

УДК 551.51:551.501

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОВОЛН В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ТРАССАХ СПУТНИК–СПУТНИК ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 22–23.VI.2015

© 2021 г. В. Н. Губенко^{1, *}, В. Е. Андреев¹, И. А. Кириллович¹, Т. В. Губенко¹, А. А. Павельев¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Россия

*vngubenko@gmail.com

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 12.04.2020 г.

Принята к публикации 29.05.2020 г.

В работе проанализированы результаты около 100 радиозатменных сеансов зондирования высокоширотной ($>65^\circ$ N) нижней ионосферы северного полушария Земли, которые были проведены 22–23.VI.2015 на несущей GPS-частоте 1545.42 МГц (диапазон *L1*) в эксперименте *FORMOSAT-3/COSMIC*. Корональные выбросы плазмы, дошедшие до Земли в этот период, спровоцировали магнитную бурю класса *G4* (сильный геомагнитный шторм, планетарный *Kp*-индекс равен 8), которая в свою очередь вызвала значительные ионосферные флуктуации радиоволн на трассах зондирования: навигационные (*GPS*) спутники – низкоорбитальные (*FORMOSAT-3/COSMIC*) спутники.

DOI: 10.31857/S0023420621030055

1. ВВЕДЕНИЕ

Летом 2015 года (22–23.VI) на Солнце имели место корональные выбросы массы (КВМ) в сторону Земли (один гигантский и несколько небольших выбросов). Данное событие было зафиксировано многими космическими аппаратами и ионосферными станциями [1–4]. Наиболее мощный выброс был идентифицирован магнитометром, как скачок межпланетного магнитного поля (IMF) от ~ 10 до ~ 40 нТл, а также отмечен инструментом SWEPAM (Solar Wind Electron, Proton, and Alpha Monitor), как внезапное повышение плотности солнечного ветра с ~ 20 до ~ 45 частиц/см³ с соответствующим увеличением давления до значений свыше 50 нПа [1]. Столкновение КВМ с ударной волной ожидалось 22.VI.2015 в ~ 18.36 UT, после более слабого толчка в ~ 05.40 UT. Геомагнитные условия во время бури 22–23.VI.2015 (плотность, скорость и давление солнечного ветра; компоненты B_x , B_y , B_z межпланетного магнитного поля и угол вектора IMF) подробно представлены на рис. 1 работы [1]. Индекс Бойля, связанный с сильной южной компонентой вектора IMF [1, см. рис. 1d], посылал “желтый сигнал” тревоги в 06.04 UT и “красный сигнал” в 18.34 UT накануне столкновения КВМ с ударной волной.

Корональные выбросы массы сопровождались мощными потоками рентгеновского излучения, что было зарегистрировано космическими аппаратами *GOES-13* и *-15*, находящимися на геостационарной орбите (рис. 1, левая панель). Эти вы-

бросы спровоцировали на Земле сильную магнитную бурю класса *G4* ($G4 = Kp - 4$). На правой панели рис. 1 представлены оценки планетарного *Kp*-индекса за период 22–23.VI.2015, взятые из архива данных о космической погоде (URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>).

Целью работы является анализ радиосигналов диапазона *L1* (частота 1575.42 МГц), излучаемых передатчиками спутников навигационной системы *GPS* и регистрируемых приемниками на борту низкоорбитальных спутников *FORMOSAT-3/COSMIC*, для определения параметров мелкомасштабной структуры высокоширотной ионосферы Земли на высотах от 50 до 110 км во время геомагнитной бури в июне 2015 года.

2. ОТБОР РАДИОЗАТМЕННЫХ СЕАНСОВ *FORMOSAT-3/COSMIC*

Радиозондирование атмосферы и ионосферы Земли по схеме спутник-спутник, когда применяются высокоорбитальный (*GPS/ГЛОНАСС*) и низкоорбитальный (*LEO*) спутники, проводились ранее в разных комбинациях, например: *ГЕОСТАЦИОНАР* – орбитальная станция *МИР*, *GPS – MICROLAB*, *GPS – GRACE*, *GPS/ГЛОНАСС – METOP*, *GPS – CHAMP*, *GPS – FORMOSAT-3/COSMIC* и другие. По результатам анализа этих экспериментов имеется обширная литература [5–7]. Для получения оценок параметров мелкомасштабной структуры нижней ионосферы, во время

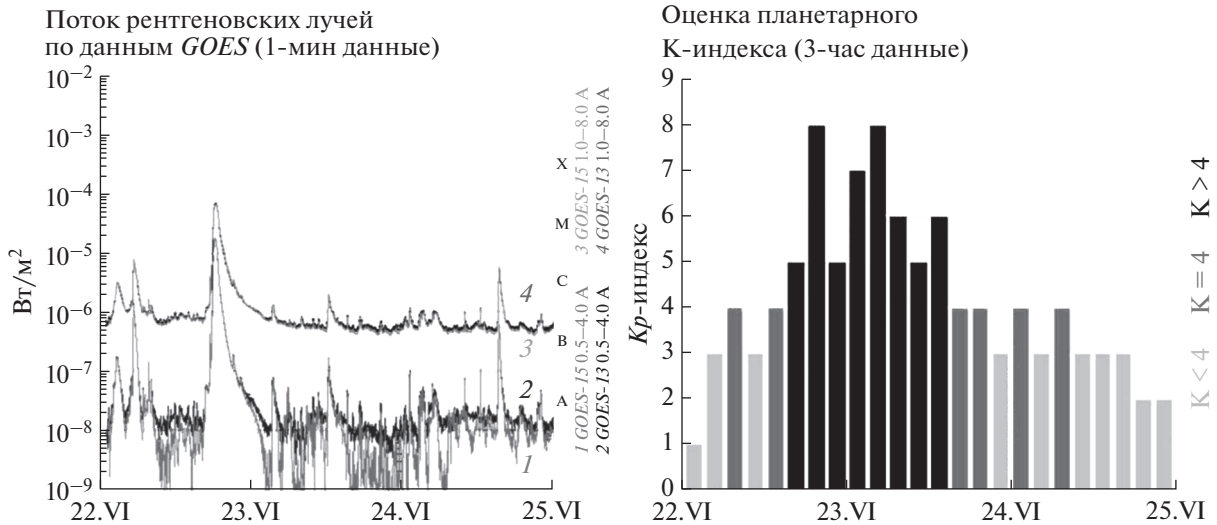


Рис. 1. Поток рентгеновского излучения (левая панель), зарегистрированные 22–23.VI.2015 космическими аппаратами GOES-13 и -15, находящимися на геостационарной орбите, и оценки планетарного K_p -индекса (правая панель).

упомянутой ранее геомагнитной бури, нами из большой базы данных FORMOSAT-3/COSMIC были отобраны около 100 радиозатменных сеансов измерений, проведенных в период с 22 по 23.VI.2015. Отобранные сеансы были выполнены на широтах от 65° N до 88° N и охватывали интервал высот 50–110 км.

В работах [5, 8, 9] показано, что существует связь между мощностью (P_L) принимаемого на низкоорбитальном спутнике сигнала, рефракционным ослаблением мощности радиоволн (X) и ускорением (a_ψ) эйконала (фазового пути ψ):

$$1 - X(t) = ma_\psi = m \cdot d^2\psi/dt^2, \quad m = r_\psi / (dp_0/dt)^2, \quad (1)$$

$$r_\psi = L_L \cdot L_G / L_0,$$

где p_0 – прицельный параметр радиолуча, L_L и L_G – соответственно расстояния от приемника (L) и передатчика (G) до точки перигея луча, L_0 – расстояние от передатчика до приемника по прямой [5]. На рис. 2 представлены два типичных высотных профиля нормированной мощности (P) сигнала, измеренной накануне геомагнитной бури 22.VI.2015 спутником FORMOSAT-3/COSMIC-6, и рефракционного ослабления радиоволн (X), восстановленного из данных об эйконале с помощью выражения (1). Показанные на рис. 2 кривые были получены путем сглаживания экспериментальных данных методом скользящего среднего по 15 точкам. Для нахождения безразмерной величины P , мощность принятого на спутнике FORMOSAT-3/COSMIC-6 сигнала P_L нормировалась на значение средней мощности радиоволн (P_0) на высотах более 300 км, т.е. $P = P_L/P_0$. Над каждой частью рисунка указаны местное время проведения сеанса измерений, а также координа-

ты (широта и долгота) зондируемого района. Можно видеть, что в представленных на рис. 2 профилях наблюдаются коррелированные по высоте квазипериодические вариации величин $P(h)$ и $X(h)$. Найдено, что коэффициент кросс-корреляции для этих вариаций на указанном интервале высот составляет не менее 50%.

Хотя начало геомагнитной бури и не удастся обнаружить из радиозатменных данных, однако с момента прохождения мощного потока рентгеновского излучения (рис. 1) флуктуации величин $P(h)$ и $X(h)$ в интервале 80–100 км высокоширотной ионосферы Земли увеличиваются. Отметим, что концентрация электронов N_e в ночные часы растет, становясь больше чем 10^5 см $^{-3}$ (рис. 3 и 4).

Из сравнения графиков на рис. 3 (панели (а) и (в)) можно видеть, что высотное положение максимума электронной концентрации в ионосферном слое практически совпадает с положением минимума рефракционного ослабления сигнала. Это соответствует результатам, полученным в работах [8–10], где было показано, что при радиозатменном зондировании спорадических E -структур (E_s) в ионосфере Земли, когда вектор распространения параллелен плоскости ионизации E_s -слоя, прохождение радиоволнами центральной его части (пик электронной плотности) приводит к сильной дефокусировке лучей, а при прохождении краев – к их фокусировке.

Как видно из данных, представленных на рис. 4, при радиозондировании района полярной шапки Земли (78.03° N; 96.65° E) на высотах от 101.5 до 90.3 км (луч опускается сверху вниз) мощность радиоволн дециметрового диапазона в среднем падает до уровня 0.1 (–10 дБ), затем возвращается

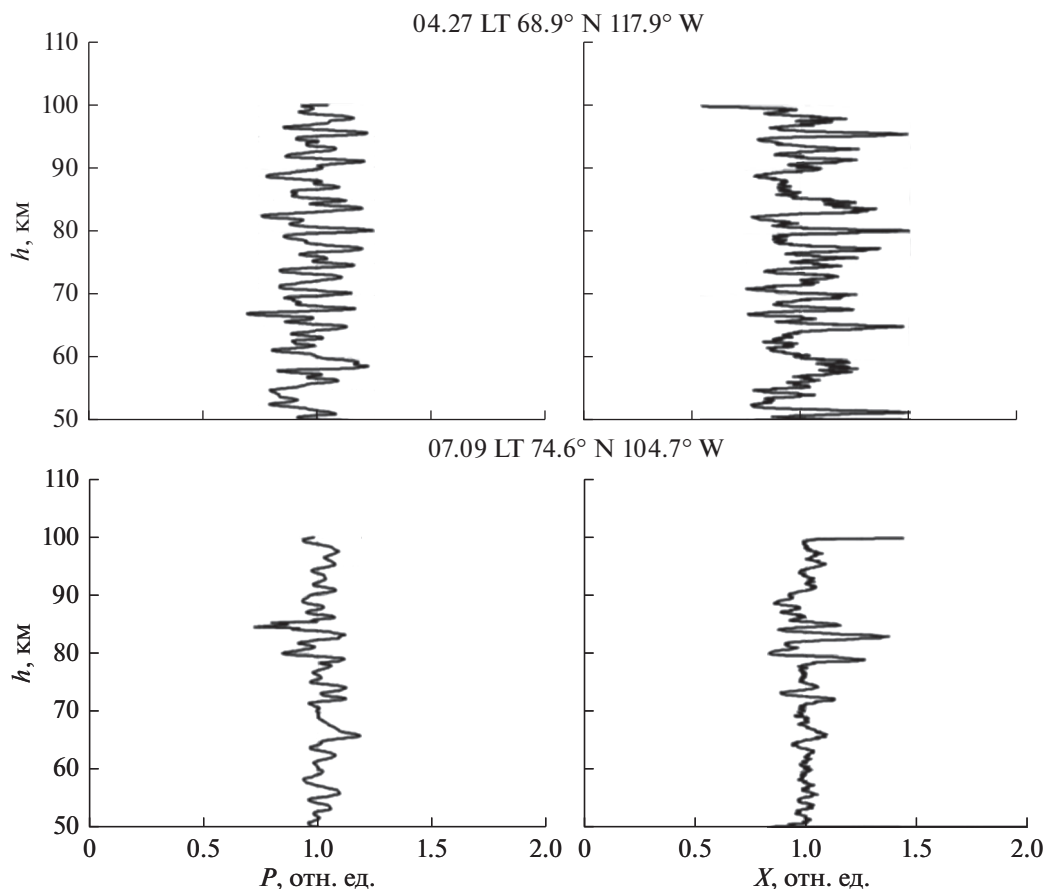


Рис. 2. Высотные профили нормированной мощности сигнала (P), измеренные накануне геомагнитной бури 22.VI.2015 спутником *FORMOSAT-3/COSMIC-6*, и рефракционного ослабления радиоволн (X), восстановленные из измерений эйконала.

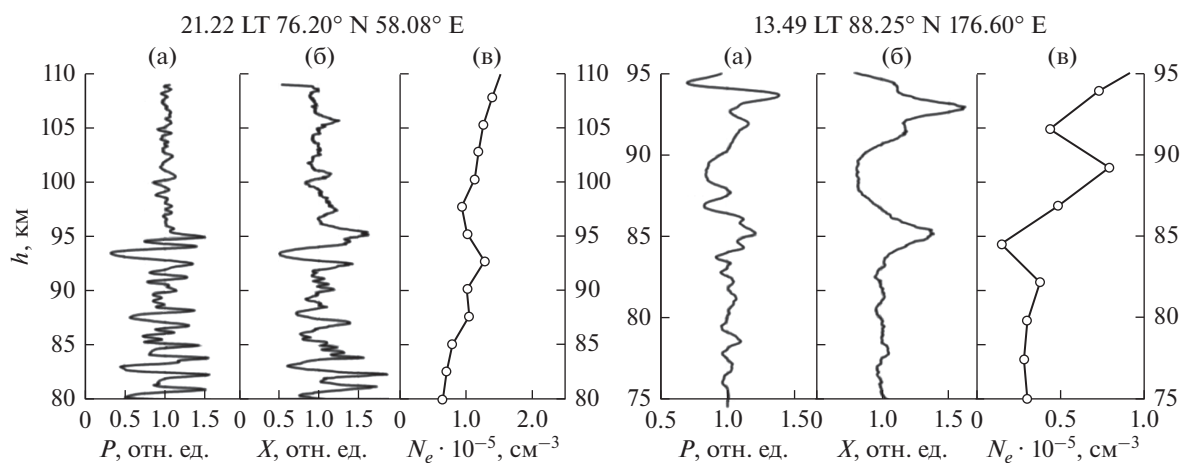


Рис. 3. Высотные зависимости нормированной мощности – $P(h)$, рефракционного ослабления – $X(h)$ и электронной концентрации – $N_e(h)$, полученные по радиозатменным данным спутника *FORMOSAT-3/COSMIC-6* 22.VI.2015 в 21.22 LT в ионосферном районе.

к значению 0.5 (–3 дБ) и далее остается на этом же уровне. Радиозондирование другого района полярной шапки (78.1° N; 65.02° E) показало, что на высоте 89.5 км средний уровень сигнала опускается до значения 0.5 (–3 дБ) и далее держится

на этом уровне (см. рис. 4). Анализ зависимостей $X(h)$ на рис. 4 показывает, что средняя величина $\langle X \rangle$ равна $\langle X \rangle = 1$ (0 дБ), т.е. рефракционное ослабление в интервале высот от 50 до 90 км практически отсутствует. Поэтому мы полагаем, что указанное

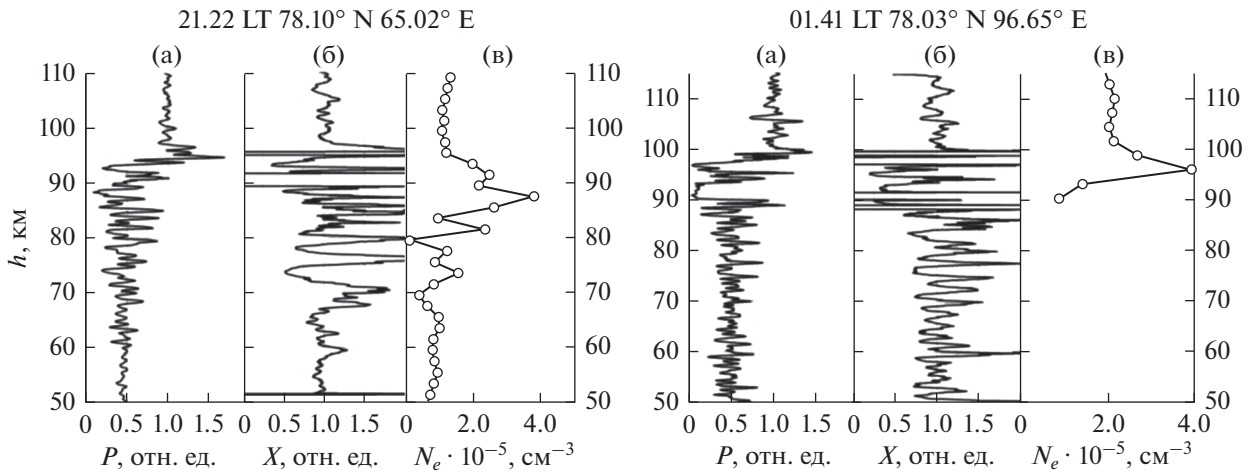


Рис. 4. Высотные зависимости нормированной мощности — $P(h)$, рефракционного ослабления — $X(h)$ и электронной концентрации — $N_e(h)$, полученные по радиозатменным данным *FORMOSAT-3/COSMIC* 22.VI.2015 в 21.22 LT в ионосферном районе.

выше ослабление мощности сигнала $P(h)$, наблюдаемое в анализируемом интервале высот, может быть связано с поглощением радиоволн в нижней ионосфере Земли во время геомагнитной бури.

3. ПОГЛОЩЕНИЕ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОГО ЧИСЛА СОУДАРЕНИЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

О небольшом поглощении (до -1 дБ) радиоволн, которое можно заметить в данных на *GPS*-частотах, было упомянуто в работе [6]. Наиболее характерными особенностями высокоширотной ионосферы (D -область) является специфическое поглощение радиоволн в полярной шапке (ППШ), обусловленное вторжением протонов с энергиями в десятки МэВ и аномальное авроральное поглощение, связанное с высыпаниями электронов. В периоды солнечных вспышек, направленных в сторону Земли, за счет резкого возрастания солнечного ионизирующего излучения, преимущественно в рентгеновском диапазоне возникают внезапные ионосферные возмущения (ВИВ), проявляющиеся в увеличении ионизации, главным образом, в D - и E -областях ионосферы. Авроральное поглощение радиоволн, часто наблюдаемое в зоне полярных сияний в периоды магнитосферных бурь и суббурь, связывают с высыпанием заряженных частиц (главным образом, электронов с энергиями 20–100 кэВ) из магнитосферы в нижнюю ионосферу Земли [11].

Поглощение сигналов диапазона $L1$ (частота 1575.42 МГц) наблюдалось очень ярко в двух радиозатменных сеансах измерений *FORMOSAT-3/COSMIC* в ионосфере Земли (см. рис. 4). В одном из них ослабление мощности радиоволн достига-

ло -10 дБ с возвратом на уровень -3 дБ, а в другом сеансе измерений составляло -3 дБ (рис. 4, панели (а)). Используя эти данные и следуя работе [12], можно определить вертикальный профиль коэффициента поглощения радиоволн (Z) и оценить эффективное число соударений электрона в единицу времени (ν) в нижней ионосфере Земли.

Поглощение радиоволн в нижней ионосфере обусловлено столкновениями электронов с ионами и нейтральными молекулами. Из-за этого часть энергии, сообщаемая электромагнитным полем электронам, расходуется на увеличение энергии хаотического движения частиц плазмы и приводит к ее нагреву. При каждом ударе электрон в среднем передает иону или молекуле импульс $m \cdot dr/dt$, где dr/dt — упорядоченная скорость электронов под действием поля. Если ν — эффективное число соударений электрона в секунду, то за единицу времени его импульс меняется на величину $m \cdot \nu \cdot dr/dt$. Изменение импульса за счет соударений эквивалентно действию некоторой силы трения.

Предполагая, что частота радиоволн $\omega = 2\pi f$ удовлетворяет неравенству $\omega^2 \gg \nu^2$, авторы работы [12] получили следующую оценку коэффициента поглощения Z радиоволн:

$$Z = \frac{e^2 N_e \nu}{\pi m c f^2} = 2.70 \cdot 10^{-3} \frac{N_e \nu}{f^2}, \quad [Z] = \text{см}^{-1}, \quad (2)$$

где m — масса электрона, e — заряд электрона, c — скорость света, величина N_e выражена в см^{-3} , ν — в с^{-1} , f — в Гц. При распространении через ионосферу поток радиоволн испытывает поглощение и нормированная мощность сигнала P равна [12]:

$$P = \exp \left[- \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} Z ds \right] = \exp \left[\frac{-2.70 \cdot 10^{-3}}{f^2} \int_{h_{\min}}^{h_{\max}} N_e v ds \right]. \quad (3)$$

Здесь интегрирование производится по траектории зондирующего радиолуча. Как видно из формулы (2), для оценки параметра v нужно знать вертикальный профиль коэффициента поглощения и распределение электронной концентрации по высоте. Для этого, в нашем распоряжении имеются профили $N_e(h)$ (рис. 4, панели (в)), которые позволяют с помощью (3) решить обратную задачу и определить вертикальный профиль коэффициента поглощения радиоволн $Z(h)$, а также оценить величину v в нижней ионосфере Земли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы результаты около 100 радиозатменных сеансов зондирования высокоширотной ($>65^\circ$ N) атмосферы северного полушария Земли, которые были проведены 22–23.VI.2015 на несущей GPS-частоте 1545.42 МГц (диапазон $L1$) в эксперименте *FORMOSAT-3/COSMIC*. Установлено, что высотное положение максимума электронной концентрации в ионосферном слое практически совпадает с положением минимума рефракционного ослабления сигнала, что соответствует результатам, полученным ранее при радиозатменном зондировании спорадических E -слоев в ионосфере Земли.

На основе анализа радиозатменных измерений *FORMOSAT-3/COSMIC*, проведенных во время сильной геомагнитной бури 22–23.VI.2015 (класса $G4$), обнаружено поглощение радиоволн диапазона $L1$ в нижней высокоширотной ионосфере Земли. Величина поглощения составляет ~ 3 дБ в интервале 60–90 км, и в отдельных случаях достигает ~ 10 дБ на высотах от 90 до 95 км. Показано, что на основе полученных данных можно определить высотный профиль коэффициента поглощения Z радиоволн и оценить эффективное число соударений в секунду v в нижней ионосфере Земли.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin S.Y. et al. Multispacecraft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 7311–7318. <https://doi.org/10.1002/2016GL069154>
2. Baker D.N., Jaynes A.N., Turner D. et al. A telescopic and microscopic examination of acceleration in the June 2015 geomagnetic storm: Magnetospheric Multi-scale and Van Allen Probes study of substorm particle injection // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 6051–6059. <https://doi.org/10.1002/2016GL069643>
3. Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D. et al. Global Ionospheric and Thermospheric Effects of the June 2015 Geomagnetic Disturbances: Multi-Instrumental Observations and Modeling // *J. Geophys. Res.* 2017. V. 122. P. 1–27. <https://doi.org/10.1002/2017JA024174>
4. Mansilla G.A. Ionospheric Response to the Magnetic Storm of 22 June 2015 // *Pure and Applied Geophys.* 2018. V. 175. P. 1139–1153. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1741-5>
5. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2014.
6. Горбунов М.Е. Радиозатменное зондирование атмосферы. М.: ГЕОС, 2017.
7. Яковлев О.И., Матюгов С.С., Павельев А.А. Результаты исследования дневной полярной ионосферы методом затменного зондирования на трассах спутник-спутник // *Известия вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62. № 3. С. 194–204.
8. Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A. Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: Coupling between the tilted plasma layers and internal waves // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61. № 7. P. 1702–1716. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>
9. Gubenko V.N., Kirillovich I.A. Modulation of sporadic E layers by small-scale atmospheric waves in Earth's high-latitude ionosphere // *Solar-Terrestrial Physics.* 2019. V. 5. № 3. P. 98–108. <https://doi.org/10.12737/stp-53201912>
10. Zeng Z., Sokolovskiy S. Effect of sporadic E cloud on GPS radio occultation signal // *Geophys. Res. Lett.* 2010. V. 37. L18817. <https://doi.org/10.1029/2010GL044561>
11. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988.
12. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Связь, 1969.