

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ 25-ГО ЦИКЛА АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ПЭС И МОЩНОСТИ ГНСС СИГНАЛОВ

Д.С. Максимов, Д.А. Когогин, И.А. Насыров, Р.В. Загретдинов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия,
denis-maksimov16@yandex.ru

INVESTIGATING THE RESPONSE OF THE MID-LATITUDE IONOSPHERE TO SOLAR FLARES OF THE 25TH SOLAR CYCLE, USING TEC VARIATION MEASUREMENTS AND GNSS SIGNAL STRENGTH

D.S. Maksimov, D.A. Kogogin, I.A. Nasyrov, R.V. Zagretdinov

Kazan (Volga region) Federal University, Kazan, Russia,
denis-maksimov16@yandex.ru

Аннотация. В работе приведены результаты обработки ГНСС данных во время мощных солнечных вспышек X- и M-классов над Европейской частью Российской Федерации в 25-м цикле солнечной активности 2022–2024 гг. Выявлены отклики медианных вариаций ПЭС во время вспышек, когда исследуемый регион был освещен Солнцем, а также выявлены менее интенсивные, но более длительные по времени возмущения ионосферы во время геомагнитной активности. Однозначного влияния на соотношение сигнал-шум навигационных сигналов от солнечных вспышек определить не удалось.

Ключевые слова: Солнечные вспышки, ионосфера, ГНСС, полное электронное содержание, магнитные бури

Abstract. This paper presents the results of processing GNSS data during powerful X- and M-class solar flares over the European part of the Russian Federation in the 25th solar cycle in 2022–2024. We revealed responses of median variations in TEC during the emission of solar flares when the studied region was illuminated by the Sun, as well as less intense but longer-lasting disturbances of the ionosphere during geomagnetic activity. It was impossible to determine an unambiguous effect of navigation signals from solar flares on the signal-to-noise ratio.

Keywords: Solar flares, ionosphere, GNSS, total electron content, magnetic storms

ВВЕДЕНИЕ

В сентябре 2020 г. начался 25-ый цикл солнечной активности, который предположительно продлится до 2030 г. [<https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>]. По данным различных источников максимум цикла ожидается с середины 2024 г. по середину 2025 г. [Язев и др., 2023; Lozitsky, Efimenko, 2023]. В связи с этим было принято решение провести анализ влияния на ионосферу в Европейской части РФ уже произошедших солнечных вспышек в рассматриваемом цикле. А также исследовать влияние вышесказанных событий на мощностные характеристики навигационных сигналов ГНСС.

Ранее объективность подобных исследований в рассматриваемом регионе была низкой из-за малого количества ГНСС-приемников, но сейчас в нашем распоряжении имеются данные с более чем 1000 ГНСС приемников, которые позволяют строить двумерные карты распределения вариаций полного электронного содержания (ПЭС) и мощностных характеристик сигналов со спутников (CNR) с высокой плотностью и анализировать региональный уровень возмущенности ионосферы.

УСЛОВИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Общее количество зафиксированных вспышек в период январь 2022 – апрель 2024 гг. представлено в табл. 1, по данным [<https://www.spaceweatherlive.com>].

Для исследования были выделены дни со вспышками с наиболее высокими показателями пика интенсивности рентгеновского излучения, произошедшие во время освещенности Солнцем Европейской части РФ, также учитывалось расположение области пятна на

Солнце откуда возникли вспышки (табл. 2) по данным [https://xras.ru/sun_flares.html].

Таблица 1.

Солнечные вспышки 2022–2024 гг.

Год	Кол-во вспышек С-класса	M-класса	X-класса
2022	2036	178	7
2023	2752	342	13
2024 (январь–апрель)	963	170	7

Таблица 2.

Анализируемые дни

Дата	Класс вспышки	Время максимума вспышки (UTC)
17.04.2022	X1.1	03:34
20.04.2022	X2.2	03:57
30.04.2022	X1.1	13:47
10.05.2022	X1.5	13:55
29.03.2023	X1.2	02:33
14.12.2023	M5.8	07:44
09.02.2024	X3.38	13:14
16.02.2024	X2.5	06:53
22.02.2024	X1.7	06:32
	X6.3	22:34

Для анализа отклика ионосферы использовались ГНСС данные в формате RINEX 3.02 с частотой записи 30 секунд. Область исследования варьировалась для сравнения общего влияния вспышки на ионосферу в Европейской части РФ (30°±60° в.д. и 40°±70° с.ш.) и для отдельных широтно-долготных секторов с шагом в 10° по широте (рис. 1.)

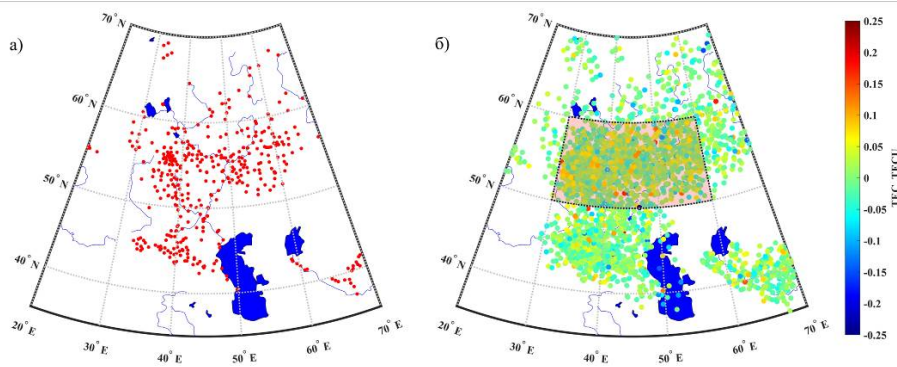


Рис. 1. а) Расположение ГНСС-станций; б) Пример двумерной пространственной карты ПЭС

Программный комплекс для обработки ГНСС данных описан в работах [Максимов и др., 2023; Когогин и др., 2020]. Финальными данными после обработки являются суточные изменения медианных вариаций ПЭС, а также медианные соотношения несущей к шуму (C/No) по рассматриваемым регионам.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Солнечные вспышки X- и M- классов вызывают изменения вариаций ПЭС относительно фоновых значений. Необходимым условием для этого является освещенность исследуемых регионов Солнцем (рис. 2). Вспышки после захода Солнца (в т.ч. X-класса) не вызывают возмущений вариаций ПЭС (рис. 4). Величина отклика ПЭС зависит от мощности и места возникновения вспышки на Солнце — чем ближе к краям видимого диска, тем отклик ниже, что согласуется с работами [Леонович, 2003; Afraimovich et al., 2001]. Для вспышки X2.2 (от 20.04.2022), произошедшей на краю диска размах вариаций ПЭС был 0,15 TECU, а для X1.5 (от 10.05.2022), направленной в сторону Земли достигал уже 0,7 TECU (рис. 2). На вспышку X3.3 (от 09.02.2024)

также были низкий отклик с размахом менее 0,1 TECU (рис. 3).

На вариации ПЭС оказывали влияние магнитные возмущения, хотя в исследуемые дни геомагнитных штормов не наблюдалось, минимальное значение индекса Dst достигало -50 нТл, что привело к возмущению порядка сотых значений TECU (рис. 2, в).

Для исследования изменения мощностных характеристик навигационных сигналов было произведено объединение по группам (S1, S2, S5, S6, S7, S8) и также вычислены медианные значения в рассматриваемом регионе. По полученным результатам воздействие солнечных вспышек на показатели сигнал-шум однозначно определить нельзя. Хотя стоит отметить, что в некоторых днях видно понижение уровня для групп сигналов S1 и S2 на 4–5 дБГц во время вспышек и восстановление к фоновым значениям в течение 1–3 ч (рис. 2).

Разделение области исследования по широтам не привело к существенным изменениям в величине или времени отклика ПЭС и C/No, пример для вспышки X1.7 от 22.02.2024 (рис. 4).

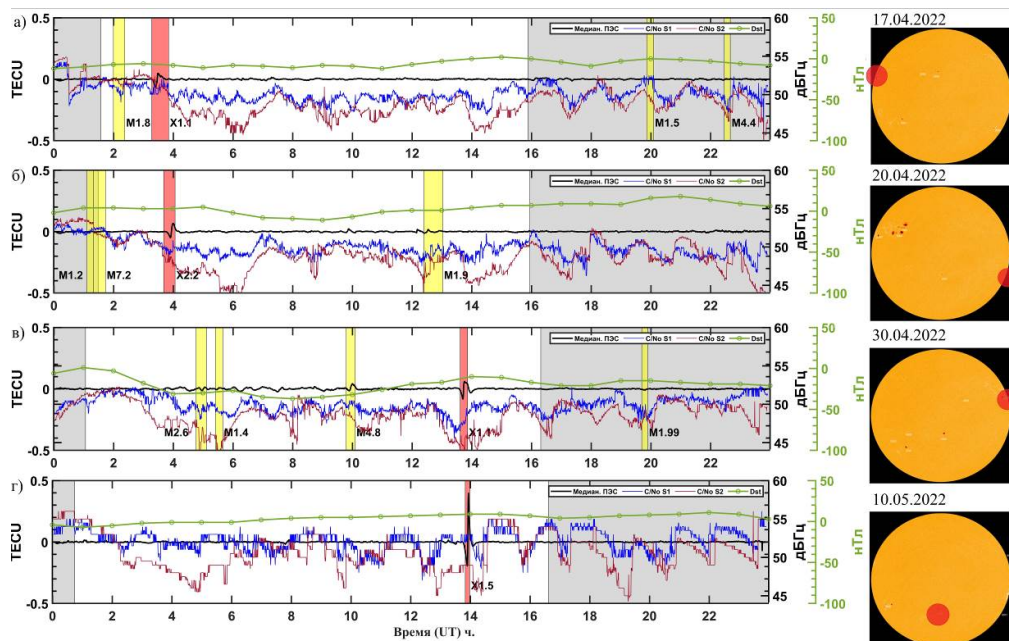


Рис. 2. Исследуемые дни в 2022 г. Красными и желтыми вертикальными линиями обозначены вспышки X- и M- классов соответственно. Черные кривые — медианные вариации ПЭС, зеленые кривые — индекс Dst, синие и красные — C/No для сигналов S1 и S2. Справа отображены области на диске Солнца, где произошли вспышки [https://www.spaceweather.com/archive.php]

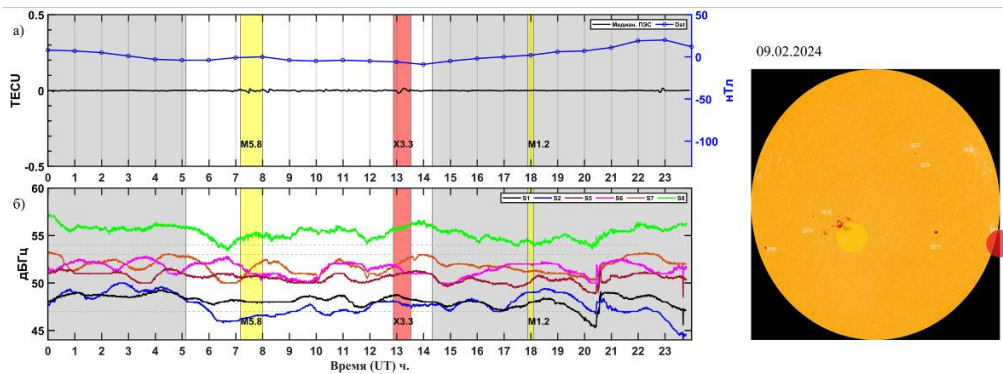


Рис. 3. Исследуемый день 09.02.2024. а) Суточные медианные вариации ПЭС (черным), Dst (синим); б) Изменения медианных значений для C/No S1-S8

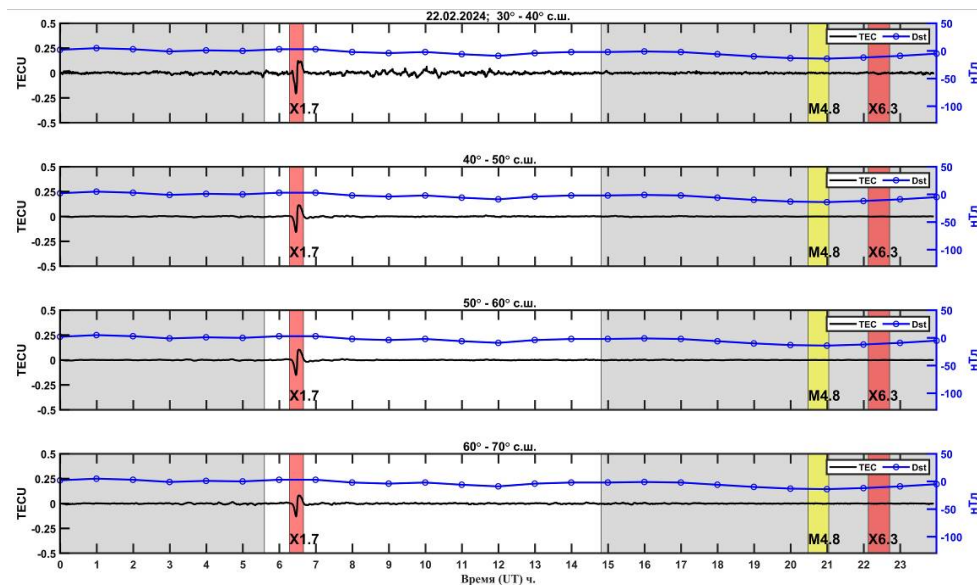


Рис. 4. Исследуемый день 22.02.2024. Разбиение анализируемых регионов по широтам с шагом в 10°. Суточные медианные вариации ПЭС (черным), Dst — (синим)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлен отклик вариаций ПЭС на вспышки X- и M-классов во время освещенности исследуемого региона Солнцем, также зафиксировано менее интенсивное, но более длительное возмущение на повышение магнитной активности. Отмечена зависимость отклика ионосферы на мощность вспышки и на местоположение на видимом солнечном диске. Однозначного влияния вспышек и геомагнитной активности на мощностные характеристики выявить не удалось, для этого требуются дополнительные исследования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10029.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А.В. и др. Динамическая картина стимулированной мощным радиоизлучением области ионосферы, полученная по результатам совместного анализа снимков ночного неба в линии 630 нм и карт вариаций полного электронного содержания // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 2. С. 89–104.
 Леонович Л.А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки и магнитные бури по данным глобальной сети GPS: Автореферат дис. ... к.ф.-м.н. Иркутск, 2003. 15 с.
 Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загрет-

динов Р.В. Влияние солнечных вспышек в 2022 г. на региональную возмущенность ионосферы земли по данным ГНСС-станций, расположенных в европейской части РФ / XXVIII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, ПГТУ, 2023. С. 147–151.

Язев С.А., Исаева Е.С., Хос-Эрдэнэ Б. 25-й цикл солнечной активности: первые три года // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9, № 3. С. 5–11.

Afraimovich E.L., Altyntsev A.T., Grechnev V.V., Leonovich L.A. Ionospheric effects of the solares as deduced from global GPS network data // Adv. Space Res. 2001. V. 27. 6–7. P. 1333–1338.

Lozitsky V.G., Efimenko V.M Clarified forecast for the 25th Cycle of Solar activity // 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 2023. P. 1–5.

URL: <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle> (дата обращения 05.05.2024)

URL: <https://www.spaceweatherlive.com> (дата обращения 05.05.2024)

URL: https://xras.ru/sun_flares.html (дата обращения 05.05.2024)

URL: <https://www.spaceweather.com/archive.php> (дата обращения 05.05.2024)