Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 298–302.

УДК 551.510.535
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-298
ORCID: 0000-0003-4029-1298

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ИОНИЗАЦИИ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА

В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, Ю.А. Корсунская, Ю.В. Поклад, А.И. Сапунова

Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва, Россия,
lobanova_vs@mail.ru

ASSESSING THE IONIZATION DYNAMICS OF UPPER LAYERS OF THE ATMOSPHERE DURING X-CLASS SOLAR FLARES

V.S. Lobanova, I.A. Ryakhovsky, J.A. Korsunskaya, Yu.V. Poklad, A.I. Sapunova

Institute of Geospheres Dynamics RAS, Moscow, Russia, lobanova_vs@mail.ru

Аннотация. Ионизирующее излучение солнечных вспышек приводит к резкому возрастанию электронной концентрации в ионосфере, которое, в свою очередь, влияет на распространение радиоволн и может вызывать искажения и потери сигналов технических систем. Поэтому оценка параметров ионосферы при воздействии вспышек на Солнце является актуальной задачей при проектировании и корректировке работы систем связи и навигации. В настоящей работе приводится подход к оценке скорости ионизации атмосферы на высотах от 60 до 600 км во время солнечных вспышек X-класса. Для расчетов использовались данные эмпирических моделей о нейтральном составе атмосферы (NRLMSISE-00) и об ионизирующем излучении Солнца (FISM2 Flare). Для учета процессов рекомбинации применялись данные об электронной концентрации по модели IRI-2020. Приведенные оценки прошли верификацию с помощью экспериментальных данных о приращении вертикального полного электронного содержания, оцененного по сигналам GPS, принятым в геофизической обсерватории «Михнево». Хорошая согласованность расчетов с экспериментальными данными свидетельствует о справедливости изложенного подхода.

Ключевые слова: солнечные вспышки, электронная концентрация, скорость ионизации, GPS, полное электронное содержание.

Abstract. Ionizing radiation from solar flares leads to a sharp increase in the electron density in the ionosphere, which, in turn, affects the propagation of radio waves and can cause distortion and loss of signals from technical systems. Therefore, assessing ionospheric parameters under the influence of solar flares is a pressing task in the design and adjustment of communication and navigation systems. This paper presents an approach to estimating the atmospheric ionization rate at altitudes from 60 to 600 km during X-class solar flares. The calculations were performed using data from empirical models on the neutral composition of the atmosphere (NRLMSISE-00) and on the ionizing radiation of the Sun (FISM2 Flare). To account for recombination processes, electron density data from the IRI-2020 model were used. The presented estimates were verified using experimental data on the increment of the vertical total electron content, estimated from GPS signals received at the Mikhnevo Geophysical Observatory. Good agreement between calculations and experimental data was obtained, which indicates the validity of the presented approach.

Keywords: solar flares, electron density, ionization rate, GPS, total electron content.

ВВЕДЕНИЕ

Вспышки на Солнце сопровождаются взрывным нарастанием интенсивности ионизирующего излучения (ИИ), что приводит к резкой интенсификации процессов ионизации в верхней атмосфере, вызывающей увеличение электронной концентрации [Garriott et al., 1967; Thome, Wagner, 1971; Mitra, 1974; Liu et al., 2025; O'Hare et al., 2025; Bekker et al., 2025]. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли может приводить к радиопомехам, искажениям сигналов систем навигации и связи, а также к выходу из строя электронной аппаратуры на спутниках [Contreira et al., 2005; Tsurutani et al., 2009; Afraimovich et al., 2009; Kolarski, Grubor, 2014; de Paula et al., 2022]. Таким образом, предсказание и мониторинг параметров ионосферы во время солнечных вспышек являются актуальными задачами при проектировании технических систем и управлении ими.

Современные методы исследования ионосферы [Singh et al., 2021; Sun, 2019; Li et al., 2024; Padokhin et al., 2025] позволяют непрерывно отслеживать ее параметры и обнаруживать ионосферные возмущения. Тем не менее существующих методов недостаточно для полноценного анализа высотных профилей электронной концентрации во время солнечных вспышек вследствие отсутствия адекватных моделей и сложности прямых измерений.

Значительный успех в исследовании внезапных ионосферных возмущений был достигнут благодаря разработке моделей, среди которых важное место занимает эмпирическая модель солнечного излучения FISM2 [Chamberlin et al., 2020]. Выход этой модели представляет собой данные об ИИ Солнца в диапазоне от 0.05 до 190 нм с шагом по длине волны 0.1 нм, причем могут быть получены как усредненные за день данные (FISM2 Daily), так и данные с шагом по времени 1 мин (FISM2 Flare), что подходит для анализа быстропротекающих процессов, таких как солнечные вспышки. Ограниченность экспериментальных данных об ИИ Солнца обусловливает значимость и востребованность модели FISM2 [Singh et al., 2024; Brandt et al., 2024; Liu et al., 2024; Pikulina et al., 2022]. В настоящей работе показана применимость этой модели для

оценки вертикальных профилей скорости ионизации в верхних слоях атмосферы.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИОНИЗАЦИИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Оценка вертикальных профилей скорости ионизации на высотах от 60 до 600 км проводилась для двух солнечных вспышек X-класса, произошедших 06.09.2017 г. Их основные параметры представлены в табл. 1 (значения потоков рентгена приведены по данным GOES-R). Эти вспышки характеризуются коротким периодом нарастания потока ИИ Солнца.

Таблица 1. Основные параметры рассматриваемых солнечных вспышек

Дата и класс вспышки	06.09.2017 X3.7	06.09.2017 X13.3
Время максимума, UT	09:10	12:02
Период нарастания, минуты	13	9
Продолжительность, минуты	20	17
Солнечно-зенитный угол на момент начала вспышки в ГФО «Михнево»	48	56
Максимум потока рентгена 1–8 ангстрем, Вт·10^{-4}/м^2	1.28	6.02

Основным процессом, определяющим динамику концентрации заряженных частиц в верхней атмосфере, является фотоионизация. Скорость этого процесса для вещества j под воздействием фотонов с длиной волны λ на высоте z определяется следующим соотношением:

$$q_j^i(,z) = F \quad (z) \quad {}_j^i(\quad)n_j(z), \qquad (1)$$

где $F(z)$ — плотность потока фотонов солнечного излучения с длиной волны на высоте z, $_j^i()$ — сечение поглощения вещества j на длине волны , $n_j(z)$ — профиль концентрации вещества j по высоте z [Lodders, Fegley, 1998].

Вследствие поглощения и рассеяния плотность потока $F(z)$ из выражения (1) уменьшается при прохождении сквозь толщу атмосферы по закону Бугера — Ламберта — Бера [Hedin, 1991]:

$$F \quad (z) = F \quad e^{-(,z,)}, \qquad (2)$$

где F — поток фотонов солнечного излучения с длиной волны λ за пределами атмосферы, $(, z,)$ — оптическая толщина на высоте z при зенитном угле Солнца , которая при 75° может быть найдена как

$$(,z,) = \sum_j \int_z n_j(z') \quad {}_j^a(\quad) \, sec \, dz', \qquad (3)$$

где $_j^a$ — сечение поглощения вещества j на длине волны , sec — секанс солнечно-зенитного угла [Keeling, Whorf, 2004]. Верхний предел интегрирования в настоящей работе ограничен 600 км, поскольку на больших высотах плотность среды мала. Значения сечений поглощения и ионизации (выражения (1) и (3)), представленные в работе [Fennely, Torr, 1992], были интерполированы на набор линий, представленных по FISM2 Flare.

В настоящей работе рассматривалось воздействие на три компоненты атмосферы, дающие основной вклад в процесс ионизации на рассматриваемых высотах: молекулярного и атомарного кислорода (O_2 и O соответственно) и молекулярного азота (N_2). Концентрации нейтральных компонент были заданы на основе модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002], в которой использовались параметры, соответствующие средним широтам, средней солнечной и низкой геомагнитной активности, координатам ГФО «Михнево» (54.95° с.ш., 37.77° в.д.) и времени начала вспышки.

Для оценки интенсивности солнечного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах (от 0.05 до 103.5 нм) применялась эмпирическая модель FISM2 Flare [Chamberlin et al., 2020]. Поток фотонов солнечного излучения за пределами атмосферы оценивался как

$$F \quad = F^W 6.2510^{18}/1240, \qquad (4)$$

где F^W [Вт/м^2/нм] — спектральная плотность солнечного излучения по модели FISM2 Flare, [нм] — длина волны.

По формулам (1)–(4) были рассчитаны высотные профили скорости образования электронов для трех основных компонент атмосферы: O, O_2 и N_2. Высотный профиль общей скорости ионизации рассчитывался согласно выражению

$$q_{ion}(z) = q_{ion}^{O_2}(z) + q_{ion}^{N_2}(z) + q_{ion}^{O}(z), \qquad (5)$$

где $q^{O2}_{ion}(z)$, $q^{N2}_{ion}(z)$, $q^{O}_{ion}(z)$ — высотные профили скорости образования электронов молекулярного кислорода, молекулярного водорода и атомарного кислорода соответственно.

Результаты расчета высотных профилей общей скорости ионизации над ГФО «Михнево» 06.09.2017 г. в моменты начала и пика вспышек X3.7 и X13.3 представлены на рис. 1. Видно, что наибольшие скорости образования электронов характерны для высот от 150 до 200 км. Кроме того, заметно увеличение скорости образования электронов на пике вспышки по сравнению с ее началом.

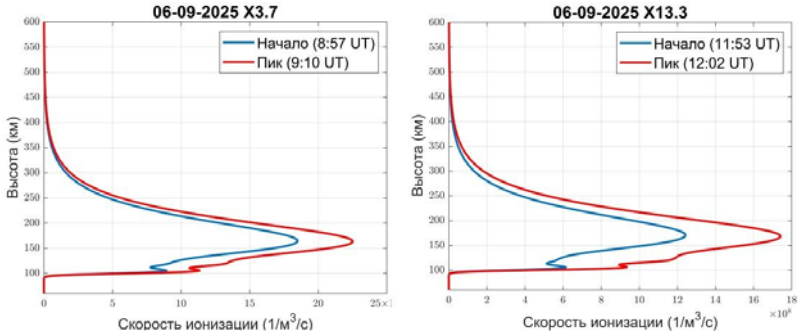

Рис. 1. Высотный профиль общей скорости ионизации для трех основных компонент атмосферы (O, O_2 и N_2) в начале (синяя кривая) и на пике (красная кривая) вспышек X3.7 (слева) и X13.3 (справа) 06.09.2017 г.

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЕТОВ С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ GPS

Для верификации расчетов высотных профилей скорости ионизации использовались данные GPS, принятые в ГФО «Михнево» с использованием приемника Javad Sigma-G3T [Ryakhovskiy et al., 2021] (частота оцифровки 1 Гц). По принятым сигналам GPS проводился расчет значений ПЭС ионосферы, которое представляет собой число электронов в столбе единичного сечения вдоль пути прохождения радиосигнала от спутника до наземного приемника.

С учетом выполнения условия квазинейтральности плазмы скорость изменения концентрации электронов без учета динамических процессов переноса может быть описана уравнением непрерывности для электронов [Chakraborty, Basak, 2020]:

$$\frac{dN_e(z,t)}{dt} = q(z,t) - \quad {}_{eff} N_e^2(z,t), \qquad (6)$$

где $N_e(z, t)$ — концентрация электронов и $q(z, t)$ — скорость образования электронов на высоте z в момент t, ⟨eff — эффективный коэффициент скорости рекомбинации.

Для получения оценки динамики электронной концентрации на фронте вспышки в первом приближении можно пренебречь рекомбинационными процессами [Ryakhovsky et al., 2024]. В этом случае приращение скорости ионизации и скорости роста электронной концентрации при увеличении потоков солнечного излучения связаны следующим образом:

$$\frac{dN_e(z,t)}{dt} = q(z,t), \qquad (7)$$

где $\otimes q(z, t)$ — приращение скорости образования электронов, а $\otimes N_e(z, t)$ — рост электронной концентрации, вызванные солнечной вспышкой на высоте z в момент t. Интегрирование выражения (7) по высоте h позволяет получить следующее выражение:

$$\frac{d(VTEC(t))}{dt} = \int_h \quad q(z,t)dz, \qquad (8)$$

где $\otimes VTEC$ — приращение вертикального ПЭС в момент времени t, а $\int_h \quad q(z,t)dz = q(t)$ — интеграл высотного профиля скорости образования электронов, полученного в предыдущем разделе.

Полученные выражения показывают, что приращение скорости ионизации Δq на фронте вспышки и приращение вертикального ПЭС связаны следующим образом:

$$\Delta q(t) = \frac{d(VTEC(t))}{dt}, \qquad (9)$$

где t — время. Оценка приращения ПЭС во время солнечных вспышек проводилось по методике [Lobanova et al., 2026].

УЧЕТ ПРОЦЕССОВ РЕКОМБИНАЦИИ

Для уточнения оценок скорости образования электронов следующим шагом стала количественная оценка влияния процессов рекомбинации (второе слагаемое в (7)). Для этого была численно решена система дифференциальных уравнений с помощью полученных оценок интеграла скорости ионизации. В качестве начальных условий был взят высотный профиль электронной концентрации на момент начала вспышек по модели IRI-2020 [Bilitza, 2018]. Эффективный коэффициент рекомбинации ⟨eff был представлен как

$$_{eff}(z) = \sum_i \quad {}_i \quad {}_i(z), \qquad (10)$$

где ⟨$_i$ — коэффициент рекомбинации для иона i, ™$_i$ — доля концентрации иона i, z — высота. Значения ⟨$_i$ брались из работы [Sentman et al., 2008a, 2008b]. Величина ™$_i$ доступна по модели IRI-2020 [Bilitza, 2018] для высот ниже 300 км, а выше проводилась экспоненциальная экстраполяция значений. Были рассмотрены ионы NO^+, O^+_2 и O^+, поскольку оценка скорости ионизации в настоящей работе проводилась для трех компонент ионосферы: O_2, N_2 и O.

Результаты верификации оценок по данным GPS представлены на рис. 2. Синей кривой показана скорость изменения приращения вертикального ПЭС, полученного по экспериментальным данным GPS, красной кривой — приращение интеграла оцененной скорости

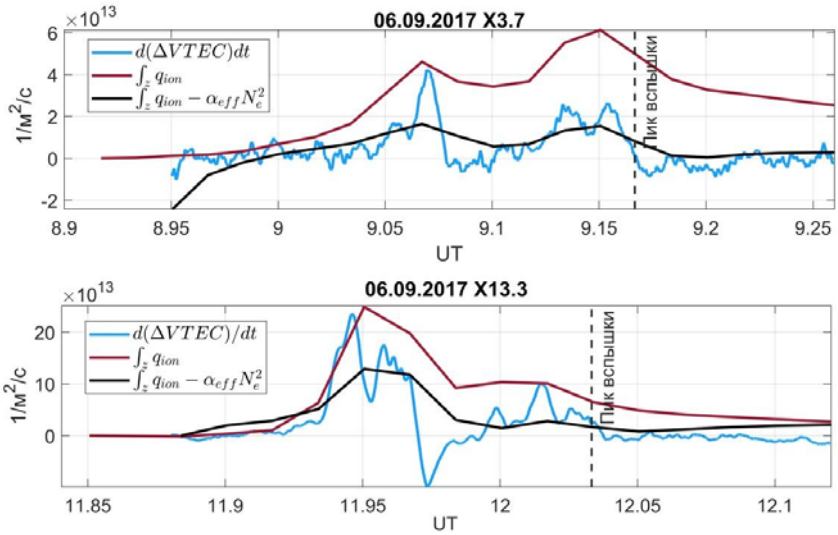

Рис. 2. Верификация оценок по данным GPS для вспышек X3.7 (верхняя панель): X13.3 (нижняя панель), произошедших 06.09.2017 г.: синяя кривая — производная приращения вертикального ПЭС; красная кривая — приращение интеграла скорости ионизации без учета процессов рекомбинации, черная кривая — с их учетом

образования электронов без учета процессов рекомбинации, черной — с их учетом. Видно, что для обеих вспышек наблюдается совпадение характерных моментов времени изменения значений скорости ПЭС и скорости изменения ионизации. Кроме того, учет процессов рекомбинации привел к уменьшению оценок интеграла скорости ионизации, хотя качественное поведение кривых сохранилось: наблюдается совпадение точек локальных экстремумов.

Тем не менее в дальнейшей работе приведенные оценки возможно уточнить путем учета следующих ограничений. Рассматривалось ИИ с энергией более 500 эВ и только три основные компоненты атмосферы. Вторичные электроны, которые образуются за счет электронного удара, не учитывались в расчетах. Не рассматривались химико-кинетические реакции, учитывающие переработку образовавшихся электронов. Не учитывалось изменение электронной температуры, от которой зависит α_{eff} (уравнение (10)).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была проведена оценка вертикальных профилей скорости ионизации трех основных газовых компонент атмосферы (O, O_2 и N_2) на высотах от 60 до 600 км во время двух солнечных вспышек X-класса. При расчетах использовались данные эмпирической модели ИИ Солнца FISM2 Flare и данные о нейтральном составе атмосферы NRLMSISE-00. При решении системы уравнений непрерывности электронной концентрации была проведена оценка процессов рекомбинации, что позволило уточнить полученные оценки. Верификация расчетов проводилась с помощью данных о приращении вертикального ПЭС, оцененного по экспериментальным данным GPS, принятым в ГФО «Михнево». Показана хорошая согласованность расчетных значений с экспериментальными данными.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект номер рег.№122032900175-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Afraimovich E.L., Demyanov V.V., GavrilyukN.S., et al. Malfunction of satellite navigation systems GPS and GLONASS caused by powerful radio emission of the Sun during solar flares on December 6 and 13, 2006, and October 28, 2003 // Cosmic Res. 2009. V. 47. P. 126–137.

Bekker S.Z., Milligan R.O., Ryakhovsky I.A. Response of ionospheric total electron content to the impulsive and late phases of X-class solar flares with various center-to-limb locations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2025. V. 130, e2025JA034281.

Bilitza D. IRI the International Standard for the Ionosphere // Adv. Radio Sci. 2018. V. 16. P. 1–11.

Brandt D.A., Vega E.F., Ridley A. J. On Generalized Additive Models for representation of solar EUV irradiance // Space Weather. 2024. V. 22, e2023SW003680.

Chakraborty S., Basak T. Numerical analysis of electron density and response time delay during solar flares in mid-latitudinal lower ionosphere // Astrophys. Space Sci. 2020. V. 365. P. 184.

Chamberlin P.C., Eparvier F.G., Knoer V., Leise H., Pankratz A. et al. The flare irradiance spectral model-version2 (FISM2) // Space Weather. 2020. V. 18, e2020SW002588.

Contreira D.B., Rodrigues F.S., Makita K., Brum C.G.M. et. al. An experiment to study solar flare effects on radio-communication signals // Adv. Space Res. 2005. V. 36, iss. 12. P. 2455–2459.

de Paula V., Segarra A., Altadill D., Curto J.J., Blanch E. Detection of solar flares from the analysis of signal-to-noise ratio recorded by digisonde at mid-latitudes // Remote Sensing. 2022. V. 14, iss. 8. P. 1898.

Fennelly J.A., Torr D.G. Photoionization and photoabsorption cross sections of O, N2, O2, and N for aeronomic calculations // Atomic Data and Nuclear Data Tables. 1992. V. 51, P. 321–363.

Garriott O.K., da Rosa A.V., Davis M.J., Villard O.G., Jr. Solar flare effects in the ionosphere // J. Geophys. Res. 1967. V. 72, iss. 23. P. 6099–6103.

Hedin A.E. Extension of the {MSIS} thermosphere model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 1159–1172.

Keeling C.D., Whorf T. P. Atmospheric CO2 records from sites in the SIO sampling network // Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, ed. By T. A. Boden, D. P. Kaiser, R. J. Sepanski, W. F. Stoss (Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. 2004).

Kolarski A., Grubor D. Sensing the Earth's low ionosphere during solar flares using VLF signals and goes solar X-ray data // Adv. Space Res. 2014. V. 53, iss. 11. P. 1595–1602.

Ladders K., Bruce F., Jr. The Planetary Scientist's Companion ('Meteorites'). New York, NY: Oxford Academic, 1998.

Li W., Yang F., Zuo X., et al. An important monitoring technology for near-Earth space environment — ionospheric tomography: Evolution, challenges, application and perspectives // Space Sci. Rev. 2025. V. 221. P. 55.

Liu X., Qian L., Chamberlin P.C., Chen Y., Kong X., et al. Data-driven simulation of effects of a solar flare with extreme-ultraviolet late phase on ionospheric electron density // Astrophys. J. 2024. V. 974. P. 157.

Lobanova V.S., Ryakhovsky I.A., Gavrilov B.G., Sapunova A.I., Poklad Y.V., Ermak V.M. TEC increment evaluation technique during X class flares using GNSS data // Adv. Space Res. 2026. V. 77, iss. 3. P. 3434–3442.

Mitra A.P. Ionospheric effects of solar flares. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1974. 307 p.

O'Hare A.N., Bekker S., Hayes L.A., Milligan R.O. Quasi-periodic pulsations in ionospheric TEC synchronized with solar flare EUV emission // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2025. V. 130, e2024JA033493.

Padokhin A.M., Chernyshov A.A., Andreeva E.S. et al. Tomographic Methods for Studying the Upper Atmosphere and Near-Earth Space: Current State and Development Prospects // Cosmic Res. 2025. V. 63 P. 284–304.

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, iss. A12. P. 1468.

Pikulina P., Mironova I., Rozanov E., Karagodin A. September 2017 Solar Flares Effect on the Middle Atmosphere // Remote Sensing. 2022. V. 14, iss. 11. P. 2560.

Ryakhovskiy I.A., Gavrilov B.G., Poklad Yu.V., Bekker S.Z., Ermak V.M. Studying the state and dynamics of the

ionosphere based on synchronous records of SLF/ULF/VLF and HF/UHF radio signals at geophysical observatory “Mikhnevo” // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57. P. 718-730.

Ryakhovsky I.A., Poklad Y.V., Gavrilov B.G., Bekker S.Z. Estimation of the ionospheric D-region ionization caused by X-class solar flares based on VLF observations // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129. P. e2023JA031532.

Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M. G., Morrill J.S. Plasma chemistry of sprite streamers // J. Geophys. Res. 2008a. V. 113. P. D11112.

Sentman D.D., Stenbaek-Nielsen H.C., McHarg M. G., Morrill J. S. Correction to “Plasma chemistry of sprite streamers” // J. Geophys. Res. 2008b. V. 113. P. D14399.

Singh K., Haralambous H., Oikonomou C., Leontiou T. A topside investigation over a mid-latitude digisonde station in Cyprus // Adv. Space Res. 2021. V. 67, iss. 2. P. 739–748.

Singh D., Goncharenko L.P., Galkin I.A., Chamberlin P.C., Redondo, F. Local empirical modeling of N_mF2 using ionosonde observations and the FISM2 solar EUV model // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129, e2024JA032697.

Sun Y.Y. GNSS brings us back on the ground from ionosphere // Geosci. Lett. 2019. V. 6. P. 14.

Thome G.D., Wagner L.S. Electron density enhancements in the E and F regions of the ionosphere during solar flares // J. Geophys. Res.. 1971. V. 76, iss. 28. P. 6883–6895.

Tsurutani B.T., Verkhoglyadova O.P., Mannucci A.J., Lakhina G.S., et al. A brief review of “solar flare effects” on the ionosphere // Radio Sci. 2009. V. 44. P. 1–14.