

УДК 550.338.2

КОРРЕЛЯЦИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В СЛОЕ F2 И ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ

© 2023 г. Н. П. Перевалова^{1,*}, К. Г. Ратовский¹, академик РАН Г. А. Жеребцов¹, А. С. Ясюкевич¹

Поступило 21.07.2023 г.

После доработки 30.07.2023 г.

Принято к публикации 01.08.2023 г.

По данным действующих в Иркутске ионозонда вертикального зондирования и приемника Глобальных навигационных спутниковых систем проведен анализ корреляции короткопериодных (периоды меньше 24 ч) волновых возмущений максимальной электронной концентрации в слое F2 (NmF2) и полного электронного содержания (ТЕС). Обработаны данные измерений за период 2003–2020 гг., включивший почти два солнечных цикла. Установлено, что наиболее вероятной ситуацией является высокая положительная корреляция короткопериодных возмущений NmF2 и ТЕС. С ростом солнечной и геомагнитной активности растет количество случаев сильной положительной корреляции (с 53 до 66%) и уменьшается количество случаев положительной и отрицательной слабой корреляции (с 46 до 33%). Во время сильных геомагнитных бурь наиболее высокая корреляция (до $R = 0.89$) наблюдается на главной фазе бури и далее уменьшается на фазе восстановления вплоть до отрицательных значений R . Рассмотрены возможные физические механизмы полученных результатов.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные возмущения, ионозонд, ГНСС, NmF2, ПЭС

DOI: 10.31857/S2686739723601709, **EDN:** LNAITO

Для обеспечения эффективной работоспособности современных спутниковых и наземных радиотехнических систем требуются надежная диагностика и прогнозирование состояния ионосферы — верхней ионизированной части атмосферы Земли. С 50-х годов прошлого столетия непрерывный контроль за динамическим режимом ионосферы обеспечивают ионозонды вертикального зондирования. В разное время мировая сеть насчитывала 100–150 ионозондов. По данным ионозонда определяются наиболее важные параметры ионосферы: критическая частота foF2 главного ионосферного слоя F2, концентрация электронов NmF2 в максимуме слоя F2, высота этого максимума hmF2. Новую эру в дистанционной диагностике ионосферы открыло развитие Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. На их основе созданы разветвленные сети наземных приемников ГНСС, общее число которых сейчас превышает 6000, обеспечивая уникальное временное (от 1 с до 30 с) и простран-

ственное (до 20 км в некоторых регионах) разрешение. При распространении в ионосфере радиосигналы испытывают задержку, величина которой пропорциональна значению полного электронного содержания (Total Electron Content, ТЕС). Это позволяет определять ТЕС по навигационным измерениям приемника ГНСС. Принято считать, что основной вклад в ТЕС вносит диапазон высот вблизи hmF2, поэтому поведение ТЕС должно хорошо коррелировать с поведением NmF2 (или foF2). Вопрос о корреляции этих параметров имеет важное прикладное значение: наличие устойчивой корреляции позволило бы прогнозировать foF2 по измерениям приемников ГНСС в регионах, где измерения ионозондом недоступны. Соответствие вариаций ТЕС возмущениям NmF2 (foF2) оценивалось во время ряда геомагнитных бурь по одновременным измерениям близко расположенных приемников ГНСС и ионозондов [1–5]. В то же время подробных статистических исследований корреляции возмущений NmF2 и ТЕС, насколько нам известно, еще не проводилось. Учитывая это, в настоящей работе на большом объеме экспериментальных данных за 2003–2020 гг. выполнен анализ корреляции короткопериодных волновых возмущений NmF2 и ТЕС.

¹ Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: pereval@iszf.irk.ru

Таблица 1. Список исследованных геомагнитных бурь

№ п/п	Даты бури	Минимум Dst (Dst _{min}), нТл	День Dst _{min}	UT Dst _{min} , ч	R в день Dst _{min}
1.	29–31.10.2003	–353	30.10.2003	00:00	0.80
2.	29–31.10.2003	–383	30.10.2003	22:00	0.80
3.	20–24.11.2003	–422	20.11.2003	20:00	0.30
4.	07–09.11.2004	–374	08.11.2004	06:00	0.77
5.	09–13.11.2004	–263	10.11.2004	10:00	0.72
6.	15–19.05.2005	–247	15.05.2005	08:00	0.73
7.	24–25.08.2005	–184	24.08.2005	11:00	0.85
8.	17–21.03.2015	–234	17.03.2015	22:00	0.80
9.	21–27.06.2015	–198	23.06.2015	04:00	0.82
10.	19–23.12.2015	–166	20.12.2015	22:00	0.49
11.	25–29.08.2018	–175	26.08.2018	06:00	0.89

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА

Короткопериодные (периоды меньше 24 ч) волновые возмущения NmF2 и ТЕС относятся к внутрисуточным вариациям, охватывая диапазоны внутренних гравитационных волн (периоды меньше 8 ч) и термических приливов (периоды от 8 до 24 ч). Для анализа использовались данные Иркутского ионозонда вертикального зондирования DPS-4 ИСЗФ СО РАН, а также функционирующей в Иркутске ГНСС-станции IRKJ международной сети IGS. Значения NmF2 вычислялись по критическим частотам, измеряемым на ионозонде DPS-4. Значения абсолютного вертикального ТЕС рассчитывались по двухчастотным измерениям приемника IRKJ по методике, предложенной в [6]. Временное разрешение данных NmF2 и ТЕС составляло 15 мин.

Обработка данных NmF2 и ТЕС выполнялась по единому алгоритму. Чтобы выделить волновые возмущения, рассчитывались относительные отклонения измеренных параметров от скользящей 27-дневной медианы: $dNmF2 = 100\% \cdot (NmF2 - NmF2_{27}) / NmF2_{27}$ и $dTEC = 100\% \cdot (TEC - TEC_{27}) / TEC_{27}$. По текущим значениям dTEC и dNmF2 для каждого суток вычислялся линейный коэффициент корреляции R.

Были обработаны данные за период 2003–2020 гг., включивший почти два солнечных цикла. Отдельно рассматривались годы с высоким и низким уровнем солнечной и геомагнитной активности. К годам с высокой (ВСГА) солнечной (среднегодовой индекс F10.7 > 80 с.е.п.) и геомагнитной (среднегодовой индекс Ap > 7 нТл) активностью относились 2003–2005 и 2012–2015 гг. К годам с низкой (НСГА) солнечной (F10.7 < 80 с.е.п.) и геомагнитной (Ap < 7 нТл) активностью относились 2008–2010 и 2018–2020 гг. Отдельно были обработаны данные для 11 наиболее

сильных геомагнитных бурь за 2003–2020 гг., приведенных в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны гистограммы распределения коэффициентов корреляции R короткопериодных возмущений dTEC и dNmF2 для различных периодов анализа. В табл. 2 приведено относительное количество случаев сильной положительной ($0.5 < R \leq 1.0$), слабой положительной ($0.0 < R \leq 0.5$), слабой отрицательной ($-0.5 < R \leq 0.0$) и сильной отрицательной ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) корреляции для рассмотренных периодов.

Из рис. 1 и табл. 2 можно сделать следующие выводы. Наиболее вероятной (около 60% случаев) является высокая положительная корреляция dTEC и dNmF2. С ростом солнечной и геомагнитной активности растет количество случаев сильной положительной корреляции (с 53 до 66%) и уменьшается количество случаев как положительной, так и отрицательной слабой корреляции (с 46 до 33%), при этом средний коэффициент корреляции увеличивается с 0.46 до 0.55. Относительное количество случаев сильной отрицательной корреляции составляет около 1% для всех лет независимо от среднегодового уровня солнечной и геомагнитной активности. Таблица 2 демонстрирует, что статистика R для 11 сильных геомагнитных бурь близка к статистике R в годы ВСГА за исключением того, что отсутствуют случаи сильной отрицательной корреляции.

Учитывая результаты предыдущих исследований о соответствии возмущений ТЕС и NmF2 (или foF2) во время геомагнитных бурь [1–5], представляет интерес детальный анализ коэффициентов корреляции dTEC и dNmF2 во время различных фаз геомагнитной бури. Геомагнитная

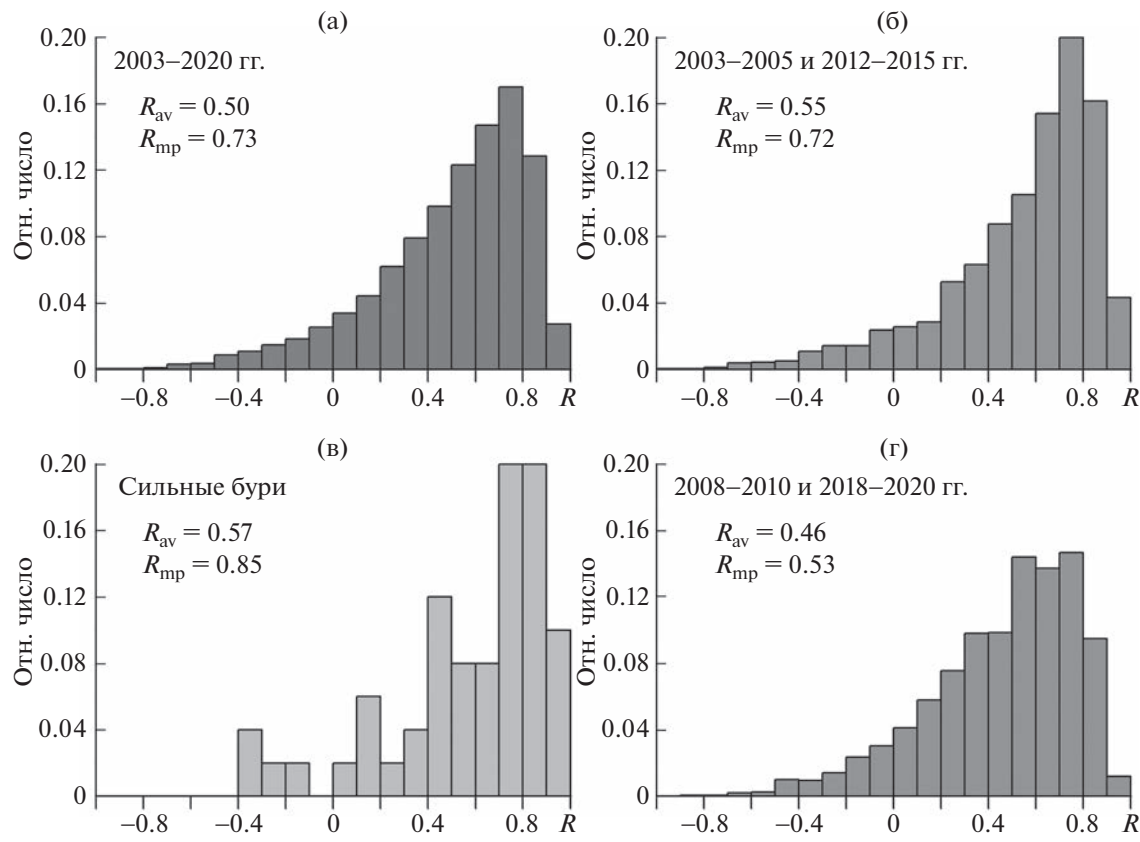


Рис. 1. Гистограммы коэффициентов корреляции R для полного периода 2003–2020 гг. (а), для лет с высоким (б) и низким (г) уровнем солнечной и геомагнитной активности, а также для 11 сильных геомагнитных бурь (в). Указаны средние (R_{av}) и наиболее вероятные (R_{mp}) значения R .

буря представляет собой наиболее сильное проявление геомагнитной активности, во время которого происходят значительные изменения в системе магнитосфера–ионосфера. Характерной особенностью бури является продолжительная (до нескольких суток) депрессия H -компоненты геомагнитного поля, которая проявляется в понижении геомагнитного индекса Dst [7]. Неотъемлемыми элементами всех геомагнитных бурь являются главная фаза и фаза восстановления. Главная фаза проявляется в быстром, длящемся до суток, уменьшении Dst . В конце главной фазы

Dst достигает минимальной величины (Dst_{min}), которая характеризует интенсивность бури. После этого начинается фаза восстановления: медленное, длящееся до нескольких суток, повышение Dst до предбурового уровня или до начала следующей бури.

На рис. 2 показано распределение коэффициентов корреляции R по буревым дням для 11 бурь, приведенных в табл. 1. День 0 соответствует дню минимума Dst (главной фазе бури), дни 1–3 – первым трем дням фазы восстановления. День –1 соответствует предбуровому дню. Во время глав-

Таблица 2. Относительное количество случаев сильной положительной, слабой положительной, слабой отрицательной и сильной отрицательной корреляции

R	Все годы (2003–2020)	Годы ВСГА (2003–2005, 2012–2015)	Годы НСГА (2008–2010, 2018–2020)	Бури
[0.5–1.0]	60%	66%	53%	66%
[0.0–0.5]	31%	26%	37%	26%
[–0.5–0.0]	8%	7%	9%	8%
[–1.0...–0.5]	1%	1%	1%	0

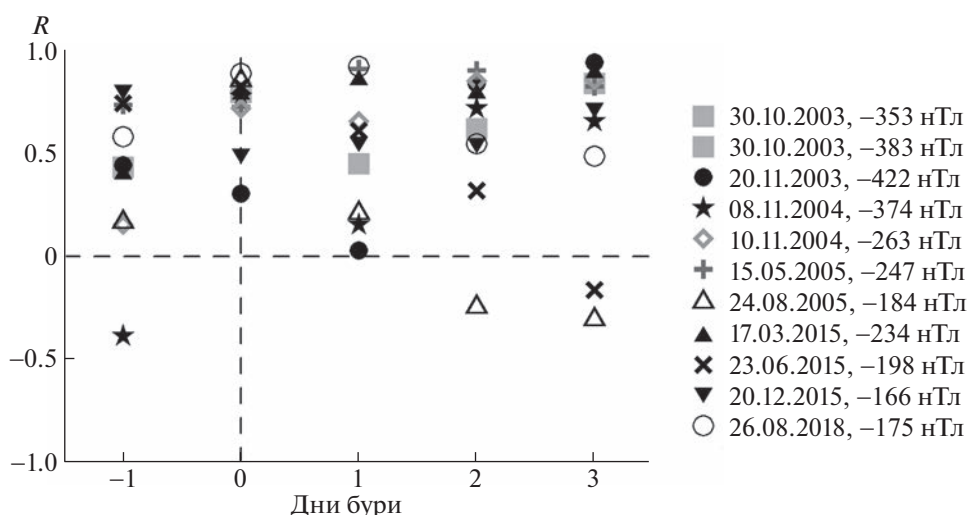


Рис. 2. Распределение коэффициентов корреляции R по буревым дням для 11 сильных геомагнитных бурь. В легенде указаны дни и значения Dst_{min} .

ной фазы (День 0) наблюдается наиболее высокая корреляция: R лежит в пределах 0.72–0.89 за исключением двух бурь 19–23.12.2015 ($R = 0.49$) и 20–24.11.2003 ($R = 0.30$). Буря 19–23.12.2015 имела наименьшую интенсивность ($Dst_{min} = -166$ нТл) из всех рассмотренных бурь. Низкий коэффициент корреляции во время самой сильной ($Dst_{min} = -422$ нТл) бури 20–24.11.2003 может быть связан с большими пропусками данных ионозонда из-за поглощения коротких радиоволн во время бури. В дни фазы восстановления корреляция уменьшается (средние значения R составляют 0.54, 0.59, 0.58 в 1, 2, 3 дни), растет количество случаев слабой корреляции, включая отрицательную корреляцию во 2-й и 3-й день. Для иллюстрации на рис. 3 показаны вариации $dTEC$ и $dNmF2$ и их коэффициенты корреляции во время бури 24–25.08.2005. Видно, что $R = 0.85$ максимален 24.08.2003 на главной фазе бури, далее он уменьшается до $R = 0.21$ в 1-й день и достигает отрицательных значений $R = -0.24$ и $R = -0.30$ во 2-й и 3-й день фазы восстановления.

Рассмотрим возможные физические причины полученных результатов. TEC , измеренное с помощью приемника ГНСС, может быть разделено на ионосферное электронное содержание (IES) и плазмосферное электронное содержание (PES). Можно предположить, что с возмущениями $NmF2$ возмущения IES коррелируют лучше, чем возмущения PES. Согласно результатам [8], относительный вклад PES уменьшается с ростом солнечной активности. Это объясняет обнаруженное нами увеличение количества случаев сильной положительной корреляции $dTEC$ и $dNmF2$ и уменьшение количества случаев их слабой корреляции с ростом солнечной активности.

Противоположные знаки отклика внутренней (ниже $hmF2$) и внешней (выше $hmF2$) ионосферы на геомагнитные бури отмечались в ряде работ [9–11]. На основе численного моделирования в [10] рассмотрены физические механизмы такого поведения на примере геомагнитной бури 26–30.09.2011. Одновременное формирование положительных возмущений $foF2$ ($NmF2$) и отрицательных возмущений TEC объясняется одновременным увеличением отношения концентраций $[O]/[N_2]$ (положительные $dfoF2$ и $dNmF2$) и диффузионным опустошением плазменных трубок (отрицательные $dTEC$). Одновременное формирование отрицательных возмущений $foF2$ ($NmF2$) и положительных возмущений TEC может быть связано с увеличением температуры электронов и нейтралов, что с одной стороны приводит к отрицательным возмущениям $foF2$ ($NmF2$), а с другой – к увеличению шкалы высот внешней ионосферы и положительным возмущениям TEC .

Отметим, что сценарий бури 26–30.09.2011, рассмотренный в [10], согласуется с распределением коэффициентов корреляции по буревым дням (рис. 2): согласованное поведение $dNmF2$ и $dTEC$ на главной фазе и их противоположное поведение на фазе восстановления. Полученные нами высокие коэффициенты корреляции на главной фазе бури хорошо согласуются также с результатами других исследований. В [2] для бурь 29–31.10.2003 и 09–13.11.2004 по данным ионозондов и приемников ГНСС в Иркутском регионе, а также в США установлено, что в день главной фазы в вариациях TEC и $foF2$ проявляются подобные по форме волнообразные колебания, обусловленные прохождением крупномасштабных (периоды 40–60 мин) перемещающихся

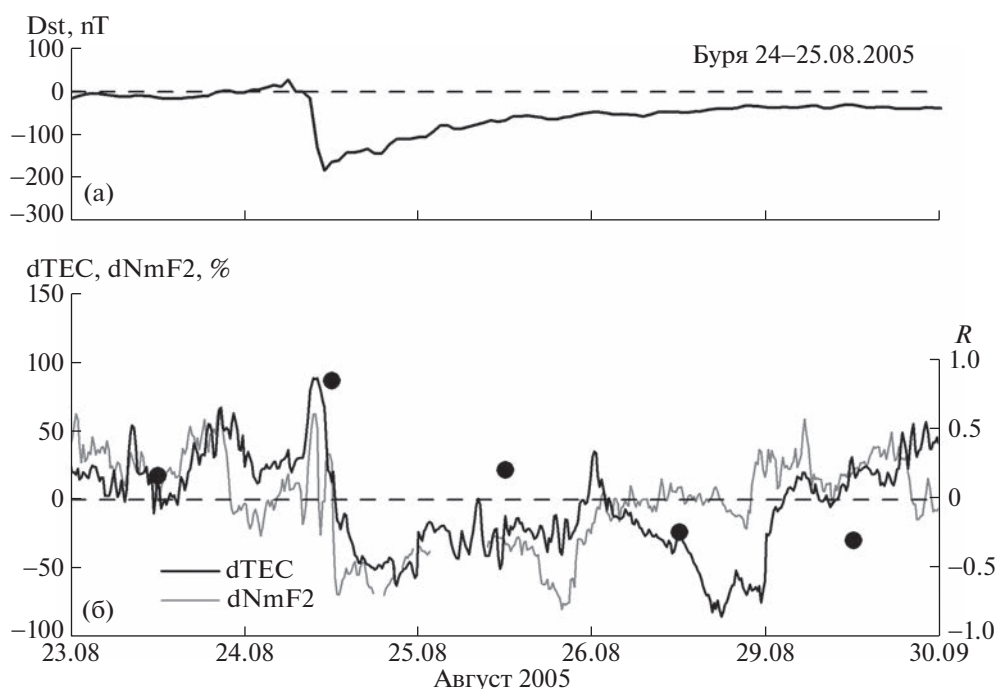


Рис. 3. Поведение индекса Dst (а), вариации dTEC и dNmF2 (б) и коэффициенты корреляции R (б, точки) во время бури 24–25.08.2005. Пунктиром отмечен нулевой уровень.

ионосферных возмущений (КМ ПИВ), вызванных бурей. Аналогичные результаты получены в [1] при сравнении одновременных измерений параметров КМ ПИВ на Иркутском радаре некогерентного рассеяния и приемниках ГНСС в Восточной Сибири для бури 17–18.04.2002. Авторы [4] исследовали отклик ионосферы на геомагнитную бурю 17–21.03.2015 на разных широтах в трех долготных секторах по данным различных геофизических инструментов. Показано, что 17–18 марта поведение ТЕС, полученного наземными приемниками ГНСС, хорошо согласуется с данными наземных ионозондов. Это соответствует высоким ($R = 0.8$ и $R = 0.9$) коэффициентам корреляции dTEC и dNmF2 для 17 и 18 марта 2015 г.

Физические механизмы противоположного поведения dNmF2 и dTEC, рассмотренные в [10], относятся к условиям геомагнитной бури. Вместе с тем распределение коэффициентов корреляции dNmF2 и dTEC (рис. 1, табл. 2) показывает наличие отрицательной корреляции в годы НСГА, когда вклад геомагнитных бурь в общую статистику незначителен. Возникает вопрос: каковы физические механизмы противоположного поведения dNmF2 и dTEC в спокойных геомагнитных условиях? Ответ на этот вопрос является предметом дальнейших исследований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На большом объеме экспериментальных данных за 2003–2020 гг. проведен анализ корреляции

короткопериодных (периоды меньше 24 ч) волновых возмущений NmF2 и ТЕС. Для анализа использовались данные измерений ионозонда вертикального зондирования DPS-4 и ГНСС-станции IRKJ, расположенных в Иркутске.

Установлено, что наиболее вероятной ситуацией является высокая положительная корреляция ($0.5 < R \leq 1.0$). С ростом солнечной и геомагнитной активности растет количество случаев сильной положительной корреляции (с 53 до 66%) и уменьшается количество случаев положительной и отрицательной слабой корреляции (с 46 до 33%). С учетом предыдущих исследований эта закономерность может быть объяснена уменьшением вклада плазмосферного электронного содержания в ТЕС с ростом солнечной активности.

Во время сильных геомагнитных бурь наиболее высокая корреляция (до $R = 0.89$) наблюдается на главной фазе и далее уменьшается на фазе восстановления вплоть до отрицательных значений R . Эта закономерность согласуется с результатами других авторов.

Для объяснения полученных результатов рассмотрены физические механизмы отрицательной корреляции возмущений NmF2 и ТЕС в условиях геомагнитной бури, установленные в предыдущих исследованиях. Выявление физических механизмов отрицательной корреляции возмущений NmF2 и ТЕС в спокойных геомагнитных условиях является предметом дальнейших исследований.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00146, <https://rscf.ru/project/22-17-00146/>. Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования “Ангара” <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>, полученные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л., Башкуев Ю.Б., Бернгардт О.И., Гацуцев А.В., Дембелов М.Г., Шнынев Б.Г., Кобзарь В.А., Кушнарев Д.С., Мусин В.Ю., Пушкин П.Ю., Перевалова Н.П. Детектирование перемещающихся ионосферных возмущений по данным одновременных измерений электронной концентрации, полного электронного содержания и доплеровского смещения частоты на радиофизическом комплексе ИСЗФ // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44. № 4. С. 463–475.
2. Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Перевалова Н.П., Ратовский К.Г. Крупномасштабные возмущения аврорального происхождения во время магнитных бурь 29–31 октября 2003 г. и 7–11 ноября 2004 г. по данным сети GPS и ионозондов // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46. № 5. С. 637–642.
3. Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. 2013. V. 52. № 3. P. 343–366.
4. Astafyeva E., Zakharenkova I., Forster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. P. 9023–9037.
5. Ngwira C.M., McKinnell L.-A., Cilliers P.J., Coster A.J. Ionospheric observations during the geomagnetic storm events on 24–27 July 2004: Long-duration positive storm effects // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A00L02.
6. Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Results in Phys. 2015. V. 5. P. 32–33.
7. Жеребцов Г.А., Shi Jiankui, Перевалова Н.П., Полевых Н.М., Золотухина Н.А. Ионосферные возмущения в Восточно-Азиатском регионе. М.: ГЕОС, 2021. 338 с.
8. Liu L., Yao Y., Kong J., Shan L. Plasmaspheric electron content inferred from residuals between GNSS-derived and TOPEX/JASON vertical TEC data // Remote Sensing. 2018. V. 10. № 4. 621.
9. Lei J., Zhu Q., Wang W., Burns A.G., Zhao B., Luan X., Zhong J., Dou X. Response of the topside and bottomside ionosphere at low and middle latitudes to the October 2003 superstorms // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 6974–6986.
10. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Zakharenkova I.E., Ratovsky K.G., Korenkova N.A., Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Cherniak Iu.V. Similarity and differences in morphology and mechanisms of the foF2 and TEC disturbances during the geomagnetic storms on 26–30 September 2011 // Ann. Geophys. 2017. V. 35. P. 923–938.
11. Klimenko M.V., Klimenko V.V., Despirak I.V., Zakharenkova I.E., Kozelov B.V., Cherniak S.M., Andreeva E.S., Tereshchenko E.D., Vesnin A.M., Korenkova N.A., Gomonov A.D., Vasiliev E.B., Ratovsky K.G. Disturbances of the thermosphere-ionosphereplasmasphere system and auroral electrojet at 30E longitude during the St. Patrick's Day geomagnetic storm on 17–23 March 2015 // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2018. V. 180. P. 78–92.

THE CORRELATION OF SHORT-PERIOD WAVE DISTURBANCES IN THE PEAK ELECTRON DENSITY OF THE F2 LAYER AND THE TOTAL ELECTRON CONTENT (TEC) IN THE IONOSPHERE

N. P. Perevalova^{a, #}, K. G. Ratovsky^a, Academician of the RAS G. A. Zherebtsov^a, and A. S. Yasyukevich^a

^aInstitute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

[#]E-mail: pereval@iszf.irk.ru

Using data of the vertical sounding ionosonde and the GNSS receiver operating in Irkutsk, we analyzed the correlation of short-period (periods less than 24 hours) wave disturbances of the peak electron density of the F2 layer (NmF2) and the total electron content (TEC) in the ionosphere. The measurement data for the period 2003–2020, which included almost two solar cycles, were processed. It has been established that the most probable case is a high positive correlation of short-period disturbances of NmF2 and TEC. With the growth of solar and geomagnetic activity, the number of cases of strong positive correlation increases (from 53% to 66%) and the number of cases of both positive and negative weak correlation decreases (from 46% to 33%). During powerful geomagnetic storms, the highest correlation (up to $R = 0.89$) is observed in the storm main phase and then decreases in the recovery phase up to negative R values. Possible physical mechanisms of the obtained results are considered.

Keywords: ionosphere, ionospheric disturbances, ionosonde, GNSS, NmF2, TEC