

Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - «Муром 2021»

Решение обратной задачи о поглощении ДМ-радиоволн в ионосфере Земли во время геомагнитной бури в июне 2015г.

В.Е. Андреев¹, В.Н. Губенко¹, И.А. Кириллович¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1,
E-mail: v.e.andreev@gmail.com, vngubenko@gmail.com

По результатам анализа радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC обнаружено поглощение ДМ-радиоволн (длина волны ~19 см) в нижней высокоширотной ионосфере Земли. Величина максимального поглощения составляет ~3 дБ в интервале ~60 – ~100 км и в отдельных случаях достигает ~10 дБ на высотах от 90 до 95 км. Предложена методика определения вертикальных профилей коэффициента поглощения путём решения обратной задачи радиозондирования в нижней ионосфере Земли. Надёжно идентифицированы слои поглощения в отдельных сеансах, обусловленные мощными всплесками рентгеновского излучения и сильными изменениями геомагнитных условий во время бури. Найдено, что на высотах от 90 до 100 км величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений $(5.69 \pm 1.35) \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}$.

Ключевые слова: радиозатменные измерения, флуктуации интенсивности радиоволн, коэффициент поглощения ДМ-радиоволн, высокоширотная ионосфера

Solving the inverse problem of the absorption of DM radio waves in the Earth's ionosphere during a geomagnetic storm in June 2015.

V E Andreev¹, V N Gubenko¹, I A Kirillovich¹

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino branch)
Vvedensky square 1, Fryazino 141190, Moscow region, Russia
E-mail: v.e.andreev@gmail.com, vngubenko@gmail.com

Based on the results of the analysis of FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation measurements, the absorption of DM- radio waves (wavelength ~19 cm) in the lower high-latitude ionosphere of the Earth was detected. The maximum absorption value is ~3 dB in the range of ~60 - ~90 km and in some cases reaches ~10 dB at altitudes from 90 to 95 km. A method for determining the vertical profiles of the absorption coefficient by solving the inverse problem of radiosondeing in the lower ionosphere of the Earth is proposed. The absorption layers in individual sessions caused by powerful bursts of X-ray radiation and strong changes in geomagnetic conditions during the storm were reliably identified. It was found that at altitudes from 90 to 100 km, the value of the absorption coefficient of DM radio waves reached values $(5.69 \pm 1.35) \cdot 10^{-3} \text{ dB/km}$.

Keywords: radio occultation measurements, signal intensity fluctuations, absorption coefficient of DM-radio waves, high latitude ionosphere

Введение

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 – МЕТЕОР, GPS – FORMOSAT-3/COSMIC и другие. По результатам анализа параметров радиоволн в этих экспериментах, проведенных в разных районах ионосферы и атмосферы Земли, исследована динамика и определены высотные характеристики ионосферы и атмосферы Земли [1-4]. Известно, что возмущения в ионосфере полярных районов сильно зависят от активности Солнца. Следовательно, эти возмущения должны оставлять свой отпечаток на параметрах радиоволн, прошедших через полярную ионосферу. Принято считать, что осуществляется радиозондирование полярной ионосферы, если географическая широта точки наибольшего приближения радиотрассы к поверхности Земли была около 70° и выше [1].

Корональные выбросы массы (Coronal Mass Ejection - CME) в сторону Земли (один гигантский и несколько небольших выбросов) произошли летом 2015 года (22 июня). Данное событие было зафиксировано многими космическими аппаратами, такими как SOHO (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/index.html), ACE[5] и ионосферными станциями [6,7]. Корональные выбросы массы сопровождалось мощными потоками рентгеновского излучения, что было зарегистрировано космическими аппаратами GOES-13, -15, находящимися на геостационарной орбите [8]. Эти выбросы спровоцировали на Земле сильную магнитную бурю класса G4 ($G4 = Kp - 4$). В ночь с 22 на 23 июня жители России наблюдали полярное сияние даже на широтах Москвы ($\sim 55^\circ N$) и Волгограда ($\sim 49^\circ N$) (<https://www.kp.ru/daily/26396/3273894/>).

В распоряжении авторов находятся результаты измерений параметров ДМ-радиоволн (частота 1575.42 МГц), излучаемых передатчиками спутников навигационной системы GPS и регистрируемых приёмниками на борту низкоорбитальных спутников FORMOSAT-3/COSMIC в июне 2015 [9,12]. Данные зондирования на больших прицельных высотах проводились с малой частотой выборок (1 Гц), а когда прицельная высота радиотрассы достигала ~ 130 км, начинались измерения с большой частотой выборок – 50 Гц. Анализ показал, что в период с 22 по 23 июня на больших прицельных высотах (более 130 км) в данных зондирования заметных флуктуаций интенсивности радиоволн, возможных из-за влияния CME, не обнаружено. На высотах ниже 110 км при анализе высотных профилей интенсивности радиоволн наблюдались сильные флуктуации. В работе [9] отмечено, что эти флуктуации интенсивности могли возникнуть из-за поглощения радиоволн на высотах ниже 100 км во время геомагнитной бури.

Целью данной работы является получение высотных профилей коэффициента поглощения ДМ-радиоволн на высотах от 50 до 110 км во время геомагнитной бури решением обратной задачи зондирования.

Поглощение дециметровых радиоволн в нижней ионосфере Земли

О небольшом поглощении (до -1 dB) радиоволн, которое можно было заметить в данных на GPS-частотах (длина волны ~ 19 см), упомянуто в работе [2]. Наиболее характерными особенностями высокоширотной ионосферы (*D*-область) является специфическое поглощение радиоволн в полярной шапке (ППШ), связанное с вторжением протонов с энергиями в десятки МэВ и аномальное авроральное поглощение, связанное с высыпаниями электронов. В периоды солнечных вспышек, направленных в сторону Земли, за счёт 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, наблюдаемое в зоне полярных сияний в периоды магнитосферных бурь и суббурь,

связывают с высыпанием заряженных частиц (в основном, электронов с энергиями 20–100 кэВ) из магнитосферы в нижнюю ионосферу Земли [11].

Поглощение радиоволн в нижней ионосфере обусловлено столкновениями электронов с ионами и нейтральными молекулами [10, 11]. Из-за этого часть энергии, сообщаемая электромагнитным полем электронам, расходуется на увеличение энергии хаотического движения частиц плазмы и приводит к нагреву плазмы. При каждом ударе электрон в среднем передает иону или молекуле импульс $m \cdot dr/dt$, где dr/dt – упорядоченная скорость электрона под действием поля. Если ν эффективное число соударений электрона в секунду, то за единицу времени импульс электрона меняется на величину $m \cdot \nu \cdot dr/dt$. Изменение импульса за счет соударений эквивалентно действию некоторой силы трения.

Методика решения обратной задачи радиозондирования нижней ионосферы

Экспериментальные данные нормированной мощности радиоволн $P(h) = \frac{I(h)}{I_0}$ сначала отфильтрованы методом скользящего среднего по пятидесяти точкам и получены кривые $\Theta(h)$. При вертикальной скорости опускания луча в ионосфере ~ 2 км/сек, это соответствует усреднению по ~ 2 км по вертикали. При таком усреднении не теряется информация о мелкомасштабной структуре ионосферы, поскольку вертикальное разрешение для анализа методами геометрической оптики величина $2 \cdot \sqrt{\lambda \cdot s}$ в случае зондирования атмосферы по схеме LEO–GPS равна 1.5 км, где λ длина волны (~ 19 см), s – расстояние от LEO до атмосферного лимба (~ 3000 км). В геометрической оптике считается, что два физических луча (вместе с их френелевскими объёмами) являются различимыми, если они не пересекаются друг с другом.

Кривые $\Theta(h)$ в децибелах ($\Theta_{дВ}(h)$) изображены на левых панелях рисунков 1, 2 в виде толстых сплошных линий красного цвета. Видны достаточно сильные падения мощности ДМ-радиоволн (от -3 дБ до -10 дБ). Провалы мощности сигнала возникли, возможно, из-за поглощения ДМ-радиоволн в этих областях ионосферы Земли. Анализ данных об эйконе и вычисление профилей рефракционного ослабления для выбранных сеансов показали, что регулярное рефракционное ослабление в них не наблюдается. Это подтверждает высказанную гипотезу о поглощении ДМ-радиоволн.

Представим ионосферу на прицельных высотах h от 110 км до 50 км от поверхности Земли, состоящей из n вложенных сферически симметричных слоёв с центром в центре Земли. При распространении через слоистую ионосферу поток радиоволн испытывает ослабление:

$$\Theta(h) = \exp\left(-\int_s Z \cdot dL\right) = \exp\left(-\sum_{j=1}^i L_{ij} \cdot Z_i\right), \text{ где } i = 1 \dots n.$$

Выразим $\Theta(h)$ в децибелах и развернём указанную формулу:

$$\Theta_{дВ}(h_i) = 10 \cdot \lg(\Theta(h_i)) = -10 \cdot \lg(e) \cdot \begin{bmatrix} L_{11} & & & & & & & & \\ L_{21} & L_{22} & & & & & & & \\ \dots & \dots & \dots & & & & & & \\ L_{i1} & L_{i2} & \dots & L_{ij} & \dots & L_{ii} & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & & & \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{nj} & \dots & \dots & & & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \vdots \\ Z_i \\ \vdots \\ Z_n \end{bmatrix},$$

где $e = 2.71828$; $i = 1 \dots n$, $j = 1 \dots i$; Z_i – коэффициент поглощения в слое i .

L_{ij} при $i \neq j$ – длина отрезка траектории зондирующего луча между слоями $j-1$ и j :

$$L_{ij} = 2 \cdot \left[\sqrt{(R + h_{j-1})^2 - (R + h_i)^2} - \sqrt{(R + h_j)^2 - (R + h_i)^2} \right];$$

а L_{ij} при $i = j$ – длина отрезка траектории зондирующего луча в слое i :

$$L_{ii} = 2 \cdot \sqrt{(R + h_{i-1})^2 - (R + h_i)^2};$$

R - средний радиус Земли ($R = 6371$ км).

В этом случае коэффициент поглощения Z_i в каждом слое определяется как:

$$Z_i = \frac{-\frac{\Theta_{dB}(h_i)}{4.343} - \sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} \cdot Z_j}{L_{ii}},$$

Таким образом, определяется вертикальный профиль $Z(h)$ - профиль поглощения радиоволн с масштабом высоты ~ 2 км. Оценивается погрешность восстановления высотного профиля коэффициента поглощения $-\delta Z$ для каждого сеанса радиозондирования. Профили $Z(h)$ представлены на рисунках 1 и 2 на правых панелях. Величины δZ на рисунках указаны в виде вертикальных отрезков. Экспериментальные кривые $P(h)$ с ярко выраженными особенностями, полученные 22 и 23 июня 2015г., отражены на левых панелях рисунков 1, 2 в виде серых тонких сплошных линий. На рисунках для каждого сеанса указаны широты и долготы зондируемых районов, время проведения эксперимента, пара космических аппаратов, с которой проводилось радиозондирование ионосферы.

Проверка соответствия полученных профилей поглощения радиоволн экспериментальным данным проводилась решением прямой задачи радиозондирования для слоёв с шириной ~ 2 км. Рассчитанная мощность потока радиоволн $P_{DP}(h)$ равна:

$$P_{DP}(h) = -(\sum_{j=1}^{i-1} L_{ij} \cdot Z_j + L_{ii} \cdot Z_i) \cdot 4.343.$$

Полученные кривые $P_{DP}(h)$ изображены на левых панелях рисунков 1, 2 в виде сплошных линий синего цвета с точками.

Результаты

Решением обратной задачи радиозондирования были найдены вертикальные профили коэффициента поглощения ДМ-радиоволн в нижней ионосфере Земли. Определены погрешности восстановления профилей коэффициента поглощения радиоволн в ионосфере. Анализ полученных результатов показывает, что геомагнитные условия и мощные всплески потоков рентгеновского излучения оказывали сильное влияние на распространение радиоволн в **E** и **D** слоях ионосферы во время шторма.

Проверка полученных результатов путём решения прямой задачи радиозондирования показала хорошее соответствие между расчётными и экспериментально полученными данными:

$$P_{DP}(h) \approx \Theta_{dB}(h).$$

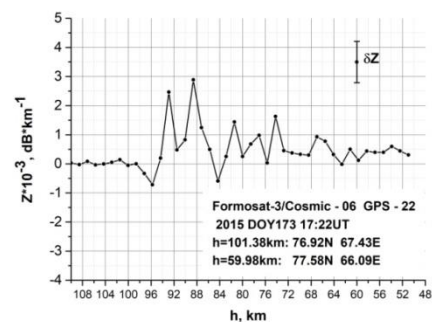
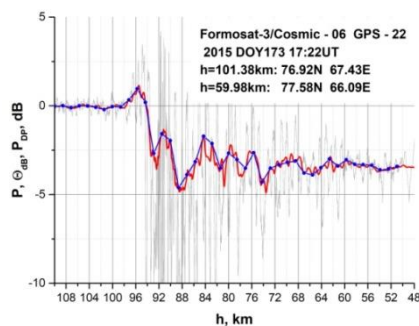
Из данных, приведенных на рис. 1 и 2 видно, что на высотах от ~ 100 км до ~ 70 км в ионосфере наблюдаются сильные возмущения мощности ДМ-радиоволны. Надёжно идентифицированы слои поглощения в отдельных сеансах (рис. 1, панели а, b и с), обусловленные мощными всплесками рентгеновского излучения и сильными изменениями геомагнитных условий во время бури. Максимальные значения коэффициента поглощения радиоволн и высот в слоях, на которых найдены эти коэффициенты, приведены в таблице 1.

Наибольшее значение коэффициента поглощения зафиксировано в сеансе парой спутников FORMOSAT-3/COSMIC-1 – GPS-30 22 июня 2015г. в 19.41: $Z_{max} = 5.69 \cdot 10^{-3}$ dB/km на высоте 91.77 км. Следует заметить, что в этот период времени геостационарные спутники GEOS-13 и -15 зафиксировали мощный поток рентгеновского излучения в

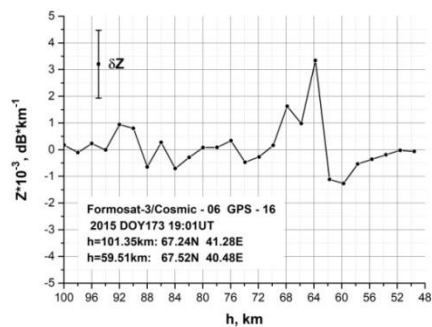
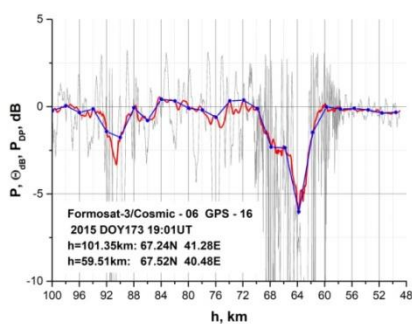
сторону Земли [8]. Необходимо также отметить, что поглощение радиоволн в паре спутников FORMOSAT-3/COSMIC - 5 – GPS-4 22 июня 2015г. в 23.00 наблюдалось даже на высотах около ~ 45 км: $Z_{\max} = 1.21 \cdot 10^{-3}$ dB/km на высоте 45.36 км.

Наличие на трассе распространения ДМ-радиоволны слоя с коэффициентом поглощения $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ dB/km (рис. 1 а) или $\sim 5 \cdot 10^{-3}$ dB/km (рис. 1 с) в слое шириной ~ 10 км (наприцельных высотах около 96 - 86 км) приводит к падению мощности радиоволны от ~ 5 dB до ~ 10 dB. Затем, по мере опускания трассы ниже, уровень мощности радиоволны не возвращается на исходный уровень, а остаётся на уровне ~ 3 dB до высоты ~ 48 км. Присутствие на трассе более узкого слоя ~ 7 км (наприцельных высотах около 69 - 62 км) с коэффициентом поглощения $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ dB/km (рис. 1 б) приводит к падению мощности радиоволны до ~ 6 dB с возвратом на исходный уровень, что возможно после прохождения трассой радиоволны указанного слоя.

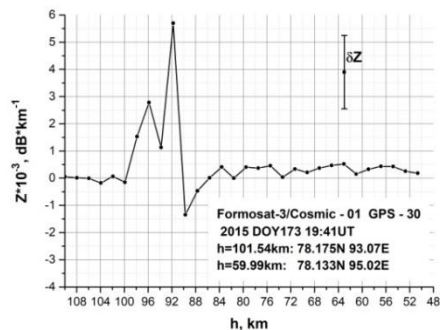
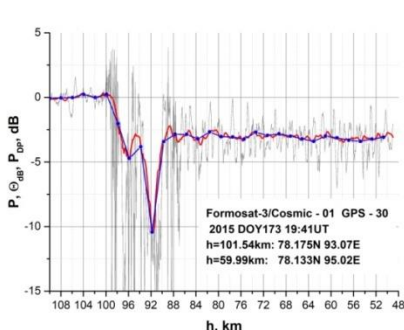
а)



б)



с)



д)

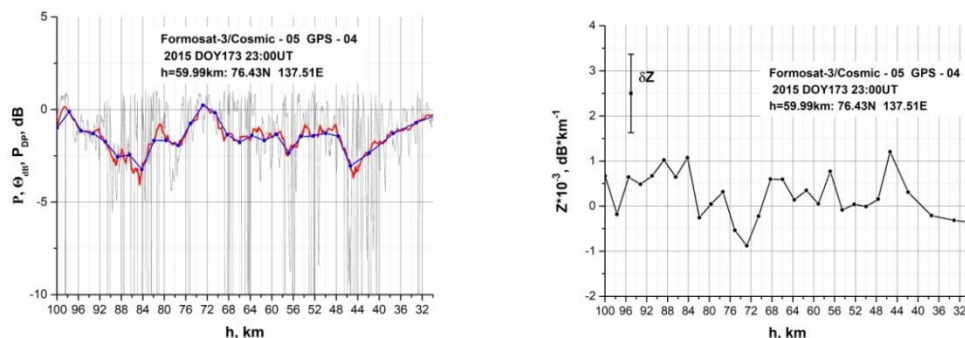
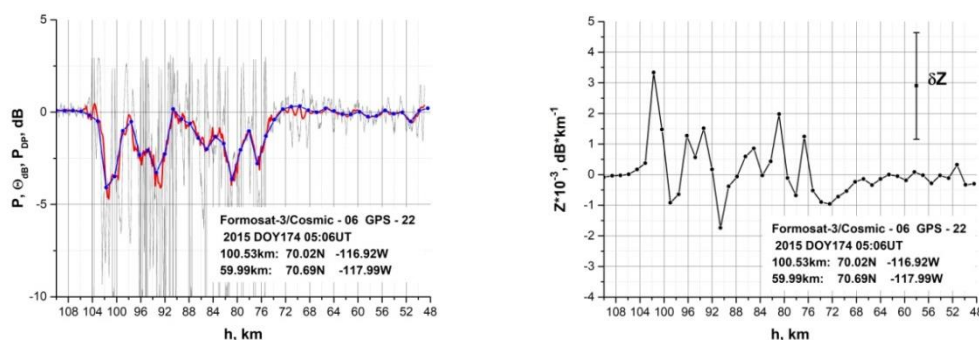


Рис. 1. Профили: нормированной мощности - $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации $-\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования - $P_{DR}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$ за 22 июня 2015г.

a)



b)

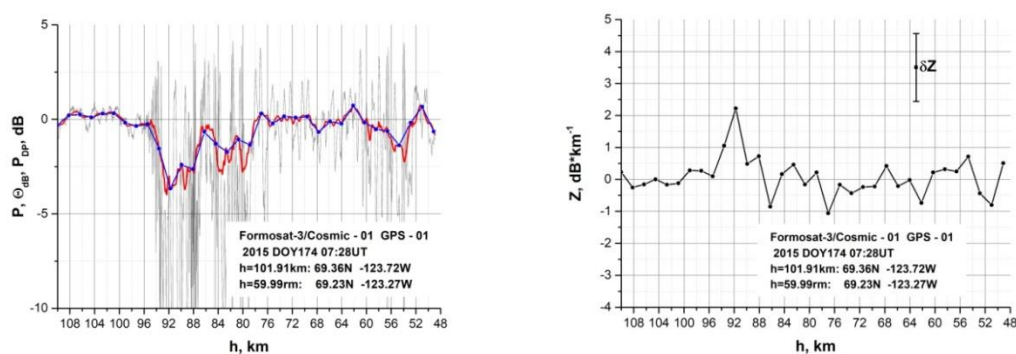


Рис. 2. Профили: нормированной мощности - $P(h)$, нормированной мощности после фильтрации $-\Theta_{dB}(h)$, нормированной мощности из решения прямой задачи радиозондирования - $P_{DR}(h)$ и коэффициента поглощения ДМ-радиоволн $Z(h)$ за 23 июня 2015г.

Таблица 1. Диапазон высот, на которых наблюдалось поглощение ДМ-радиоволн, значения высот - h_{\max} и соответствующие им максимальные величины коэффициента поглощения - $Z_{\max}(h)$

DOY	LEO №	GPS №	UT	LatandLong (h~60 km)	absorbtion's region, km	h_{\max} , km	$(Z_{\max}(h) \pm \delta Z) \cdot 10^{-3}$, dB/km
173	6	22	17.22	77.58°N 67.42°E	96 - 72	92.90	2.47±0.71
						88.61	2.89±0.71
						81.42	1.44±0.71
						74.22	1.63±0.71
173	6	16	19.01	67.52°N 40.48°E	70 - 62	67.84	1.62 ±1.27
						63.78	3.34 ±1.27
173	1	30	19.41	78.13°N 95.02°E	100 – 91	95.84	2.78±1.35
						91.77	5.69±1.35
173	5	4	23.00	76.43°N 137.51°E	99 - 43	88.69	1.02±0.87
						84.17	1.07 ±0.87
						45.36	1.21 ± 0.87
174	6	22	05.06	70.69°N -117.99°W	104 - 74	101.70	3.34±1.74
						80.81	1.97 ± 1.74
174	1	1	07.28	69.23°N -123.27°W	95 - 79	91.75	2.23±1.06

Заключение

По результатам анализа радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC обнаружено поглощение ДМ-радиоволн (длина волны ~19 см) в нижней высокоширотной ионосфере Земли. Величина максимального поглощения составляет ~3 dB в интервале 60–90 км и в отдельных случаях достигает ~10 dB на высотах от 90 до 95 км.

Предложена методика определения вертикальных профилей коэффициента поглощения путём решения обратной задачи радиозондирования в нижней ионосфере Земли.

Надёжно идентифицированы слои поглощения в отдельных сеансах, обусловленные мощными всплесками рентгеновского излучения и сильными изменениями геомагнитных условий во время бури.

Найдено, что на высотах от 90 до 100 км величина коэффициента поглощения ДМ-радиоволн достигала значений $(5.69 \pm 1.35) \cdot 10^{-3}$ dB/km.

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

Литература

1. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. – 208 с. ISBN 978-5-397-04369-4
2. Горбунов М.Е. Радиозатменное зондирование атмосферы. Глава 4 в книге: Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере. 2017. Москва. ООО Издательство «ГЕОС». С.407–457.
3. 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. No.7.P.1702–1716.doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
4. Губенко В.Н., Кириллович И.А. Модуляция спорадических E-слоев мелкомасштабными атмосферными волнами в высокоширотной ионосфере Земли // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 116–129, doi: 10.12737/szf-53201912.

5. Reiff P.H., Daou A.G., Sazykin S.Y. et al. Multispace craft observations and modeling of the 22/23 June 2015 geomagnetic storm // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P.7311–7318, doi:10.1002/2016GL069154.
6. 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,doi:10.1002/2017JA024174.
7. Mansilla G.A. Ionospheric Response to the Magnetic Storm of 22 June 2015 // *Pure and Applied Geophys.* 2018. V. 175. P. 1139–1153,doi:10.1007/s00024-017-1741-5.
8. Архив данных по космической погоде. URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>
9. Andreev V.E., Gubenko V.N., Pavelyev A.A., Kirillovich I.A., Gubenko T.V. Absorption of decimetre radio waves in the Earth's high-latitude ionosphere during a geomagnetic storm in June 2015 // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020. 1632 012008, doi:10.1088/1742-6596/1632/1/012008
10. Колосов М.А., Арманд Н.А., Яковлев О.И. Распространение радиоволн при космической связи. М.: Издательство «Связь». 1969. – 155 с.
11. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Издательство «Наука». 1988. –518 с. ISBN 5-02-000716-1
12. Яковлев О.И., Матюгов С.С., Павельев А.А. // *Известия вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62. № 3. С. 194–204.