

Отрицательная корреляция возмущений максимальной электронной концентрации в слое F2 ионосферы и полного электронного содержания: морфологический анализ

Н.П. Перевалова, К.Г. Ратовский, Г.А. Жеребцов, А.С. Ясюкевич, И.В. Медведева

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А.
E-mail: pereval@iszf.irk.ru*

По данным действующих в Иркутске ионозонда DPS-4 и ГНСС-станции IRKJ, полученных в 2003-2020 гг., выполнен морфологический анализ случаев высокой ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) отрицательной корреляции возмущений максимума электронной концентрации $dNmF2$ и полного электронного содержания $dTEC$. Показано, что сильная отрицательная корреляция $dNmF2$ и $dTEC$ является редким событием, наблюдающимся в $\sim 1\%$ случаев. Сильная отрицательная корреляция может проявляться в виде положительных возмущений $dNmF2$ при отрицательных возмущениях $dTEC$ или положительных возмущений $dTEC$ при отрицательных возмущениях $dNmF2$. Явление регистрируется, главным образом, летом в ночные или утренние часы местного времени в спокойных геомагнитных условиях. При возрастании солнечной и геомагнитной активности количество событий высокой отрицательной корреляции уменьшается.

Ключевые слова: ионосферные возмущения, корреляция, ионозонды, ГНСС, $NmF2$, ПЭС

Negative correlation of disturbances in the peak electron density of the ionospheric F2 layer and the total electron content: a morphological analysis

N.P. Perevalova, K.G. Ratovsky, G.A. Zherebtsov, A.S. Yasyukevich, I.V. Medvedeva

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

Using data from the DPS-4 ionosonde and the IRKJ GNSS station in Irkutsk from 2003 to 2020, we performed a morphological analysis of cases with a strong ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) negative correlation of disturbances in the peak electron density ($dNmF2$) and in the total electron content ($dTEC$). It has been shown that strong negative correlation between $dNmF2$ and $dTEC$ is a rare event observed in approximately 1% of cases. A strong negative correlation may manifest itself in the form of positive disturbances in $dNmF2$ with negative disturbances in $dTEC$ or positive disturbances in $dTEC$ with negative disturbances in $dNmF2$. This phenomenon is recorded mainly in summer at night or in the morning hours of local time in calm geomagnetic conditions. As solar and geomagnetic activity increases, the number of strong negative correlation events decreases.

Keywords: ionospheric disturbances, correlation, ionosondes, GNSS, $NmF2$, TEC

Введение

Изучение, мониторинг и прогнозирование поведения ионосферы - слоя тепловой плазмы в верхней атмосфере Земли - имеют важное значение для исследований околоземного космического пространства, эффективной работы средств связи и навигации, проектирования космической техники. Старейшим и одним из основных инструментов исследования структуры и динамики ионосферы является ионозонд вертикального зондирования. В разное время мировая сеть насчитывала 100-150 ионозондов. На основе измерений ионозонда рассчитываются наиболее важные параметры, характеризующие состояние ионосферы: высота максимума $hmF2$ и концентрация электронов $NmF2$ в максимуме ионосферного слоя F2 - главного

максимума ионизации. В два последние десятилетия для мониторинга ионосферы активно используются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), такие как GPS и ГЛОНАСС [1,2]. 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 пространственное (до 20 км в некоторых регионах) разрешение. По навигационным измерениям приемника ГНСС рассчитывается полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC) в ионосфере, которое представляет собой количество электронов в столбе единичного сечения вдоль луча "приемник ГНСС - спутник ГНСС". Полагают, как правило, что основной вклад в TEC вносит диапазон высот вокруг высоты h_mF2 максимума слоя F2. При исследовании ионосферы с помощью ГНСС важным является вопрос о соответствии параметров возмущений TEC характеристикам возмущений NmF2. Вопрос о корреляции этих параметров имеет также важное прикладное значение: наличие устойчивой корреляции позволило бы прогнозировать NmF2 по измерениям приемников ГНСС в регионах, где измерения ионозондом недоступны. Исследования, проводившиеся во время отдельных геомагнитных бурь, установили, что структура крупномасштабных возмущений TEC соответствует структуре возмущений электронной концентрации в максимуме слоя F2 [2-5].

В работах [6-8] проведен анализ коэффициентов корреляции возмущений NmF2 и TEC в двух временных периодах: межсуточные и внутрисуточные вариации. Межсуточные вариации соответствуют длиннопериодным волновым возмущениям в диапазоне планетарных волн (периоды $T > 24$ ч). При исследовании межсуточных вариаций отдельно анализировались дневные и ночные возмущения. К внутрисуточным вариациям относятся короткопериодные возмущения в диапазоне внутренних гравитационных волн (периоды $T < 8$ ч) и термических приливов (периоды от 8 до 24 ч). Анализ выполнен на основе данных ионозонда вертикального зондирования и приемника ГНСС, расположенных в Иркутске. Обработаны данные измерений за период 2003-2020 гг., включивший почти два солнечных цикла. Показано, что наибольшую коррелированность проявляют длиннопериодные возмущения NmF2 и TEC в дневное время (коэффициент корреляции $R \sim 0.8-0.9$). Для ночных длиннопериодных возмущений коэффициенты корреляции заметно ниже ($R \sim 0.5-0.7$). Высокая корреляция длиннопериодных возмущений наблюдается при высокой солнечной активности (в максимуме и на спаде солнечного цикла); зимой регистрируется наиболее высокая корреляция, а летом – наиболее низкая [6,7]. Коэффициент корреляции короткопериодных возмущений характеризуется широким разбросом значений, его наиболее вероятное значение довольно велико (~ 0.7), но встречаются случаи отрицательной корреляции, что указывает на возможность заметной разницы в поведении возмущений NmF2 и TEC [7,8]. Наиболее вероятной ситуацией является высокая положительная корреляция ($0.5 < R \leq 1.0$) короткопериодных возмущений NmF2 и TEC. С ростом солнечной и геомагнитной активности растет количество случаев сильной положительной корреляции и уменьшается количество случаев положительной и отрицательной слабой корреляции [8]. Количество случаев сильной отрицательной ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) корреляции короткопериодных возмущений NmF2 и TEC составляет около 1% для всего периода 2003-2020 гг.; случаи сильной отрицательной корреляции не наблюдаются во время сильных геомагнитных бурь (при индексе $Dst < 150$ нТл) [8]. Настоящее исследование посвящено морфологическому анализу случаев высокой отрицательной корреляции NmF2 и TEC, зарегистрированных в 2003-2020 гг.

Данные и методы анализа

Исследование выполнено на основе данных Иркутского ионозонда вертикального зондирования DPS-4 ИСЗФ СО РАН и функционирующей в Иркутске ГНСС-станции IRKJ международной сети IGS, полученных в 2003-2020 гг. Значения NmF2 вычислялись по критической частоте foF2 слоя F2, измеряемой на ионозонде DPS-4 с 15-минутным временным разрешением. Значения абсолютного вертикального TEC рассчитывались по двухчастотным фазовым измерениям приемника IRKJ с временным разрешением 15 мин по методике, предложенной в [9]. Обработка данных NmF2 и TEC выполнялась по единому алгоритму. Чтобы выделить возмущения, рассчитывались относительные отклонения указанных параметров от скользящей 27-дневной медианы (NmF2₂₇ и TEC₂₇ для NmF2 и TEC соответственно): $dNmF2 = 100\% \cdot (NmF2 - NmF2_{27}) / NmF2_{27}$ и $dTEC = 100\% \cdot (TEC - TEC_{27}) / TEC_{27}$. С целью количественной оценки связи между dNmF2 и dTEC для каждого суток рассчитывался линейный коэффициент корреляции R.

На рис. 1 показана гистограмма распределения коэффициентов корреляции R короткопериодных возмущений dNmF2 и dTEC для периода 2003-2020 гг. Пунктирными вертикальными линиями разделены случаи 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. Как видно из рис. 1 и в соответствии с результатами [8], высокая положительная корреляция dNmF2 и dTEC является преобладающей (около 60% случаев); количество случаев сильной отрицательной корреляции составляет около 1%.

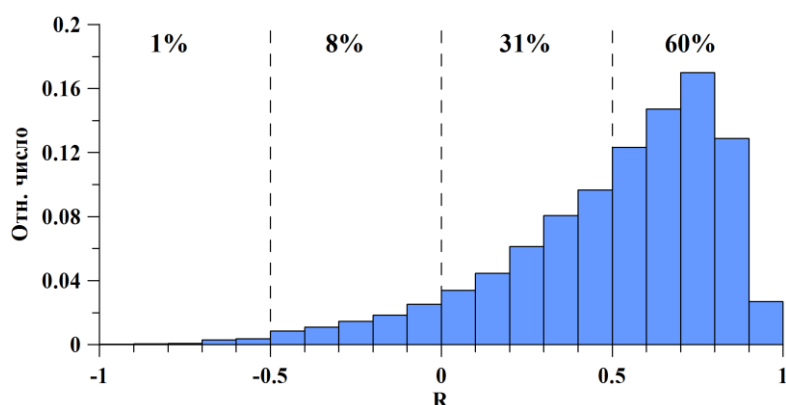


Рис. 1. Гистограмма коэффициентов корреляции R короткопериодных возмущений dNmF2 и dTEC для периода 2003-2020 гг. Указано относительное (в %) количество случаев сильной положительной ($0.5 < R \leq 1.0$), слабой положительной ($0.0 < R \leq 0.5$), слабой отрицательной ($-0.5 < R \leq 0.0$) и сильной отрицательной ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) корреляции

Для морфологического анализа случаев высокой отрицательной корреляции dNmF2 и dTEC из массива коэффициентов корреляции R были выбраны дни с высокой ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) отрицательной корреляцией dNmF2 и dTEC. Из рассмотрения исключались случаи, когда ввиду отсутствия данных NmF2 или TEC высокая отрицательная корреляция наблюдалась на коротком (менее 6 ч) промежутке времени. Всего выявлено 46 событий с высокой отрицательной корреляцией. Для характеристики уровня солнечной и геомагнитной активности использовались минимальное за сутки значение геомагнитного индекса Dst (<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>) и среднегодовое значение индекса солнечной активности F10.7 (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

Результаты и обсуждение

Анализ выбранных событий высокой отрицательной корреляции dNmF2 и dTEC выявил следующее. Случаи высокой отрицательной корреляции наблюдаются в основном с мая по сентябрь. Исключения составили четыре дня: 23.03.2003, 28.10.2012, 27.02.2014, 25.03.2020.

Высокая отрицательная корреляция не регистрируется при сильных возмущениях геомагнитного поля ($Dst < -110$ нТл). Зарегистрировано всего два таких события при Dst вблизи -100 нТл: 27.02.2014 ($Dst = -97$ нТл) и 28.08.2015 ($Dst = -102$ нТл). Статистика регистрации высокой отрицательной корреляции в зависимости от уровня геомагнитной активности выглядит следующим образом: в спокойных условиях ($Dst > -30$ нТл) зарегистрировано 35 событий из 46 (76.1%); в условиях слабых бурь ($Dst = -30 \div -49$ нТл) наблюдалось 6 событий (13.0%); в условиях умеренных бурь ($Dst = -50 \div -99$ нТл) – 3 события (6.5%); в условиях сильных бурь ($Dst < -100$ нТл) – 2 события (4.4%). Можно сделать вывод, что высокая отрицательная корреляция dNmF2 и dTEC наблюдается, главным образом, в спокойных геомагнитных условиях и практически не регистрируется во время умеренных и сильных геомагнитных бурь. Связь с солнечной активностью выражена не столь ярко. В условиях высокой солнечной активности ($F10.7 \geq 120$ с.е.п.) наблюдалось 9 событий из 46 (19.6%). При среднем уровне солнечной активности ($80 \text{ с.е.п.} < F10.7 < 120 \text{ с.е.п.}$) зарегистрировано 16 событий (34.8%). При низкой солнечной активности ($F10.7 \leq 80$ с.е.п.) зафиксировано 21 событие (45.6%). В целом же можно отметить, что при возрастании как солнечной, так и геомагнитной активности количество событий высокой отрицательной корреляции уменьшается.

Рис. 2 демонстрирует примеры поведения dNmF2 и dTEC в дни с высокой отрицательной корреляцией. Высокая отрицательная корреляция регистрируется при различных комбинациях положительных и отрицательных возмущений dNmF2 и dTEC: положительные возмущения dNmF2 при отрицательных возмущениях dTEC (рис. 2а) наблюдались в 25 случаях из 46 (54.4%); положительные возмущения dTEC при отрицательных возмущениях dNmF2 (рис. 2б) зарегистрированы в 18 случаях (39.1%); как положительные, так и отрицательные возмущения dNmF2 и dTEC разного знака (рис. 2в) наблюдались в 3 случаях из 46 (6.5%). Независимо от уровня солнечной активности, наличия слабых и умеренных геомагнитных бурь наиболее сильные расхождения в поведении dNmF2 и dTEC регистрируются чаще всего в вечерние-ночные (22-07 LT) и утренние (07-10 LT) часы местного времени LT (рис. 2). Только в течение шести дней (15.07.2004, 16.08.2005, 01.07.2007, 04.07.2007, 09.07.2008, 13.06.2009) заметное расхождение наблюдалось также в дневные часы (10-16 LT).

Причины отрицательной корреляции возмущений dNmF2 и dTEC во время геомагнитных бурь рассматривались в работах [10,11]. На основе численного моделирования для геомагнитной бури 26-30.09.2011 было показано [11], что одновременное формирование положительных возмущений критической частоты foF2 (т.е. положительных возмущений 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 образование отрицательных возмущений foF2 (NmF2) и положительных возмущений TEC может быть вызвано увеличением температуры электронов и нейтральных атомов: с одной стороны это приводит к отрицательным возмущениям foF2 (NmF2), а с другой – к увеличению шкалы высот внешней ионосферы и положительным возмущениям TEC.

Однако, выполненный нами морфологический анализ показал, что высокая отрицательная корреляция возмущений dNmF2 и dTEC наблюдается преимущественно, в спокойных геомагнитных условиях и при низком уровне солнечной активности.

Можно предположить, что в спокойных условиях причиной высокой отрицательной корреляции dNmF2 и dTEC является одновременное возрастание NmF2 и убывание толщины слоя (шкалы высот) либо одновременное убывание NmF2 и возрастание толщины слоя (шкалы высот).

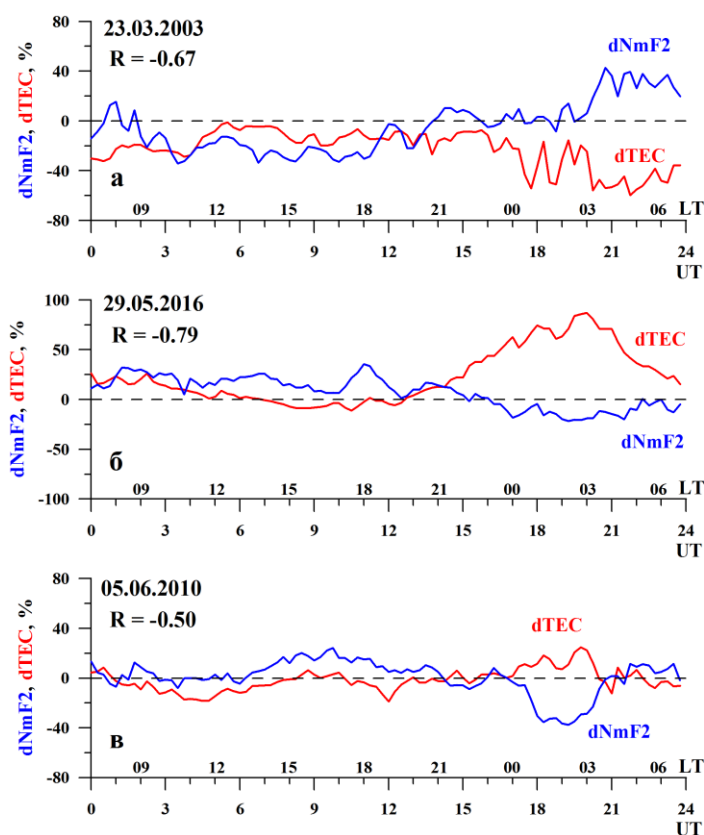


Рис. 2. Примеры вариаций dNmF2 и dTEC в дни с высокой отрицательной корреляцией: 23.03.2003 (а), 29.05.2016 (б), 05.06.2010 (в). Указан суточный коэффициент корреляции R в этот день. Пунктирной линией отмечен нулевой уровень dNmF2 и dTEC. Внизу приведена шкала местного времени LT для Иркутска

Выводы

На основе данных Иркутского ионозонда вертикального зондирования DPS-4 и действующей в Иркутске ГНСС-станции IRKJ, полученных в 2003–2020 гг., выполнен морфологический анализ случаев высокой ($-1.0 \leq R \leq -0.5$) отрицательной корреляции возмущений максимума электронной концентрации dNmF2 и полного электронного содержания dTEC. Показано, что сильная отрицательная корреляция dNmF2 и dTEC является редким событием, составляющим около 1% от всех рассмотренных случаев. Эффект сильной отрицательной корреляции имеет хорошо выраженную суточную и сезонную зависимость: он наблюдается, главным образом, летом в ночные или утренние часы местного времени. Сильная отрицательная корреляция dNmF2 и dTEC регистрируется, как правило, в спокойных геомагнитных условиях (76.1%), практически не наблюдается во время умеренных и сильных геомагнитных бурь (6.5% и 4.4% соответственно). Связь с солнечной активностью менее выражена. Но в целом, при возрастании солнечной и геомагнитной активности количество событий высокой отрицательной корреляции уменьшается. Сильная отрицательная корреляция может проявляться в виде положительных возмущений dNmF2 при отрицательных возмущениях dTEC или положительных возмущений dTEC при отрицательных возмущениях dNmF2.

Возможной причиной сильной отрицательной корреляции dNmF2 и dTEC в спокойных гелио-геомагнитных условиях является одновременное возрастание NmF2 и убывание толщины слоя либо одновременное убывание NmF2 и возрастание толщины слоя. Однако, вопрос о механизмах противоположного поведения dNmF2 и dTEC в спокойных условиях пока остается открытым и требует дальнейших исследований.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-00187, <https://rscf.ru/project/25-17-00187/>. Для анализа использовались экспериментальные данные Центра коллективного пользования "Ангара" <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>.

Литература

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS - Global Navigation Satellite Systems – Vienna: Springer, 2008. 546 p.
2. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли – Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
3. 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.
4. Danilov A.D. Ionospheric F-region response to geomagnetic disturbances // Adv. Space Res. 2013. V. 52. N 3. P. 343-366.
5. 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.
6. Perevalova N.P., Ratovsky K.G., Yasyukevich A.S. Correlation relations of long-wave disturbances in the upper atmosphere // Proc. SPIE. 2023. V. 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. art. No 1278074. P. 1278074-1 - 1278074-4.
7. Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Ясюкевич А.С. Оценка связи волновых возмущений максимальной электронной концентрации в слое F2 и полного электронного содержания в ионосфере // Распространение радиоволн: сборник докладов XXVIII Всероссийской открытой научной конференции (Йошкар-Ола, 16–19 мая 2023 года). Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. 2023. С. 172-175.
8. Перевалова Н.П., Ратовский К.Г., Жеребцов Г.А., Ясюкевич А.С. Корреляция короткопериодных волновых возмущений максимальной электронной концентрации в слое F2 и полного электронного содержания в ионосфере // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 513. № 1. С. 120-125.
9. 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.
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., Cherniakov 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-ionosphere-plasmasphere 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.