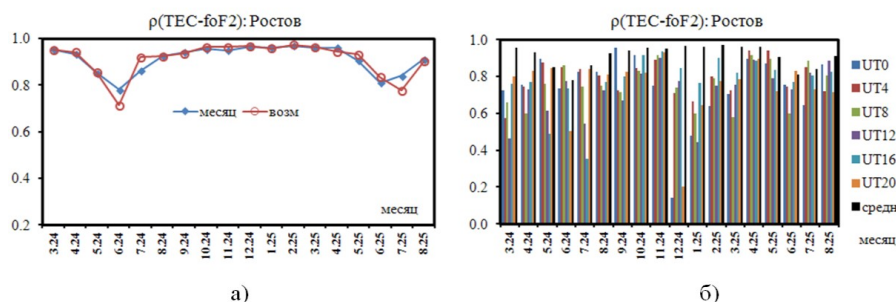


Рисунок 4 - Связь параметров ТЕС и foF2 на примере станции Ростов:
а) средние значения за месяц; б) суточный ход в каждом месяце

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.4>

Их значения превышают 0.8, кроме июня, что свидетельствует о высокой связи. Необходимо отметить, что коэффициенты в периоды возмущений очень близки к среднемесячным значениям, т.е. возмущение не привело к разбалансировке связи. В правой части приведены среднемесячные значения для нескольких конкретных часов суток в пределах каждого месяца. Черные вертикальные линии соответствуют значениям, показанным в левой части. Видно, что в определенные часы и месяцы корреляция может быть достаточно слабой. Особенно это относится к ночным часам.

Следующий шаг этого подраздела относится к оценке влияния возмущенных условий на значения параметров. Для этого на рис. 5 приводятся коэффициенты корреляции значений параметров TEC и foF2 с индексом Dst за весь месяц и за период наиболее мощного возмущения в каждом месяце. Для foF2 результаты приведены для уменьшенного периода из-за отсутствия данных.

Для обоих параметров видны одинаковые тенденции: влияние возмущения существенно больше для отклонений, чем для абсолютных величин. Коэффициенты для TEC и foF2 довольно близки вследствие их связи, однако, если перестроить эти графики в зависимости от силы возмущения, то какой-либо определенной зависимости нет даже в тренде, но имеется определенный тренд в зависимости от месяца: $\rho(\text{Dst})$ уменьшается по абсолютной величине в течение 5 месяцев нарастающей ветви, затем увеличивается до максимума цикла, после максимума видно падение корреляции со сменой знака, затем ее увеличение до положительных значений.

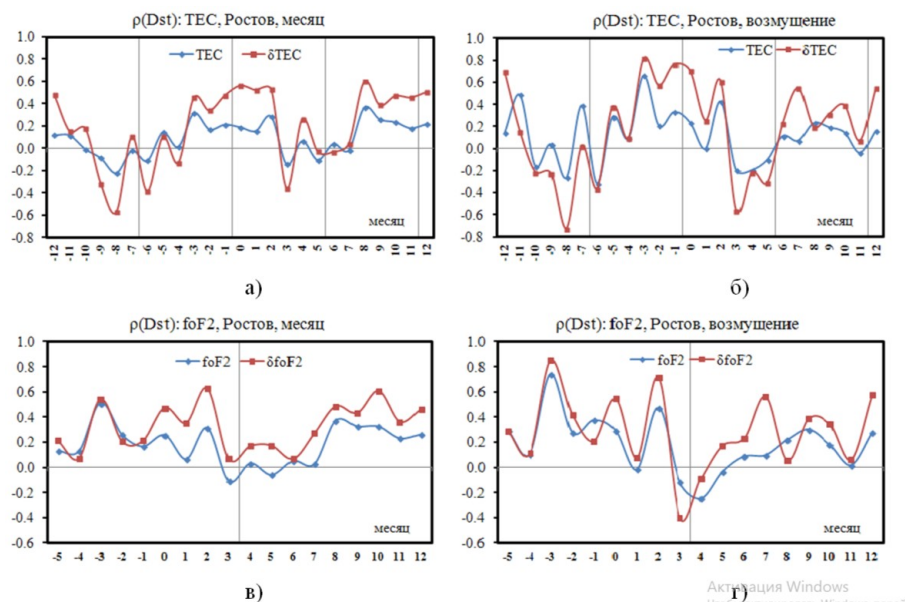


Рисунок 5 - Коэффициенты корреляции параметров с индексом Dst:
а) TEC и месяц; б) TEC в период возмущений; в) foF2 и месяц; г) foF2 в период возмущений
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.5>

4.2. Оценка точности модели IRI-Plas для выбранного периода

Как отмечалось, эмпирические модели играют огромную роль. Их тестированию, для различных регионов и различных ионосферных условий, уделяется большое внимание. Современные модели постоянно модифицируются в соответствии, в том числе, с результатами тестирования. Это в большой степени относится к модели IRI-Plas [4]. В данной работе исследуется точность IRI-Plas при моделировании параметров TEC и foF2 с помощью таких метрик, как абсолютная точность MAE, RMSE, MAPE. Поскольку при использовании эмпирических моделей имеют дело с медианой, экспериментальную медиану (значки med на графиках) нужно сравнивать со значениями исходной модели IRI-Plas (значки init на графиках). Для получения значений параметров вблизи моментов реального времени, модель корректируется по экспериментальным значениям TEC(obs) в эти моменты (значки adapt на графиках). Абсолютная точность TEC представлена на рис. 6 в виде средних значений за весь месяц (левая панель) и за возмущенный период (правая панель) магнитной бури (МБ) каждого месяца. По оси x даны месяцы и максимальные отрицательные значения Dst.

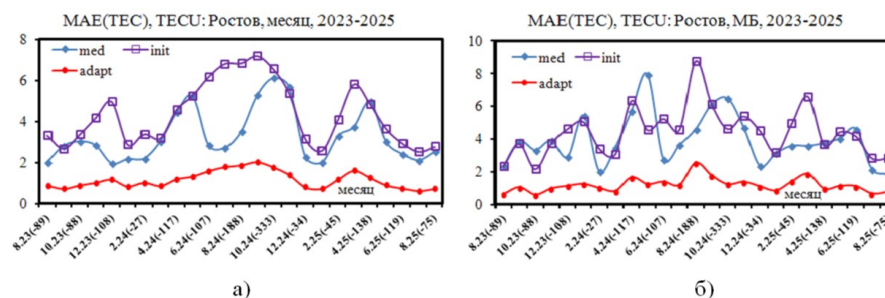


Рисунок 6 - Точность модели IRI-Plas при определении параметра TEC:
а) за месяц; б) в период магнитной бури
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.6>

Видно, что наибольшие отклонения медианы от экспериментальных значений приходятся на наиболее сильные МБ, исходная модель дала наибольшие отклонения фактически для всех возмущений. Отклонения адаптированной модели меньше 2 TECU, что сравнимо с точностью IGS карт [7], к тому же практически не зависят от интенсивности МБ. В случае возмущенных периодов значения MAE немного увеличиваются, но адаптированные значения остаются меньше 2 TECU. Значения RMSE фактически повторяют ход кривых MAE, не превышая 10 TECU, адаптированные значения тоже немного увеличились, но кроме МБ в апреле 2024 остались ниже 2 TECU. То же относится и к MAPE: кривые для медиан и исходной модели не превышают 30%, для адаптированной модели не превышают 10% за исключением случая в декабре 2023, когда среднемесячные и возмущенные значения составили 50%. Для foF2 подобные графики представлены на рис. 7.

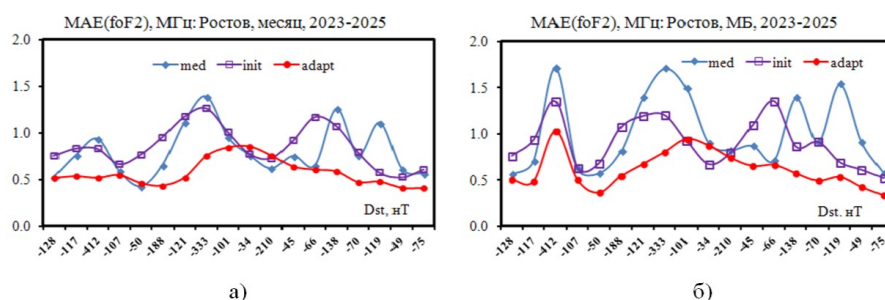


Рисунок 7 - Точность модели IRI-Plas при определении параметра foF2:

а) за месяц; б) в период магнитной бури

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.7>

Значения MAE для медиан реагируют на сильные бури и могут превышать 1.5 МГц, но уже значения исходной модели показывают более высокую точность, чем медианы. Адаптированные значения не превышают 1 МГц и обеспечивают одинаковую точность как в среднем в течение месяца, так и в периоды возмущений со средними значениями 0.58 МГц и 0.62 МГц. Возмущенные значения RMSE(foF2) не превышают 1.1 МГц для адаптированной модели, 1.5 МГц для исходной модели и 2 МГц для медиан. Значения MAPE(foF2) не превышают 15% для адаптированной модели, 20% для исходной модели и 30% для медиан. Средние значения для всех метрик представлены в таблице 1 для TEC и foF2.

Таблица 1 - Суммарная информация по метрикам для модели IRI-Plas

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.8>

	MAE			RMSE			MAPE		
	мед.	исх.	адапт.	мед.	исх.	адапт.	мед.	исх.	адапт.
TEC (мес)	3,30	4,38	1,17	4,67	5,80	1,54	18,77	23,48	6,31
TEC (МБ)	3,93	4,42	1,18	5,30	5,97	1,55	22,92	25,58	6,55
foF2 (мес)	0,85	0,86	0,58	1,11	1,08	0,76	15,28	13,59	9,87
foF2 (МБ)	1,01	0,90	0,62	1,31	1,14	0,80	18,70	16,39	11,39

Таблица позволяет сравнивать метрики для месяца и периода возмущений. Видно, что, если для медиан значения метрик различаются, то после адаптации разница практически исчезает, свидетельствуя о высокой точности модели.

Заключение

В этом разделе полученные результаты сравниваются с литературными данными. Поскольку большинство публикаций использует данные, относящиеся к 24 циклу, значения параметров и соответствующих метрик могут быть меньше в силу меньшей солнечной активности. Это иллюстрируется рисунками 8 и 9 из [4], однако эти оценки получены для спокойных условий. В данной работе эффективность модели IRI-Plas для определения foF2 с

использованием экспериментальных значений ТЕС продемонстрирована для условий высокой солнечной и геомагнитной активности.

В качестве важного примера для сравнения можно использовать результаты статей [8], [9]. В работе [8] связь между foF2 и ТЕС исследовалась по данным станции Москва (55.8°N, 37.2°E) в течение 4 дней во время 4 сезонов в годы низкой (2010) и высокой (2014) солнечной активности. Получили коэффициент корреляции $\rho(\text{TEC-foF2})$ равным 0.82 летом и превышающим 0.9 для остальных сезонов, что совпадает с графиком рис. 4. Уже в этой статье [8] было замечено наличие суточного хода связи между параметрами, что подтверждено в данной работе на большей статистике. Более того, указано на важную возможную причину этого хода, заключающуюся в том, что днем основной вклад в ТЕС вносит слой F2, а в ночное время — плазмаосфера. В работе [9] связь между foF2 и ТЕС исследовалась методом искусственных нейронных сетей и по данным 52 пар ионозонд-GNSS-приемник за период 17 лет с 2000 г. по 2016 г. была разработана модель (и соответствующая программа) NNT2F2 в MATLAB, доступная в интернете, обеспечивающая точность определения foF2 в глобальном масштабе меньше 1 МГц. Также отмечено незначительное влияние геомагнитной активности на результаты, что подтверждается таблицей 1 данной работы для условий намного более интенсивных возмущений.

Необходимо подчеркнуть, что выбранный в данной работе период, как показывает рис. 1, пришелся на исключительно мощные магнитные бури и в статьях, авторы которых использовали данные вертикального зондирования, отмечалось, что такие данные часто отсутствовали [10], [11]. Такая ситуация была и на станции Ростов. Отсутствующие значения foF2 определялись по регрессионному соотношению для всего месяца, которое в большинстве случаев имело высокий коэффициент достоверности.

Высокая степень соответствия адаптированных значений foF2 экспериментальным и восстановленным значениям позволяет сделать вывод о возможности определения foF2 с использованием экспериментальных значений ТЕС.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание Г3110/23-10-ИФ).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Хаердинов Н.С., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва
Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.9>

Funding

The study was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment GZ110/23-10-IF).

Conflict of Interest

None declared.

Review

Khaerdinov N.K., Institute for Nuclear Research of RAS, Moscow Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.80.9>

Список литературы на английском языке / References in English

1. Zirizzotti A. IonoNet: a European network of oblique ionosondes / A. Zirizzotti, U. Sciacca, E. Zuccheretti [et al.] // *Advances in Space Research*. — 2025. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.12.019.
2. Forootan E. Empirical Data Assimilation for Merging Total Electron Content Data with Empirical and Physical Models / E. Forootan, M. Kosary, S. Farzaneh [et al.] // *Surveys in Geophysics*. — 2023. — № 44. — P. 2011–2041. — DOI: 10.1007/s10712-023-09788-7.
3. Gulyaeva T. Towards an ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model / T. Gulyaeva, D. Bilitza // *New Developments in the Standard Model* / ed. by R.J. Larsen. — Hauppauge, New York: NOVA, 2012. — P. 1–39.
4. Gulyaeva T. Reproducing the Ionosphere Climatology with Different 2D Models / T. Gulyaeva, V. Shubin // *Annals of Geophysics*. — 2026. — № 69. — DOI: 10.4401/ag-9332.
5. Liu Y. Analysis of Correlation Between vTEC and foF2 Values over China: Dependencies on Season and Solar Activity / Y. Liu, T. Xu, L. Chernogor [et al.] // *Advances in Space Research*. — 2026. — № 77. — P. 2458–2469. — DOI: 10.1016/j.asr.2025.10.022.
6. Davies K. Ionospheric slab thickness in middle and low latitudes / K. Davies, X.M. Liu // *Radio Science*. — 1991. — № 26. — P. 997–1005.
7. Hernández-Pajares M. The IGS-VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 / M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz [et al.] // *Journal of Geodesy*. — 2009. — № 83. — P. 263–275. — DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.
8. Otugo V. The connection between the critical frequency and the total electron content of the ionosphere at low and high solar activity period / V. Otugo, C. Okujagu, S. Onwuneme // *Applied Journal of Physical Science*. — 2021. — № 3 (4). — P. 114–124. — DOI: 10.31248/AJPS2021.058.
9. Otugo V. Estimation of ionospheric critical plasma frequencies from GNSS-TEC measurements using artificial neural networks / V. Otugo, D. Okoh, C. Okujagu [et al.] // *Space Weather*. — 2019. — Vol. 17. — P. 1329–1340. — DOI: 10.1029/2019SW002257.
10. Pierrard V. Effects of the Geomagnetic Superstorms of 10–11 May 2024 and 7–11 October 2024 on the Ionosphere and Plasmasphere / V. Pierrard, T.G.W. Verhulst, J.-M. Chevalier [et al.] // *Atmosphere*. — 2025. — № 16. — P. 299. — DOI: 10.3390/atmos16030299.



11. Paul K.S. Effects of the October 2024 Storm over the Global Ionosphere / K.S. Paul, H. Haralambous, M. Moses [et al.] // Remote Sensing. — 2025. — № 17. — P. 2329. — DOI: 10.3390/rs17132329.