

УДК 551.510.535:521.81

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОТНОГО ИОНОСФЕРНОГО ОТКЛИКА НА КОЛЬЦЕВОЕ СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 21 ИЮНЯ 2020 ГОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

© 2023 г. Девбрат Пундхир^a, *, Бирбал Сингх^b, **, Раджпал Сингх^c, ***

^aЛаборатория сейсмoeлектромагнитных и космических исследований (SESRL), факультет физики,
Инженерно-технический кампус им. Раджа Балвант Сингха, Бичпури, Агра, 283105 Индия

^bЛаборатория сейсмoeлектромагнитных и космических исследований (SESRL), факультет электроники и связи,
инженерно-технический кампус им. Раджа Балвант Сингха, Бичпури, Агра, 283105 Индия

^cКафедра физики, Университет GLA, Матхура, 281406 Индия

*e-mail: devbratpundhir@gmail.com

**e-mail: rp.singh@gla.ac.in

***e-mail: bbsagra@gmail.com

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 24.07.2022 г.

Принята к публикации 11.08.2022 г.

Ионосфера — это очень сложная и изменчивая часть атмосферы, находящаяся под воздействием солнечной активности. Солнечное затмение является одним из явлений, которое оказывает большое влияние на ионосферу. В данном исследовании мы проанализировали данные по общему содержанию электронов (ОСЭ) за период времени 07–21 июня 2020 года на 11-ти станциях IGS-TEC (включая одну GPS станцию Агра), в том числе-соответствующие солнечному затмению 21 июня 2020 года. Вариации ОСЭ относительно средних значений ОСЭ показали более низкие значения в день затмения по сравнению с другими днями, за исключением некоторых станций, таких как Агра ($\approx 2 \text{ TECU}^1$), BHR4 ($\approx 1 \text{ TECU}$), IISC ($\approx 0.5 \text{ TECU}$), которые показали повышенные вариации ОСЭ. Эти данные анализировались с помощью методов вейвлет-преобразования, таких как непрерывное вейвлет-преобразование (CWTs) и вейвлет-разложение на среднее значение, сумму и произведение данных ОСЭ по 11 станциям за период с 9:30 утра до 3:30 вечера в день затмения. Полученные результаты очень хорошо согласуются с нашими статистическими данными и наилучшим образом характеризуют вариации ОСЭ во время солнечного затмения. Вейвлет-разложение вариаций ОСЭ показало, что они подвержены глобальному влиянию солнечного затмения. Эти вариации интерпретируются с точки зрения механизмов их возникновения, имеющих в литературе.

Ключевые слова: солнечное затмение, ионосфера, GPS, IGS, ОСЭ, вэйвлет–преобразование

DOI: 10.31857/S0002351523010108, **EDN:** GDRNYC

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера — это сложная и очень изменчивая область атмосферы, на которую влияет даже незначительное изменение любого из ее параметров (Pundhir et al., 2017). Солнечное затмение является одним из важных солнечно-земных событий, которое напрямую воздействует на ионосферу Земли, в результате чего может нарушаться система радиосвязи (Paul et al., 2011; Vyas and Sunda, 2012). Солнечное затмение происходит, когда Луна находится между Солнцем и Землей, блокируя солнечное излучение и формируя тень на поверхности земли. Влияние солнечного затмения мо-

жет наблюдаться в ионосфере на разных географических широтах и долготах, и проявляться в геомагнитной активности, в периодах солнечной активности и т.д. (Le et al., 2009; Dang et al., 2018).

Первый отчет об ионосферном исследовании солнечного затмения был представлен в начале 20-го века (Burton and Boardman, 1933). Позже, многочисленные исследователи изучали ионосферный отклик солнечного затмения с помощью GPS и спутниковых измерений (Ledig et al., 1946; Munro, and Heisler, 1958; Jakowski et al., 2008; Ding et al., 2010; Haridas and Manju, 2012; Huba, and Drob, 2017; Stankov et al., 2017; Cherniak and Zakharenkova, 2018; Dear et al., 2020; Nelli et al., 2020). Эти исследования указывали на уменьшение электронной концентрации при солнечном

¹ Примечание ред. : TECU -единица измерения ОСЭ, равная 10^{16} электронов/ м^2 .

затмении, что происходило, возможно, из-за резкого уменьшения потока ультрафиолетовой солнечной радиации. Кроме того, было исследовано влияние кольцевого солнечного затмения 26 декабря 2019 года на метеорологические параметры и температуру поверхности земли и обнаружено значительное влияние затмения на юго-восточную часть Аравийского полуострова (Nelli et al., 2020).

Исследователи также изучали реакцию ионосферы на солнечное затмение, используя различные методы численного моделирования (Boitman et al., 1999; Le et al., 2008; Huba, and Drob, 2017). Для анализа ионосферных данных общего содержания электронов (ОСЭ) использовались разные методы, с помощью которых были получены важные результаты (Le et al., 2009; Stankov et al., 2017; Cherniak and Zakharenkova, 2018; Dear et al., 2020; Nelli et al., 2020). Недавно было сообщено о влиянии солнечного затмения 21 июня 2020 года на вариации ОСЭ в ионосфере. Используя плотную сеть приемников глобальной навигационной спутниковой системы на ~2000 площадок в Северной Америке, Чжан и др. (2017) исследовали влияние солнечного затмения 21 августа 2017 г. на генерацию ионосферных “носовых” волн, подобных по форме корабельным волнам, исходящих от носовой части корабля. Они обнаружили крупномасштабные ионосферные возмущения, вызванные полным солнечным затмением и движущиеся со сверхзвуковой скоростью. Эти возмущения распространялись слишком быстро по сравнению с известными внутренними гравитационными волнами или другими крупномасштабными процессами в атмосфере.

В работе (Srigutomo et al., 2019) исследовалось влияние полного солнечного затмения 9 марта 2016 года в регионе Юго-Восточной Азии и Тихого океана на значения ОСЭ, зарегистрированные на 40 низкоширотных GPS-станциях в Индонезии. Было обнаружено снижение этих значений, прямо пропорциональное величине затемнения при солнечном затмении. Совсем недавно Дир и др. (2020) исследовали ионосферные эффекты того же затмения 9 марта 2016 года, используя данные о значениях ОСЭ и критической частоты foF2 ионосферного F2 слоя. Они обнаружили значительное уменьшение этих значений. Однако, строгое исследование влияния солнечного затмения на ионосферу на основе данных сразу нескольких станций и статистического анализа этих данных еще не проводилось.

В данной работе впервые проведен анализ данных по ОСЭ на 11-ти станциях IGS, включая GPS станцию Agra, соответствующих кольцевому солнечному затмению 21 июня 2020 г. за период 07–21 июня 2020 года. При этом использовались хорошо известные статистические методы, а также вейвлет-методы, такие как вейвлет-преобразова-

ние, вейвлет-разложение сигнала и т.д., чтобы выделить нелинейные особенности данных ОСЭ, которые характеризуют их влияние на широтную изменчивость ионосферы. Это солнечное затмение было впервые замечено в Конго в Африке и прошло через Южный Судан, Эфиопию, Йемен, Оман, Саудовскую Аравию, Индийский океан и Пакистан, после чего вошло в Индию над Раджастаном, а затем переместилось в Тибет, Китай, Тайвань, после чего закончилось в середине Тихого океана. Для изучения влияния этого солнечного затмения, станции ОСЭ были выбраны таким образом, чтобы большинство из них лежали на траектории движения затмения. Также были исследованы параметры солнечной активности (F10.7 см и число солнечных пятен) и геомагнитной активности (ΣKp и Dst индексы), затемнение при солнечном затмении и его величина.

Это отрывок статьи “Statistical and wavelet transform-based study of the latitudinal ionospheric response to an annular solar eclipse on 21 June 2020”, полный текст которой опубликован в “Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics”, 2022, Vol 58. No 6. P. 625–634. DOI: 10.1134/S0001433822060196.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adeniyi J.O., Radicella S.M., Adimula I.A., Willoughby A.A., Oladipo O.A., and Olawepo O. Signature of the 29 March 2006 eclipse on the ionosphere over an equatorial station, *J. of Geophys. Res.*, 2007, V. 112.
- Appleton E.V. Two Anomalies in the Ionosphere. *Nature*, 1946, V. 157. P. 691–691.
<https://doi.org/10.1038/157691a0>
- Boitman O.N., Kalikhman A.D., and Tashchilin A.V. The mid-latitude ionosphere during the total solar eclipse of March 9, 1997, *J. Geophys. Res.*, 1999, V. 104. P. 28197–28206.
- Burton E.T., and Boardman E.M. Effects of Solar Eclipse on Audio Frequency Atmospherics, *Nature*, 1933, V. 131. № 3299. P. 81–82.
<https://doi.org/10.1038/131081a0>
- Chen A.-H., Yu S.-B., Xu J.-S. Ionospheric response to a total solar eclipse deduced by the GPS Beacon observations, *Wuhan University J. Nat. Sci.*, 1999, V. 4. № 4. P. 439–444.
- Cherniak I., and Zakharenkova I. Ionospheric Total Electron Content Response to the Great American Solar Eclipse of 21 August 2017, *Geophys. Res. Lett.*, 2018, V. 45, P. 1199–1208.
- Chimonas G., and Hines C.O. Atmospheric gravity waves induced by a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.*, 1970. V. 75. P. 857–875.
- Coster A.J., Goncharenko L., Zhang S., Erickson P.J., Rideout W., & Vierinen J., GNSS observations of ionospheric variations during the 21 August 2017 solar eclipse. *Geophys. Res. Lett.*, 2017, V. 17. P. 349–352.
- Chu Y.H., Brahmanandam P.S. Wang C.Y. and Su C.L. Coordinated observations of sporadic E using Chung-Li 30 MHz radar, ionosonde and FORMOSAT 3/COSMIC satellites. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2010, V. 73. P. 883–894.

- Dang T., Le J., Wang W., Zhang B., Burns A., Le H., Wu Q., Ruan H., Dou X., and Wan W. Global Responses of the Coupled Thermosphere and Ionosphere System to the August 2017 Great American Solar Eclipse, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2018, V. 123, № 8, P. 7040–7050.
- Dang T., Lei J.H., Wang W.B., Yan M.D., Ren D.X., and Huang F.Q., Prediction of the thermospheric and ionospheric responses to the 21 June 2020 annular solar eclipse, *Earth and Planetary Physics*, 2020, V. 4, P. 231–237.
- Davis M.J., and Da Rosa A.V. Possible Detection of Atmospheric Gravity Waves generated by the Solar Eclipse, *Nature*, 1970, V. 226, P. 1123.
- Dear V., Husin A., Anggarani S., Harjosuwito J., and Pradipta R. Ionospheric effects during the total solar eclipse over Southeast Asia-Pacific on 9 March 2016: Part 1. Vertical movement of plasma layer and reduction in electron plasma density, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2020, V. 125.
- Ding F., Wan W., Ning B., Liu L., Le H., Xu G., Wang M., Li G., Chen Y., Ren Z., Xiong B., Hu L., Yue X., Zhao B., Li F., and Yang M., GPS TEC response to the 22 July 2009 total solar eclipse in East Asia, *J. Geophys. Res.*, 2010, V. 115, P. 1–8.
- Fritts D.C., and Luo Z. Gravity wave forcing in the middle atmosphere due to reduced ozone heating during a solar eclipse, *J. Geophys. Res.*, 1993, V. 98, P. 3011–3021.
- Grossman A., and Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM J. Math. Anal.*, 1984, V. 15, № 4, P. 726–736.
- Haridas M.K.M., and Manju G. On the response of the ionospheric F region over Indian low-latitude station Gadanki to the annular solar eclipse of 15 January 2010, *J. Geophys. Res.*, 2012, V. 117, A01302, P. 1–7. <https://doi.org/10.1029/2011JA016695>
- He L., Wu L., Pulnits S., Liu S., and Yang F. A nonlinear background removal method for seismo-ionospheric anomaly analysis under a complex solar activity scenario: A case study of the M9.0 Tohoku earthquake, *Adv. Space Res.*, 2012, V. 50, P. 211–220.
- Hilton M.L. 1997. Wavelet and wavelet packet compression of electrocardiograms, *IEEE T. Bio-Med Eng.* 44(5), 394–402.
- Huba J.D., and Drob D. SAMI3 prediction of the impact of the 21 August 2017 total solar eclipse on the ionosphere/plasmasphere system, *Geophys. Res. Lett.*, 2017, V. 44, P. 5928–5935.
- Jakowski N., Stankov S.M., Wilken V., Borries C., Altadill D., Chum J., Buresova D., Boska J., Sauli P., Hruska F., and Cander Lj R., Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2008, V. 70, № 6, P. 836–853. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.02.016>
- Jonah O.F., Goncharenko L., Erickson P.J., Zhang S., Coster A., Chau J.L., Paula E.R. de, Rideout W. Anomalous behavior of the equatorial ionization anomaly during the July 2, 2019 solar eclipse, *J. Geophys. Res.*, 2020, V. 125, P. 1–12.
- Kelley M.C., Fejer B.G., Gonzales C.A. An explanation for anomalous equatorial ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 1979, V. 6(4), P. 301–304.
- Kumar S., and Singh A.K. Changes in total electron content (TEC) during the annular solar eclipse of 15 January 2010, *Adv. Space Res.*, 2012, V. 49, P. 75–82.
- Kumar S., Singh A.K. and Singh R.P. Ionospheric response to total solar eclipse of 22 July 2009 in different Indian regions, *Annales Geophysicae*, 2013, V. 31, № 9, P. 1549–1558.
- Le H., Liu L., Yue X., Wan W., and Ning B., Latitudinal dependence of the ionospheric response to solar eclipses, *J. Geophys. Res.*, 2009, V. 114, A07308, 2009. <https://doi.org/10.1029/2009JA014072>
- Le H., Liu L., Yue X., and Wan W. The midlatitude F2 layer during solar eclipses: Observations and modeling, *J. Geophys. Res.*, 2008, V. 113, A08309.
- Ledig P.G., Jones M.W., Giesecke A.A., and Chernosky E.J. Effects on the ionosphere at, Peru, of the solar eclipse, January 25, 1944, *Terr. Magn. Atmos. Electr.*, 1946, V. 51, № 3, P. 411–418. <https://doi.org/10.1029/TE051i003p00411>
- Mallat S. Zero-crossings of a wavelet transform, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1991, V. 37, P. 1019–1033.
- Munro G.H., and Heisler L.H. Ionospheric records of solar eclipses, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 1958, V. 12, № 1, P. 57–67. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(58\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(58)90008-4)
- Nelli N.R., Temimi M., Fonseca R., Francis D., Nesterov O., Abida R., Weston M., and Kumar A. Anatomy of the Annular Solar Eclipse of 26 December 2019 and Its Impact on Land–Atmosphere Interactions Over an Arid Region, *IEEE Geosci. & Remote Sensing Lett.*, 2020, P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2020.3003084>
- Paul A., Das T., Ray S., Das A., Bhowmick D., and DasGupta A. Response of the equatorial ionosphere to the total solar eclipse of 22 July 2009 and annular eclipse of 15 January 2010 as observed from a network of stations situated in the Indian longitude sector, *Ann. Geophysicae*, 2011, V. 29, № 10, P. 1955–1965.
- Pundhir D., Singh B., Singh O.P., and Gupta S.K. A morphological study of low latitude ionosphere and its implication in identifying earthquake precursors, *J. Ind. Geophys. Union*, 2017, V. 21, № 3, P. 214–222.
- Srigutomo W., Singarimbun A., Meutia W., Djaja I Gede Putu Fadjar Soerya Muslim B., and Abadi P. Decrease of total electron content during the 9 March 2016 total solar eclipse observed at low latitude stations, Indonesia, *Ann. Geophysicae*, 2019. <https://doi.org/10.5194/angeo-2019-11>
- Stankov S.M., Bergeot N., Berghmans D., Bolsee D., Bruyninx C. et al., Multi-instrument observations of the solar eclipse on 20 March 2015 and its effects on the ionosphere over Belgium and Europe, *J. Space Weather Space Clim.*, 2017, V. 7, A19. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017017>
- Uma G., Brahmanandam P.S., Srinivasu V.K.D., Prasad D.S.V.V.D., Gowtam V.S., Ram T.S., and Chud Y.H. Ionospheric responses to the 21 August 2017 great American solar eclipse – A multi-instrument study, *Adv. Space Res.*, 2019, V. 65(1), P. 74–85.
- Vyas B.M., and Sunda S., The solar eclipse and its associated ionospheric TEC variations over Indian stations on January 15, 2010, *Adv. in Space Res.*, 2012, V. 49, P. 546–555.
- Zhang S.-R., Erickson P.J., Goncharenko L.P., Coster A.J., Rideout W., and Vierinen J. Ionospheric bow waves and perturbations induced by the 21 August 2017 solar eclipse, *Geophys. Res. Lett.*, 2017, V. 44, P. 12067–12073.

Statistical and Wavelet Transform-Based Study of the Latitudinal Ionospheric Response to an Annular Solar Eclipse on June 21, 2020

Devbrat Pundhir^{a, *}, Birbal Singh^{b, **}, and Rajpal Singh^{c, ***}

^a*Seismo-electromagnetics and Space Research Laboratory (SESRL), Department of Physics, Raja Balwant Singh Engineering Technical Campus, Bichpuri, Agra, 283105 India*

^b*Seismo-electromagnetics and Space Research Laboratory (SESRL), Department of Electronics and Communication, Raja Balwant Singh Engineering Technical Campus, Bichpuri, Agra, 283105 India*

^c*Department of Physics, GLA University, Mathura, 281406 India*

^{*}*e-mail: devbratpundhir@gmail.com*

^{**}*e-mail: bbsagra@gmail.com*

^{***}*e-mail: rp.singh@gla.ac.in*

The ionosphere is a very complex and variable part of the atmosphere and it is controlled by solar activity. A solar eclipse is one of the phenomena which depicts a major impact on the ionosphere. In this study, we have analyzed the TEC data of 11 IGS-TEC stations (including one GPS station namely Agra) corresponding to a solar eclipse of June 21, 2020 for the duration of June 07–21, 2020. The TEC variations show lower values on the eclipse's day in comparison to the other days from the mean of each station except some of the stations like Agra (≈ 2 TECU), BHR4 (≈ 1 TECU), IISC (≈ 0.5 TECU) have shown the enhanced TEC variations. These results are examined by applying wavelet transform techniques such as continuous wavelet transforms (CWTs), and wavelet decomposition over the average, addition, and multiplication of TEC data of 11 stations for the duration of 9:30 AM to 3:30 PM on the eclipse's day. These results match very well with our statistical results and depict a better representation of the TEC variations during the solar eclipse. The wavelet decomposition of TEC variation has provided that TEC is affected by solar eclipse globally. These TEC variations are interpreted in terms of the mechanisms available in the literature.

Keywords: solar eclipse, ionosphere, GPS, IGS, TEC, wavelet transform