

УДК 550.388.2

Выборнов Федор Иванович¹, доктор физ.-мат. наук, зав. кафедрой физики
e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru

Шейнер Ольга Александровна², доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: rfj@nirfi.unn.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

² НИРФИ ННГУ им. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия.

ВЛИЯНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ НА СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

Аннотация. Рассматривается влияние гелио-геомагнитной активности на ионосферу Земли, состояние которой влияет на точность позиционирования средств морского и авиационного транспорта с помощью современных спутниковых навигационных систем. Показано, что сильные и внезапные возмущения параметров ионосферы, вызванные мощными солнечными вспышками, корональными выбросами массы или высокоскоростными потоками солнечного ветра могут быть причиной сбоев работы спутниковых систем навигации.

Ключевые слова: гелио-геомагнитная активность, ионосфера, спутниковые навигационные системы, ионосферные возмущения.

Введение

Погрешности измерения фазы и псевдодальности навигационными приемниками систем GPS-ГЛОНАСС разделяют на аппаратурные (вносимые оборудованием спутника и приемником) и возникающие на радиотрассе распространения сигнала. Наибольший вклад в погрешности на радиотрассе вносит ионосфера, и для ее уменьшения используют измерения, сделанные на двух частотах. Уменьшение погрешности измерений одночастотными приемниками проводится методом моделирования трассы (используется модель ионосферы) или избыточными измерениями. Оба подхода достаточно хорошо зарекомендовали себя в условиях спокойной ионосферы. В условиях высокой гелио-геомагнитной активности ионосфера Земли оказывается сильно возмущенной, ее параметры резко меняются и могут ухудшать работу навигационных систем.

Солнечные вспышки, корональные выбросы массы (СМЕ) и высокоскоростные потоки солнечного ветра (HSS) являются наиболее геоэффективными явлениями на Солнце. Все это оказывает сильное воздействие на ионосферу Земли: меняются критические частоты в ионосфере, наблюдается сильное поглощение радиоволн, что, в свою очередь, оказывает значительное влияние на работу систем радиосвязи и навигации. Электромагнитное излучение приходит на Землю приблизительно через 8 минут после вспышки. Через несколько суток приходят к Земле потоки энергичных частиц.

Предшествующие события и анализ космической погоды

4 ноября 2015 г. несколько европейских органов управления воздушным движением (УВД) сообщили о проблемах с работой вторичных радиолокационных систем воздушного движения на закате Солнца или близко к нему [1]. Ложные эхосигналы, представляющие несуществующие самолеты, наблюдались только в направлении Солнца

в течение двух периодов времени: 14:19:23–14:33:35 UT и 14:45:52–14:49:18 UT. Положения «ложных» самолетов были выровнены по направлению к Солнцу, наблюдаемому в то время. В связи с этим инцидентом не произошло прерывания трафика, так как управляющее программное обеспечение корректно отфильтровало ложную информацию.

Основываясь на информации от управления воздушного движения Швеции [1], вторичные радиолокационные системы УВД не могли отображать правильную информацию для диспетчеров управления воздушным движением. Одновременная серия помех от радаров УВД произошла в нескольких местах в Швеции, начиная примерно с 14:19 UT. Эти возмущения наблюдались как эхо-призраки по прямым линиям в направлении Солнца и имели место сначала между 14:19 и 14:34 UT, а затем между 14:47 UT и 14:50 UT.

В этот же день самолет Air Greenland, приземлявшийся на авиабазе Туле в Гренландии в 14:49UT, столкнулся с техническими проблемами на высоте более 4000 футов: регистрировался противоречивый отчет между курсовым радиомаяком (на частоте 109,5 МГц), указывающим на правильное выравнивание с взлетно-посадочной полосой, и автопилотом, который не подтверждал эту информацию о местоположении.

Для объяснения данных радиолокационных возмущений ниже нами анализировалась геомагнитная активность (Kp-индекс) и события в солнечной короне. Никаких исключительных геомагнитных возмущений 4 ноября, которые могли бы существенно повлиять на работу радара воздушного движения, обнаружено не было. Но, длительная вспышка класса M в мягком рентгеновском излучении, которая также наблюдалась в Наблюдательной Канцеллхёе как оптическая вспышка 1B, сопровождалась CME типа гало, зарегистрированным в 15:12 UT в поле зрения коронографа SOHO/LASCO-C2. А спутником ACE зарегистрированы высокоскоростные потоки солнечного ветра (Рисунок 1). Радиолокационные помехи, которые в Бельгии, Швеции и Норвегии состояли из ложных эхо-сигналов, полученных, когда антенны были направлены в сторону Солнца, не сопровождалась усилением геомагнитной активности, но временная связь между периодами возмущений и пиками скорости HSS указывает на Солнце, как на источник возмущений. Вывод подтверждается поразительным совпадением между двумя периодами сильнейших возмущений и двумя пиками экстремального солнечного радиоизлучения в полосе, охватывающей радиолокационные частоты. С целью экспериментального исследования влияния на ионосферу Земли факторов космической погоды были проведены специальные эксперименты.

Используемые данные и методы

В исследовании использовались данные вертикального и наклонного зондирования ионосферы. Значения критических частот F-слоя ионосферы приводятся по данным вертикального зондирования на ионосферных станциях Тромсе, Варшавы и Афин [2]. Выбор станций определялся их близким расположением к одному меридиану. Критические частоты f_0 F-слоя ионосферы по данным ионозонда CADI, расположенного в п. Васильсурск, были получены в ходе специальных измерений. Ионозонд работал в пятнадцатиминутном режиме зондирования ионосферы в диапазоне частот от 1 до 12 МГц. Данные максимально наблюдаемых частот (МНЧ) F-слоя ионосферы приводятся по результатам специальных измерений на трассе Кипр – г. Нижний Новгород.



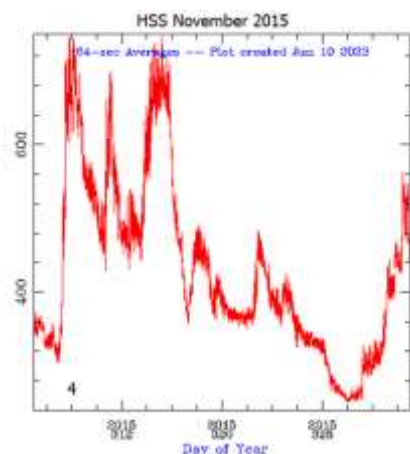


Рисунок 1 - Зависимость скорости HSS от времени. Левая панель – весь месяц ноябрь 2015г. Правая панель – сутки 4 ноября 2015 г.

В данном исследовании для анализа данных использовался новый ионосферный индекс [3]. Он основан на измерении девиации Δf_0 F2-слоя ионосферы в каждый момент регистрации ионограммы и определялся как

$$\Delta f_{0jk} = f_{0jk} - \overline{f_{0j}},$$

где $\overline{f_{0j}} = \sum_{k=1}^N f_{0jk} / N$, f_{0jk} – измеренное значение, j – номер точки в течение дня, k – номер дня в месяце, N – число дней в месяце. Аналогичная процедура проводилась и при анализе МНЧ данных наклонного зондирования.

На Рисунке 2 приводятся графики K_p и Dst индексов за февраль месяц, которые свидетельствуют о повышенной геомагнитной активности [4]. В конце месяца произошла сильная магнитная буря.

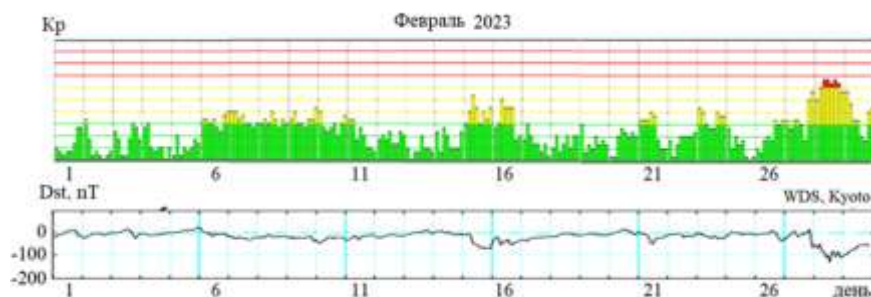


Рисунок 2 - Графики K_p и Dst индексов за февраль 2023 г.

На Рисунке 3 приводятся графики Δf_0 F2 за февраль 2023 г. для данных ВЗ станций Тромсе, Варшава и Афины. Сопоставление солнечных данных и K_p и Dst индексов позволяет выявить источник влияния на критические частоты F-слоя ионосферы. Увеличение критических частот в середине месяца было вызвано корональными выбросами массы 2023/02/11 в 04:24 UT, 2023/02/12 в 17:00UT, 2023/02/15 в 00:24UT и 2023/02/15 00:24 UT, которые также были зафиксированы коронографом SOHO/LASCO-C2.

Повторное понижение критических частот по данным станции Варшава в конце месяца 2023/02/24 в 21:4UT и 2023/02/25 в 20:00UT было связано с корональными выбросами массы типа «петля».

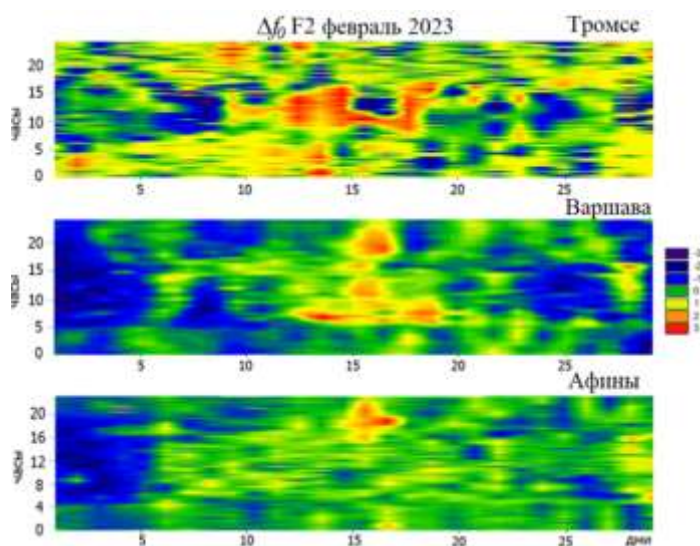


Рисунок 3 - Графики $\Delta f_0 F2$ за февраль 2023 г. для станций Тромсе, Варшава и Афины

Увеличение скорости высокоскоростных потоков (HSS) солнечного ветра с 400 до 800 км/с 26 февраля и корональные выбросы массы 2023/02/26 01:36 UT, 2023/02/27 00:12 UT и 2023/02/27 07:36 UT привели к сильной магнитной буре, которая началась вечером 26 февраля. При этом резко изменились критические частоты F-слоя ионосферы.

Заключение

Проведенные исследования подтвердили наличие закономерностей во влиянии кратковременных вариаций солнечной активности на параметры ионосферы. Выводы сделаны на основе сопоставления поведения нового ионосферного индекса, определенного по результатам вертикального и наклонного зондирования ионосферы в феврале 2023 г., и регистрации корональных выбросов массы и высокоскоростных потоков солнечного ветра. Наблюдаются длительные понижения значений $\Delta f_0 F2$ после начала CME (типа петля) и возникновение ионосферных возмущений при увеличении скорости HSS. Отмечена возможная роль указанных солнечных явлений в работе систем навигации.

Работа выполнена в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FSWR-2023-0038.

Список литературы:

1. C. Marqué et al. Solar radio emission as a disturbance of aeronautical radionavigation // J. Space Weather Space Clim. 2018, 8, A42. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018029> (дата обращения 01.06.2023)
2. <https://giro.uml.edu/didbase/> (дата обращения 25.05.2023)
3. Sheiner O., Rakhlin A., Fridman V., Vybornov F. New Ionospheric Index for Space Weather Services. Advances in Space Research. 2020. Т. 66, № 6. С. 1415.
4. https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202210/index.html (дата обращения 25.05.2023)

IMPACT OF GEOPHYSICAL ACTIVITY ON MODERN NAVIGATION SYSTEMS

Fedor I. Vybornov, Olga A. Shainer

Abstract. The influence of helio-geomagnetic activity on the Earth's ionosphere, the state of which affects the positioning accuracy of sea and air transport means using modern satellite

navigation systems, is considered. It is shown that strong and sudden disturbances of ionospheric parameters caused by powerful solar flares, coronal mass ejections (CMEs), or high-velocity solar wind streams (HSS) can cause malfunctions in satellite navigation systems.

Keywords: helio-geomagnetic activity, ionosphere, satellite navigation systems, ionospheric disturbances.

