

РАДИОФИЗИКА

УДК 629.056Ю8:537.876

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).55-68

Поступила в редакцию / Received 11.03.2025

ГРНТИ 47.43.15+29.35.19

Специальность ВАК 1.3.4.

Принята к публикации / Accepted 28.03.2025

Научная статья

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ НА РАБОТУ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Сюсюка Е. Н., Писарева П. М.

Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова (Новороссийск, Россия)

Аннотация. Солнечная активность оказывает влияние на работу спутниковых систем, в том числе GPS. При этом самым значимым слоем для работы спутниковых систем является ионосфера, характеризующаяся электронной концентрацией, температурой и ионным составом. Цель работы – рассмотреть зависимость между активностью Солнца, ионосферными возмущениями и качеством связи; характеристики ионосферы, критическую частоту слоя F2 во время солнечной активности. Для получения результатов исследования были использованы методы анализа методик детектирования солнечных вспышек, ионограмм отражений высокочастотных импульсных сигналов, генерируемых ионозондами, а также обработки данных методами программирования. Данные для анализа Солнечной активности получены на сайте Лаборатории солнечной астрономии и гелиофизического приборостроения ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН. Для определения критической частоты слоев ионосферы использовались ионограммы, представленные на сайте института прикладной геофизики имени Е. К. Фёдорова. Посредством программирования на Python, с использованием библиотек matplotlib, pandas и numpy, были построены графики изменения критической частоты в течение суток. Представлены оригинальные программы для обработки данных. Получены графики изменения критической частоты слоя F2. Проанализированы состояния ионизации атмосферы, в зависимости от Солнечной активности. Представлен анализ изменения критической частоты слоя F2 за период, совпадающий с наибольшей солнечной активностью. Ионограммами подтверждено образование спорадического слоя в тот же период. Результаты анализа показали, что качество работы GPS в условиях магнитных бурь снижается, учащение сбоев навигационного сигнала наблюдается на главной фазе магнитной бури при максимальной возмущенности геомагнитного поля.

Ключевые слова: ионосфера, электромагнитные волны, распространение радиоволн, ионограммы, солнечные вспышки, атмосферное возмущение.

Для цитирования: Сюсюка Е. Н., Писарева П. М. Анализ влияния вспышек на солнце на работу спутниковых систем // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 55–68. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).55-68

Research Article

ANALYSIS OF THE EFFECT OF SOLAR FLARES ON THE OPERATION OF SATELLITE SYSTEMS

Syusyuka E. N., Pisareva P. M.

Admiral Ushakov Maritime State University (Novorossiysk, Russia)

Abstract. Solar activity affects the operation of satellite systems, including GPS. At the same time, the most significant aspect for the operation of satellite systems is the ionosphere, characterized by electron concentration, ionic composition, and temperature. The purpose of the research is to consider the dependence between the solar activity, ionospheric disturbances and the quality of satellite communication; characteristics of the ionosphere, the critical frequency of the F2 layer during solar activity. To obtain the results of the study, we have used the following methods: analysis of methods for detecting solar flares, ionograms of reflections

of high-frequency pulse signals generated by ionosondes, data processing by programming methods. Data for the analysis of solar activity were obtained on the website of the Laboratory of Solar Astronomy and Heliophysical Instrumentation of the SRI RAS and the ISTP the RAS Siberian branch. Ionograms presented on the website of the E. K. Fedorov Institute of Applied Geophysics were used to determine the critical frequency of the ionosphere layers. Through Python programming, using matplotlib, pandas and numpy libraries, graphs of critical frequency changes during the day were constructed. Original programs for data processing are presented in the paper. We have obtained graphs of changes in the critical frequency of the F2 layer, analyzed the states of atmospheric ionization, depending on solar activity. The analysis of the change in the critical frequency of the F2 layer over the period coinciding with the greatest solar activity is likewise presented in the paper. Ionograms have confirmed the formation of a sporadic layer in the same period. The results of the analysis show that the quality of GPS operation in conditions of magnetic storms decreases, an increase in navigation signal failures can be observed in the main phase of a magnetic storm with maximum disturbance of the geomagnetic field.

Keywords: *ionosphere, electromagnetic waves, radio waves propagation, ionograms, solar flares, atmospheric disturbance.*

For citation: Syusyuka E. N., Pisareva P. M. Analysis of the effect of solar flares on the operation of satellite systems // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 55–68. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139). 55-68

Введение

На работу спутниковых систем, в том числе GPS, оказывает влияние солнечная активность, так как радиоволны преломляются при переходе из одной среды в другую с различными оптическими плотностями. Верхняя область земной атмосферы, расположенная между стратосферой и радиационным поясом и характеризующаяся тем, что атмосферные газы в ней частично или полностью ионизированы, называется ионосферой. Основными параметрами ионосферы являются электронная концентрация, температура и ионный состав [1].

Параметры зависят от высоты, степени ионизации, времени суток и года. Ионосфера – неоднородная среда, которую принято подразделять на три высотные области: D, E и F [2]. Слой F2 – это верхний слой ионосферы, который является самым плотным и наиболее ионизированным из всех слоев ионосферы. Он находится на высоте примерно от 200 до 1000 км над поверхностью Земли и является частью термосферы, самого верхнего слоя атмосферы. Термосфера – это верхний слой атмосферы Земли, который находится выше мезосферы и становится частью ионосферы на более высоких высотах. Термосфера начинается примерно на высоте 80–85 км и расширяется до нескольких сотен километров над поверхностью Земли. Название «термосфера» происходит от греческого слова «thermos», что означает «теплый». На самом деле, температура в термосфере может достигать нескольких тысяч градусов Цельсия из-за интенсивного взаимодействия атомов и молекул солнечного излучения.

Сигнал GPS проходит через ионосферу, подвергается воздействию ионосферной плазмы, что приводит к эффектам, аналогичным преломлению лучей света в оптике. Это приводит к изменению скорости распространения сигнала и искажениям в фазе и амплитуде сигнала GPS, что может повлиять на точность определения местоположения приемника.

Критическая частота слоя F2 в ионосфере – это минимальная радиочастота, при которой электромагнитные волны отражаются от данного слоя. Она зависит от различных факторов, включая уровень солнечной активности, времени суток, географического положения и сезонных изменений. Связь между критической частотой и плотностью частиц в ионосфере достаточно проста: чем выше плотность заряженных частиц в ионосфере, тем ниже критическая частота. С повышением уровня ионизации увеличивается плотность электронов и положительно заряженных ионов, что влияет на электрические и оптические свойства ионосферы и, как следствие, на ее высоту.

Солнечные вспышки оказывают влияние на околоземное космическое пространство и оболочку Земли [3]. Они относятся к сильным проявлениям солнечной активности, вызывающим увеличение жесткого ультрафиолета. Воздействие на магнитосферу провоцирует магнитные возмущения, при этом возрастает уровень ионизации атмосферы. Возмущения в ионосфере оказывают негативное влияние на распространение радиоволн различных частотных диапазонов [4]. Параметр, используемый для количественной оценки солнечной активности, основанный на наблюдаемом числе активных солнечных пятен – число Вольфа:

$$W = k(f + 10g),$$

где f – число всех отдельных пятен, в данный момент наблюдаемых на солнечном диске;
 g – число наблюдаемых групп пятен;
 k – нормированный коэффициент.

Данная характеристика используется для отслеживания циклических изменений солнечной активности, определения солнечных циклов и прогнозирования солнечных вспышек и их воздействия на Землю. Число Вольфа не отражает количество энергии, поступившей в атмосферу при определенном солнечном возмущении. По степени рентгеновского излучения вспышки классифицируют на A, B, C, M и X. Первые два класса представляют собой менее интенсивные солнечные вспышки, имеют минимальное воздействие на земную атмосферу. Класс C относится к наиболее распространенным вспышкам, характеризуется меньшей интенсивностью и воздействием. Солнечные вспышки класса M относятся к умеренно интенсивным вспышкам. Они имеют меньшую интенсивность по сравнению с классом X, но все же могут вызывать радиационные штормы в верхних слоях атмосферы Земли.

Солнечные вспышки и корональные выбросы массы от Солнца могут генерировать направленные потоки заряженных частиц и магнитные поля, которые взаимодействуют с магнитосферой Земли, вызывая геомагнитные бури.

Во время солнечных хромосферных вспышек происходит повышение радиации всех видов, возрастает уровень электронной концентрации: в области D ионосферы – до нескольких порядков, в E – до 50–200%, в F-области – на 10–30% [5].

Отклик верхней атмосферы Земли на геомагнитные возмущения представляет собой сложный комплекс разнообразных явлений, включающий изменения нейтрального состава термосферы и системы циркуляции ионосферных ветров, генерацию крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений, выпадения высокоэнергичных частиц в полярной области, проникновение магнитосферных токов и т. д. [6–9].

Каждая геомагнитная буря является уникальным явлением, которому могут быть свойственны различные характеристики [10].

Цель исследования – рассмотреть зависимость между активностью Солнца, ионосферными возмущениями и качеством связи; характеристики ионосферы, критическую частоту слоя F2 во время солнечной активности.

Методика исследований

В данной работе мы проводим анализ методик детектирования солнечных вспышек, ионограмм отражений высокочастотных импульсных сигналов, генерируемых ионозондами, и обработку данных методами программирования.

5 ноября 2023 года в южных регионах России наблюдалось полярное сияние. Оно было вызвано магнитной бурей интенсивности G2, которая усилилась до G3 к вечеру. По свидетельствам очевидцев, вечернее небо резко окрасилось в насыщенный красный цвет, иногда с вкраплениями зеленого. Продолжалось явление около 10 минут, после чего свечение постепенно начинало тускнеть.

Сообщения о полярном сиянии поступали из Таганрога, Горячего Ключа, Апшеронского района, станций Петровской и Черноерковской. В Краснодаре и других крупных населенных пунктах его видно не было из-за городского светового излучения.

Полярное сияние является результатом взаимодействия заряженных частиц, выброшенных Солнцем, с магнитосферой Земли. Эти потоки частиц вызывают свечение в верхних слоях атмосферы. Появление северного сияния на юге, включая российские территории, может быть связано с очень активным возмущением магнитосферы Земли в определенных атмосферных условиях.

Проанализированы данные о солнечной активности и возмущениях магнитного поля лаборатории солнечной астрономии ИКИ и ИСЗФ (рисунки 1, 2).

По данным спутника GOES-16 за 4–7 ноября 2023 года представлены диаграммы рентгеновского излучения Солнца и состояния магнитосферы Земли. Классификация и детектирование солнечных вспышек осуществляется с помощью системы геостационарных спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) по потоку излучения в рентгеновском диапазоне [11–13]. Уровни солнечных вспышек классифицируются по пиковому потоку, измеряемому в $[Вт/м^2]$, где самый мощный уровень вспышки обозначается буквой X и его значение превышает $10^{-4} Вт/м^2$ [14].

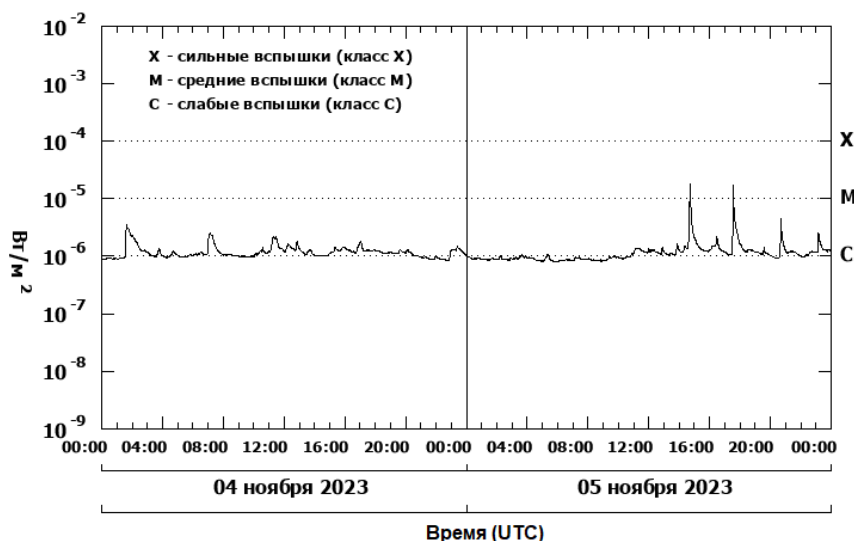


Рисунок 1. Солнечная активность в период 4–5 ноября

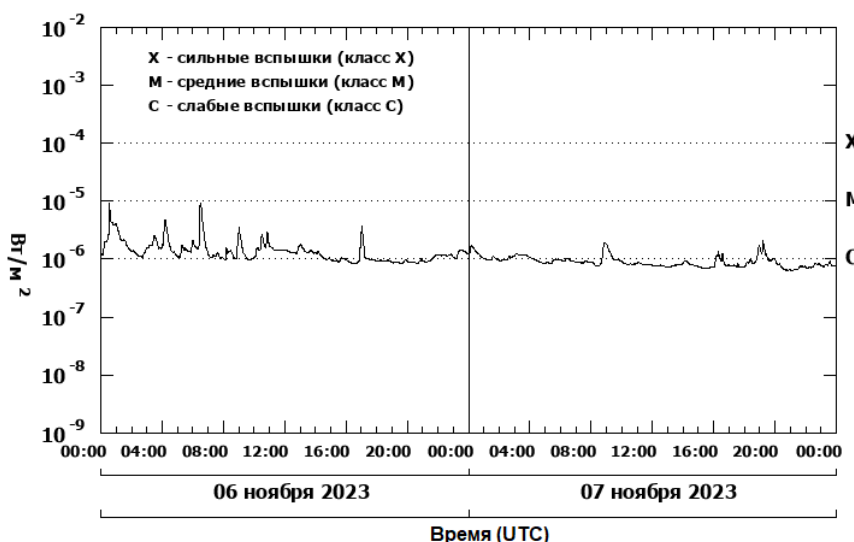


Рисунок 2. Солнечная активность в период 6–7 ноября

В работе также рассмотрены ионограммы (рисунок 3), имеющиеся в открытом доступе на сайте института прикладной геофизики имени Е. К. Фёдорова.

Ионограммы регистрируют следы отражений высокочастотных импульсных сигналов, генерируемых ионозондами. Ионограммы на сайте института прикладной геофизики имени Е. К. Фёдорова обновляются каждые 15 минут. Для построения графика изменения критической частоты в течение суток необходимо обработать массив данных, состоящий из 96 элементов. Для этого воспользуемся языком программирования Python и библиотеками matplotlib, pandas и numpy. Программа, необходимая для обработки данных, представлена ниже (рисунок 4).

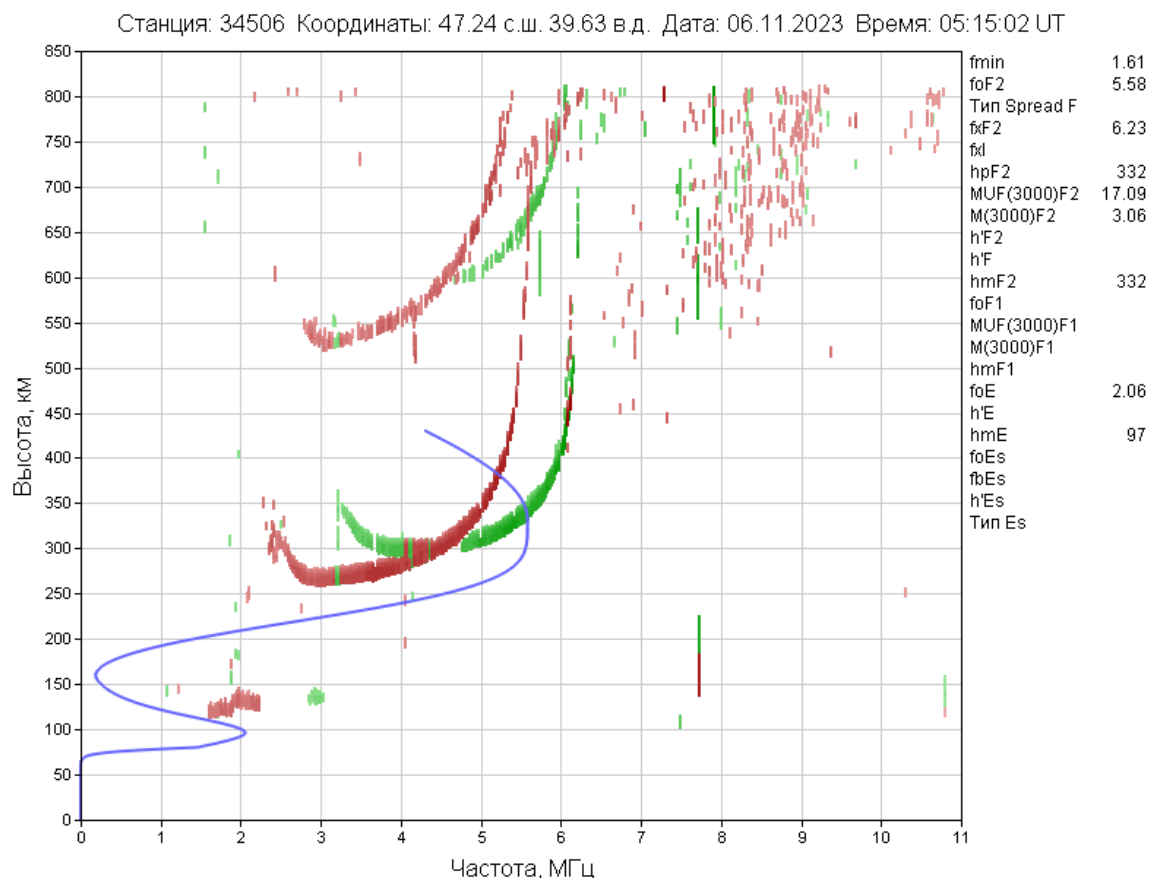


Рисунок 3. Ионограмма

```
import matplotlib.pyplot as plt
import pandas as pd
import numpy as np

# Создание данных с временными метками с периодом в 15 минут за час
time = pd.date_range('2023-11-04', periods=96, freq='15T')
# Данные временных меток с интервалом в 15 минут за час
values = []

# Создание графика
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(time, values, marker='o', color='b', linestyle='-', linewidth=2)

# Настройка осей и названий
plt.xlabel('Время, ч')
plt.ylabel('Критическая частота, МГц')
plt.title('Изменение критической частоты слоя F2 4.11.2023')
plt.xticks(rotation=45)

# Формат времени на оси X в формате час: минута
plt.gca().xaxis.set_major_formatter(plt.matplotlib.dates.DateFormatter('%H:%M'))

# Отображение графика
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Рисунок 4. Программа для обработки данных

Результаты и их обсуждение

В результате анализа данных солнечной активности, ионограмм и при помощи программы мы получили графики изменения критической частоты слоя F2 (рисунки 5–8).

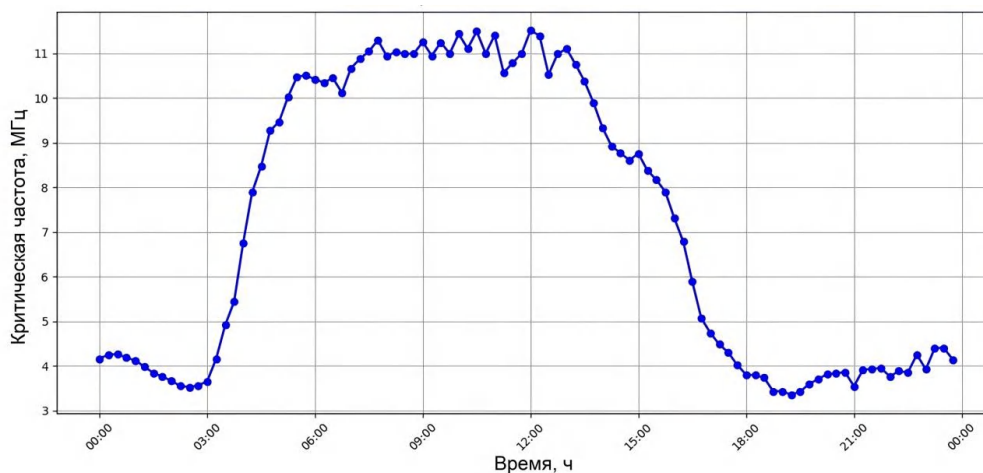


Рисунок 5. Изменение критической частоты слоя F2 для даты 4.11.2023

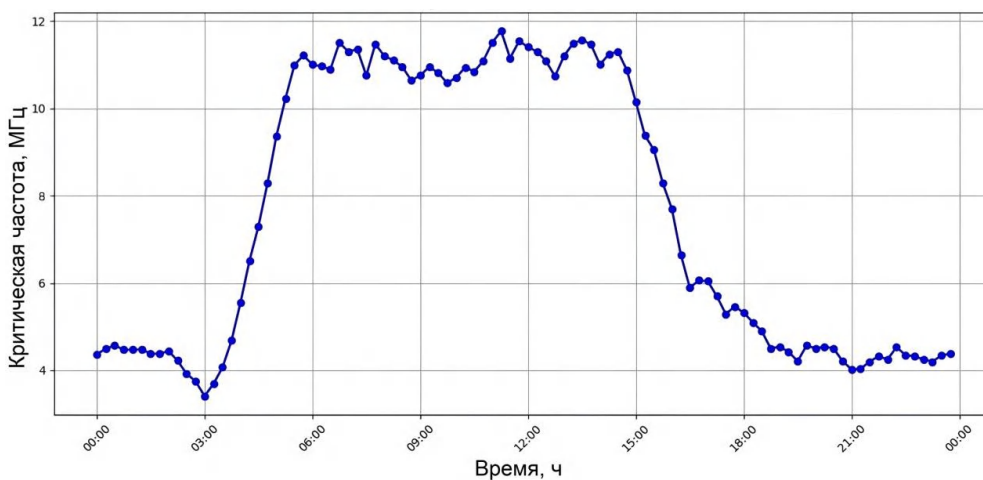


Рисунок 6. Изменение критической частоты слоя F2 для даты 5.11.2023

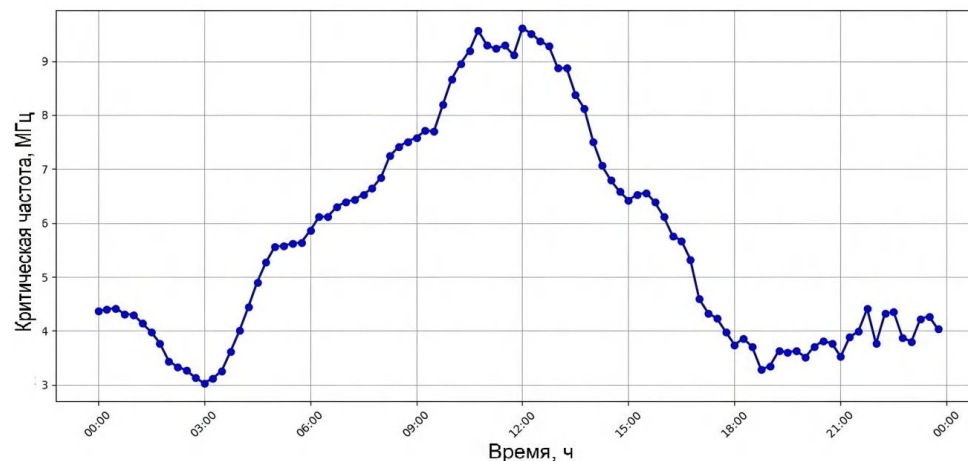


Рисунок 7. Изменение критической частоты слоя F2 для даты 6.11.2023

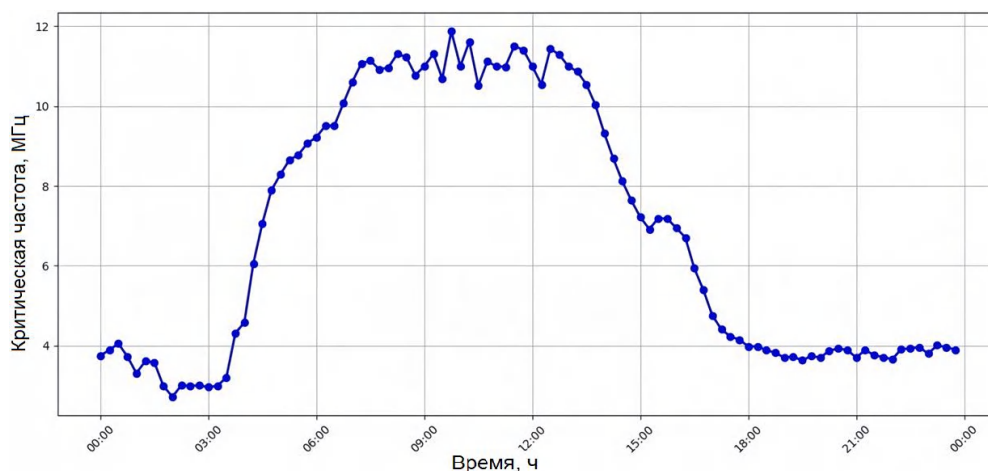


Рисунок 8. Изменение критической частоты слоя F2 для даты 7.11.2023

Анализ графиков показывает, что в первый день наблюдений были зафиксированы слабые солнечные вспышки класса C, во второй и третий день – средние солнечные вспышки класса M. В четвертый день произошло уменьшение солнечной активности, были зафиксированы слабые солнечные вспышки. Для предсказания космической погоды: о величине предсказываемой магнитной бури можно судить по классу солнечной вспышки только после того, как был зарегистрирован ассоциированный с ней выброс корональной массы,двигающийся в сторону Земли. Корональные выбросы массы сопровождаются испусканием потоков ускоренных заряженных частиц (электронов и протонов). Если ось распространения потока частиц совпадает с направлением на Землю, то самые энергичные частицы (с энергией 10^8 – 10^9 эВ) приходят к Земле спустя ~ 10 мин [15]. В отдельных случаях отклик на достаточно сильную по интенсивности рентгеновского излучения вспышку может практически не проявиться. При современных методах сопоставления солнечных явлений с геомагнитными бурями лишь небольшая часть вспышек имеет реальные причинно-следственные связи с соответствующими бурями [16].

Анализ состояния магнитосферы (рисунок 8) показывает, что солнечная активность в период с 16 часов дня 5 ноября по 12 часов 6 ноября вызвала магнитную бурю класса G3. В течение 6 ноября магнитосфера оставалась в возбужденном состоянии. С 7 ноября магнитосфера спокойна. В соответствии с результатами работы [17, 18] известно, что на главной фазе магнитной бури при максимальной возмущенности геомагнитного поля происходит учащение сбоев навигационного сигнала.

Построенные диаграммы отображают ход изменения критической частоты слоя F2 и отражают тот факт, что с ростом солнечной активности уменьшается критическая частота. В таблице 1 зафиксированы максимальные значения критической частоты, время её наблюдения и высота.

Таблица 1. Анализ изменения критической частоты слоя F2

Показатели Даты	Частота, МГц	Время	Высота, км
04.11.2023	11,52	12:00	288
05.11.2023	11,77	11:15	331
06.11.2023	9,61	12:00	293
07.11.2023	11,88	9:45	303

После солнечных вспышек класса М, которые были замечены в период с 16 часов дня 5 ноября по 12 часов 6 ноября, 6 ноября наблюдалось уменьшение критической частоты на 2,16 МГц. На следующий день, когда солнечная активность снизилась, произошло повышение критической частоты и высоты. Это выражается в изменении кривой хода критической частоты слоя F2.

Характерно появление спорадического слоя Es между 90 и 150 км над поверхностью Земли. Он является очень тонким, но имеет большую электронную плотность. Причинами появления этого слоя являются метеорные потоки, динамические ионосферные возмущения, геомагнитная активность [19]. Графики показывают изменение критической частоты спорадического слоя и его существование в данный момент времени (рисунки 9–12). В первый день наблюдений спорадический слой был замечен 29 раз, во второй – 19 раз, в четвертый – 24 раза. Самое большое количество изменений критической частоты спорадического слоя было зафиксировано в третий день наблюдений – 6 ноября, данная область ионосферы претерпевала изменения 46 раз в течение суток с периодом повторения приблизительно пятнадцать минут.

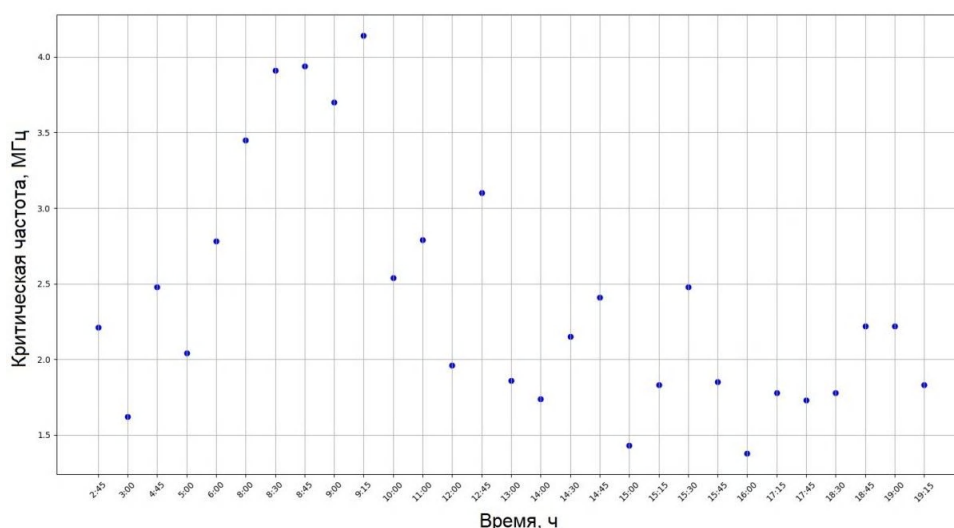


Рисунок 9. Изменение критической частоты слоя Es для даты 4.11.2023

Анализ влияния неоднородностей ионосферы на распространение радиоволн показывает, что, в зависимости от диэлектрической проницаемости воздуха в определенных частях ионосферы, происходит изменение траектории радиоволн,

преломление, отражение, рассеяние, поглощение, «расщепление» радиолуча на обыкновенный и необыкновенный, эффект Фарадея, изменение фазовой скорости [20]. Определена максимально применимая – критическая – частота слоя ионосферы, при которой еще происходит отражение радиоволны от определенного слоя ионосферы. С повышением уровня солнечной активности среднее значение критической частоты в течение суток уменьшается. Вследствие увеличения плотности электронной концентрации ионосферы радиоволны подвергаются искажению и происходит ухудшение качества сигнала.

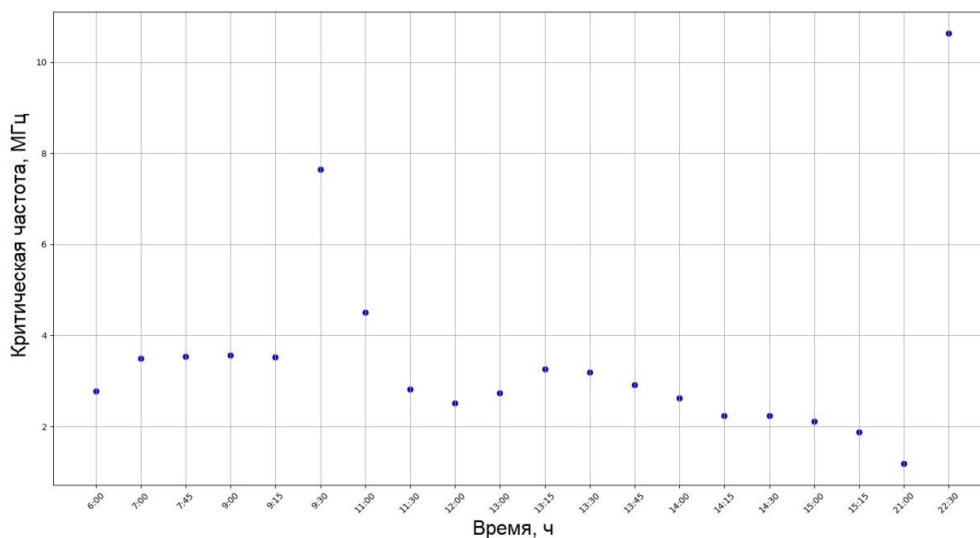


Рисунок 10. Изменение критической частоты слоя Es для даты 5.11.2023

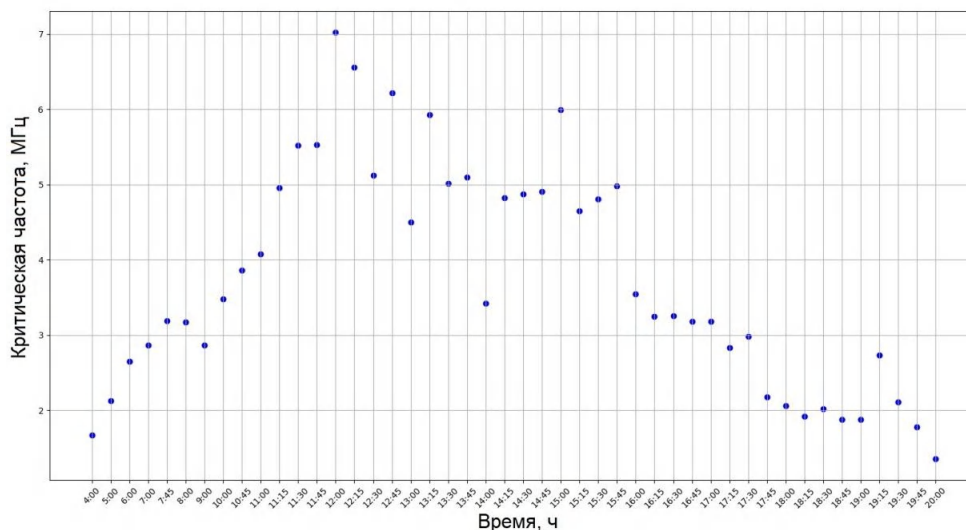


Рисунок 11. Изменение критической частоты слоя Es для даты 6.11.2023

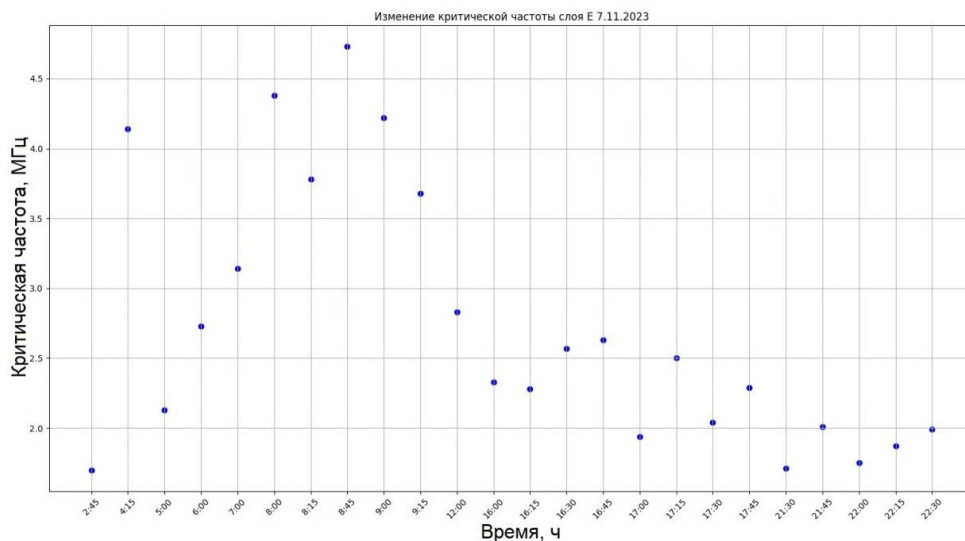


Рисунок 12. Изменение критической частоты слоя Es для даты 7.11.2023

Заключение

Результаты анализа показали, что ионосфера претерпевает изменения во время солнечных вспышек. Происходит изменение кривой критической частоты слоя F2 и Es. Средняя критическая частота для слоя F2 уменьшается, для Es увеличивается. Повышается уровень возникновения спорадического слоя, обладающего большой электронной плотностью.

Качество работы GPS в условиях магнитных бурь снижается, учащение сбоев навигационного сигнала наблюдается на главной фазе магнитной бури при максимальной возмущенности геомагнитного поля.

Список литературы

1. Янчуковский В. Л., Белинская А. Ю. Верхняя ионосфера в период вспышек солнечных космических лучей и форбуш-понижений галактических космических лучей // Солнечно-земная физика. 2022. 8 (3). 35–40. DOI: 10.12737/szf-83202205
2. Ерухимов Л. М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория // Соросовский образовательный журнал. 1998. 4. 71–77.
3. Куницын В. Е., Назаренко М. О., Нестеров И. А., Падохин А. М. Влияние солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы. Анализ ряда значительных событий 23-го и 24-го солнечных циклов // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. 4. 95–101.
4. Белаховский В. Б., Будников П. А., Калишин А. С., Пильгаев С. В., Ролдугин А. В. Влияние геомагнитных возмущений на сцинтилляции сигналов ГЛОНАСС и GPS спутников по данным наблюдений на Кольском полуострове // Солнечно-земная физика. 2023. 9 (3). 58–72. DOI: 10.12737/szf-93202307
5. Митра А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. Москва: Мир, 1977. 370 с.
6. Buonsanto M. J. Ionospheric storms // Space Science Reviews. 1999. 88 (3). 563–601. DOI: 10.1023/A:1005107532631

7. Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // *Reviews of Geophysics*. 2006. 44 (4). RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193
8. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Ratovsky K. G. Large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin according to the data of the GPS network and ionosondes // *Advances in Space Research*. 2008. 42 (7). 1213–1217. DOI: 10.1016/j.asr.2007.11.023
9. Astafyeva E., Zakharenkova I., Patrick A. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation // *Earth, Planets and Space*. 2016. 68. 152. DOI: 10.1186/s40623-016-0526-x
10. Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Живетьев И. В., Косогоров Е. А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки с и m классов в январе–феврале 2010 г // *Космические исследования*. 2013. 51 (2). 125. DOI: 10.7868/S002342061301010X
11. Svetska Z. Flare observations // *Solar Flare Magnetohydrodynamics*. (A81-46076 22-92). New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1981. 47–137.
12. GOES I-M DataBook. Tech. Rep. DRL-101-08. Space Systems Loral. 1996. 196 p.
13. Сыроватский С. В., Ясюкевич Ю. В., Веснин А. М., Едемский И. К., Воейков С. В., Живетьев И. В. Влияние солнечных вспышек на ионосферу Земли в 24-ом цикле солнечной активности // *Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2018. 4. 1840403 (6).
14. Максимов Д. С., Когогин Д. А., Насыров И. А., Загретдинов Р. В. Влияние солнечных вспышек 5–12 сентября 2017 г. на региональную возмущенность ионосферы Земли по данным ГНСС-станций, расположенных в Приволжском федеральном округе Российской Федерации // *Солнечно-земная физика*. 2023. 9 (2). 52–59. DOI: 10.12737/szf-92202306
15. Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В. Космическая погода: факторы риска для глобальных навигационных спутниковых систем // *Солнечно-земная физика*. 2021. 7 (2). 30–52. DOI: 10.12737/szf-72202104
16. Ермолаев Ю. И., Ермолаев М. Ю. Зависит ли сила геомагнитной бури от класса солнечной вспышки? // *Космические исследования*. 2009. 47 (6). 495–500.
17. Coster A. J., Foster J. C., Erickson P. J., Rich F. J. Regional GPS mapping of storm enhanced density during the July 15–16 2000 geomagnetic storm // *Proceedings of International Beaco Satellite Symposium*, June 4–6, 2001. USA: Chestnut Hill, MA. 2001. 2531–2539.
18. Афраймович Э. Л., Лесюта О. С., Ушаков И. И. Геомагнитные возмущения и функционирование навигационной системы GPS // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2002. 42 (2). 220–227.
19. Пикалов М. В., Шумилов А. Е., Колесник С. А. Статистический анализ характеристик спорадического Es слоя ионосферы по данным сети ионосферных станций // *Физика окружающей среды: материалы XIV Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А. Г. Колесника, Томск, 02–04 ноября 2020 года*. Томск: СТТ, 2020. 76–79.
20. Сюсюка Е. Н., Писарева П. М. Обеспечение связи в КВ-диапазоне путем отражения радиоволн от ионосферы // *Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова*. 2023. 3 (44). 33–37.

References

1. Yanchukovskii V. L., Belinskaya A. Yu. Topside ionosphere during solar cosmic ray bursts and forbush decreases of galactic cosmic rays // *Solar-terrestrial physics*. 2022. 8 (3). 35–40. DOI: 10.12737/szf-83202205 (In Russian).
2. Erukhimov L. M. Ionosphere as a space plasma laboratory // *Soros Educational Journal*. 1998. 4. 71–77. (In Russian).
3. Kunitsyn V. E., Nazarenko M. O., Nesterov I. A., Padokhin A. M. Solar flare forcing on ionization of upper atmosphere. Comparative study of several major X-Class events of 23rd and 24th solar cycles // *Moscow University Physics Bulletin*. 2015. 4. 95–101. (In Russian).
4. Belakhovskii V. B., Budnikov P. A., Kalishin A. S., Pil'gaev S. V., Roldugin A. V. Disturbances of GLONASS/GPS signals during a magnetic storm according to observations at the Kola Peninsula // *Solar-Terrestrial Physics*. 2023. 9 (3). 58–72. DOI: 10.12737/szf-93202307 (In Russian).
5. Mitra A. Solar flare effects on the Earth's lower ionosphere. Moscow: Mir Publ., 1977. 370 p. (In Russian).
6. Buonsanto M. J. Ionospheric storms // *Space Science Reviews*. 1999. 88 (3). 563–601. DOI: 10.1023/A:1005107532631
7. Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // *Reviews of Geophysics*. 2006. 44. RG4001. DOI: 10.1029/2005RG000193
8. Afraimovich E. L., Voeykov S. V., Perevalova N. P., Ratovskii K. G. Large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin according to the data of the GPS network and ionosondes // *Advances in Space Research*. 2008. 42 (7). 1213–1217. DOI: 10.1016/j.asr.2007.11.023
9. Astafyeva E., Zakharenkova I., Patrick A. Prompt penetration electric fields and the extreme topside ionospheric response to the June 22–23, 2015 geomagnetic storm as seen by the Swarm constellation // *Earth, Planets and Space*. 2016. 68. 152. DOI: 10.1186/s40623-016-0526-x
10. Yasyukevich Yu. V., Voeikov S. V., Zhivet'ev I. V., Kosogorov E. A. Ionospheric response to solar flares of C and M classes in january-february 2010 // *Space Research*. 2013. 51 (2). 125. DOI: 10.7868/S002342061301010X (In Russian).
11. Svetska Z. Flare observations // *Solar Flare Magnetohydrodynamics*. (A81-46076 22-92). New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1981. 47–137.
12. GOES I-M DataBook. Tech. Rep. DRL-101-08. Space Systems Loral. 1996. 196 p.
13. Syrovatskii S. V., Yasyukevich Yu. V., Vesnin A. M., Edemskii I. K., Voeykov S. V., Zhivet'ev I. V. The effect of solar flares on the ionosphere of the Earth during 24th cycle of solar activity // *Scientific Notes of the Faculty of Physics of Moscow University*. 2018. 4. 1840403 (6). (In Russian).
14. Maksimov D. S., Kogogin D. A., Nasyrov I. A., Zagretidinov R. V. Effects of September 5–12, 2017 solar flares on regional disturbance of Earth's ionosphere as recorded by GNSS stations located in the Volga Federal District of the Russian Federation // *Solar-Terrestrial Physics*. 2023. 9 (2). 52–59. DOI: 10.12737/szf-92202306 (In Russian).
15. Dem'yanov V. V., Yasyukevich Yu. V. Space weather: risk factors for Global Navigation Satellite Systems // *Solar-Terrestrial Physics*. 2021. 7 (2). 30–52. DOI: 10.12737/szf-72202104 (In Russian).

16. Ermolaev Yu. I., Ermolaev M. Yu. Geomagnetic storm dependence on the solar flare class // Space Research. 2009. 47 (6). 495–500. (In Russian).
17. Coster A. J., Foster J. C., Erickson P. J., Rich F. J. Regional GPS mapping of storm enhanced density during the July 15–16 2000 geomagnetic storm // Proceedings of International Beaco Satellite Symposium, June 4–6, 2001. USA: Chestnut Hill, MA. 2001. 176–180.
18. Afraimovich E. L., Lesyuta O. S., Ushakov I. I. Geomagnetic disturbances and operation of the GPS navigation system // Geomagnetism and Aeronomy. 2002. 42 (2). 220–227. (In Russian).
19. Pikalov M. V., Shumilov A. E., Kolesnik S. A. Statistical analysis of the characteristics of the sporadic Es layer of the ionosphere according to the network of ionospheric stations // Physics of the environment: Proceedings of the XIV A. G. Kolesnik International School of Young Scientists "Physics of the Environment", Tomsk, November 02–04, 2020. Tomsk: Limited Liability Company "STT", 2020. 76–79. (In Russian).
20. Syusyuka E. N., Pisareva P. M. Provision of communication in the HF Band by reflection of radio waves from the ionosphere // Bulletin of Admiral Ushakov Maritime State University. 2023. 3 (44). 33–37. (In Russian).

Информация об авторах

Сюсюка Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова (Новороссийск, Россия), ORCID: 0000-0002-4237-0697, sollain66@rambler.ru

Писарева Полина Михайловна – курсант, Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова (Новороссийск, Россия), ORCID: 0009-0003-3880-2770, polinapisareva28@mail.ru