

ИССЛЕДОВАНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X-КЛАССА 24-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ СЕТИ ГНСС-СТАНЦИЙ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ

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

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет, Казань, Россия
denis.kogogin@gmail.com

STUDYING X-CLASS SOLAR FLARES OF SOLAR CYCLE 24 WITH THE USE OF DATA FROM THE NETWORK OF GNSS STATIONS IN EUROPEAN RUSSIA

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

Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia
denis.kogogin@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты обработки данных фазовых измерений ГНСС-сигналов в дни, когда происходили мощные солнечные вспышки (М- и X-классов) в сентябре 2017 г. Были рассчитаны ряды полного электронного содержания (ПЭС) для полных суток 5–12 сентября 2017 г. Для этого периода построены тепловые карты распределения концентрации электронов над областью Поволжья. Особенностью проведенной работы является область исследования — Европейская часть России, где до этого не проводились наблюдения отклика ионосферы на воздействие мощных солнечных вспышек. По итогам исследования было установлено, что существенное изменение среднего значения ПЭС, преобладающее над фоновыми значениями, наблюдается за два часа до первой вспышки X-класса, а также спустя 15–20 ч после частых мощных вспышек 6–7, 10 сентября 2017 г.

Ключевые слова: ГНСС, ПЭС, ионосфера, солнечные вспышки.

Abstract. This paper presents the results of processing data from phase measurements of GNSS signals in September 2017 when powerful solar flares (M- and X-classes) occurred. Series of total electron content (TEC) were calculated for an entire day from September 5 to September 12, 2017. We constructed thermal maps of the electron density distribution over the Volga region for these days. The main feature of the work carried out is the research area – European Russia, since no similar observations of the ionospheric response to the effects of powerful solar flares were made before. The findings show a significant change in the TEC average value prevailing over the background values two hours before the first X-class flare and 15–20 hours after frequent powerful flares on September 6–7 and 10, 2017.

Keywords: GNSS, TEC, ionosphere, solar flares.

ВВЕДЕНИЕ

С активным увеличением количества ГНСС-приемников в Европейской части России появилась возможность детального изучения состояния ионосферной погоды над данной областью. Это позволяет оценивать влияние на ионосферу естественных и искусственных событий. В частности, естественными событиями, изучение которых важно, например, для геопозиционирования и анализа радиосвязи, являются магнитные бури и солнечные вспышки.

В данной работе приводятся результаты обработки фазовых измерений с распределенной сети ГНСС-станций в области Поволжья и близлежащих регионах. Исследовались дни 5–12 сентября 2017 г., когда были зарегистрированы мощные вспышки X-класса на Солнце, а также высокие уровни магнитной активности в атмосфере Земли.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Для обработки сырых ГНСС-данных в формате RINEX-файлов и их дальнейшего представления в виде ионосферных параметров был разработан собственный программный комплекс на базе высокоуровневых языков программирования MATLAB и Python. Разработанный программный комплекс разделен на отдельные логические блоки, показанные на рис. 1.

Первый блок осуществляет конвертацию сырых ГНСС-данных из формата RINEX в mat-файлы и

параллельно — расчет траекторий пролетов спутников; второй блок — расчет ПЭС [Когогин, 2020]; третий блок — расчет подионосферных точек для всех пар спутник–приемник; четвертый блок — объединение всех расчетов в один массив и дальнейшее дробление на указанные нами временные интервалы, в данном случае, шестиминутные; последний блок — представление данных в виде графиков ПЭС/ROT, тепловых карт распределения ПЭС/ROT.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

В период 6–10 сентября 2017 г. зафиксировано четыре вспышки X-класса и несколько вспышек на ранг ниже — M-класса. Время их возникновения и длительность (по данным [https://tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html?m=9&d=8&y=2017]) указаны ниже (табл. 1).

ВАРИАЦИИ ВОЗМУЩЕННОСТИ ИОНОСФЕРЫ 5–12 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Для сопоставления влияния на ионосферу солнечной активности и магнитных бурь были рассчитаны средние значения ПЭС над г. Казань и территорией Поволжья, а также близлежащих регионов (рис. 2). Усреднение данных по широкой области пространства, как это сделано для Поволжья, представляет собой альтернативу когерентному накоплению сигнала.

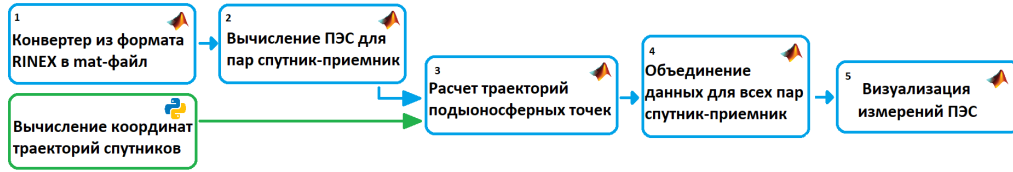


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса обработки ГНСС данных и дальнейшей визуализации полученных ионосферных параметров (ПЭС, Rate of TEC (ROT), индекс ROTI, оценивающий среднеквадратичное отклонение значений индекса ROT)

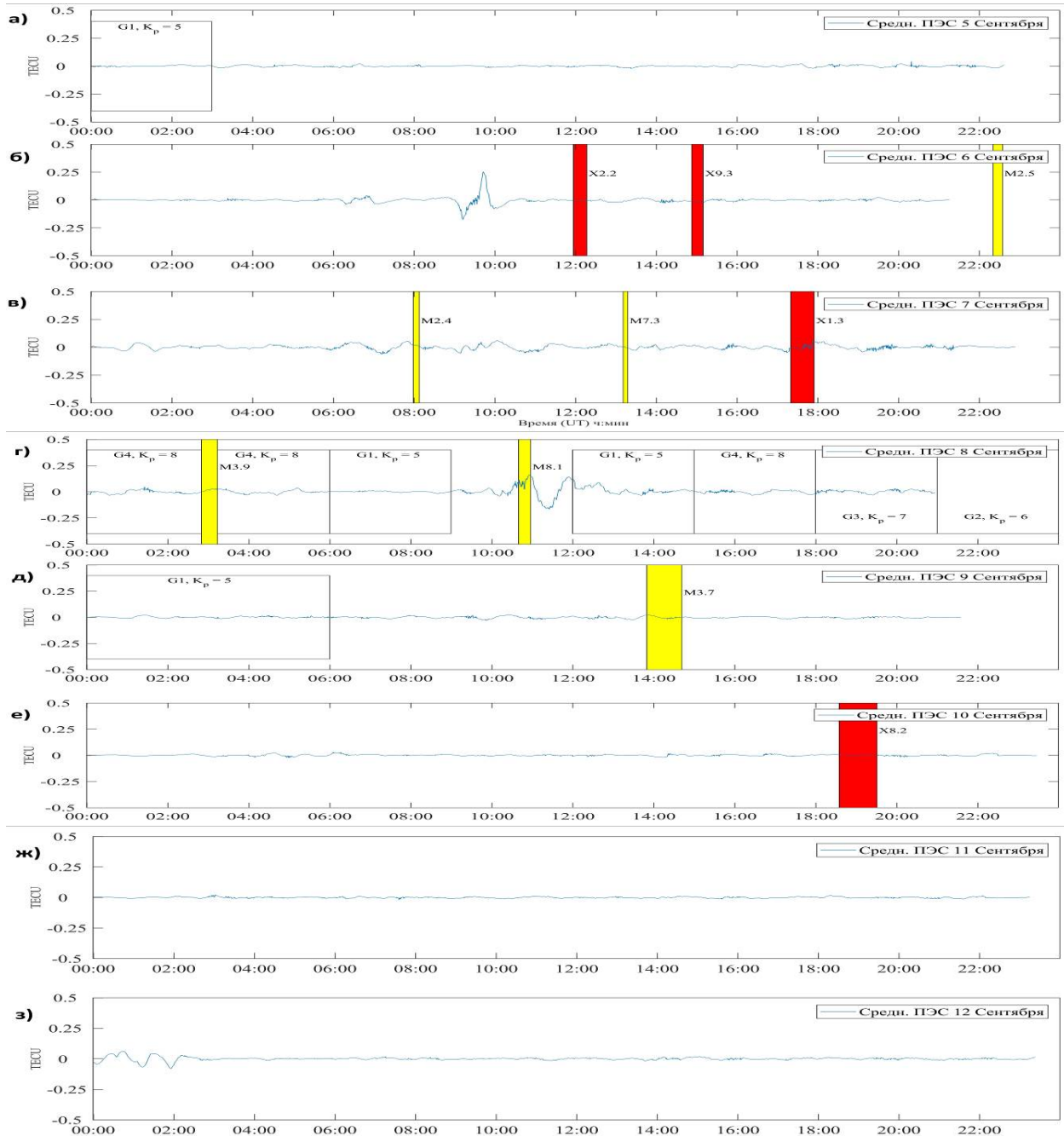


Рис. 2. Усредненные значения вертикального ПЭС над всей рассматриваемой областью Поволжья. Выделены отрезки времени, в которые фиксировались солнечные вспышки (желтые — M-класса, красные — X-класса). Прозрачными прямоугольниками выделены зафиксированные магнитные бури с обозначением их класса и индекса K_p . Панели а-в соответствуют дням 5–7 сентября, г-е — 9–11 сентября, ж-з — 10–12 сентября

Солнечные вспышки. Сентябрь 2017 г.

Дата	Класс вспышки	Начало	Максимум	Окончание
6 сентября	X2.2	11:57:00	12:10:00	12:17:00
6 сентября	X9.3	14:53:00	15:02:00	15:10:00
7 сентября	X1.3	17:20:00	17:36:00	17:55:00
10 сентября	X8.2	18:35:00	19:06:00	19:31:00
6 сентября	M2.5	18:51:00	18:56:00	19:03:00
6 сентября	M1.4	22:21:00	22:30:00	22:35:00
7 сентября	M2.4	07:59:00	08:02:00	08:08:00
7 сентября	M7.3	13:11:00	13:15:00	13:18:00
8 сентября	M3.9	02:50:00	02:59:00	03:14:00
8 сентября	M8.1	10:40:00	10:49:00	10:58:00
9 сентября	M3.7	13:50:00	14:04:00	14:42:00

Поскольку фоновые колебания изменения параметра *ПЭС* являются статистически независимыми, при их усреднении происходит взаимное гашение. Таким образом, амплитуда вариаций *ПЭС* увеличится, когда будет синхронный импульсный глобальный скачок ионизации. При этом чувствительность регистрации отклика возрастет в \sqrt{N} , где N — количество лучей спутник—приемник [Сыроватский, 2018].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы: изменения *ПЭС*, преобладающие над фоновыми значениями, зарегистрированы за два часа до первой мощной вспышки X-класса (см. рис. 2). В дни с наиболее частыми вспышками (6–10 сентября) можно заметить, что *ПЭС* для территории Поволжья повышается до ~0.25 TECU. Особенно это видно спустя ~15–20 ч после мощных вспышек, произошедших 6 и 7 сентября. При этом фоновые значения *ПЭС* имеют значения ~0.1 TECU.

В отличие от работы [Yasyukevich, 2018], где рассматривался отклик ионосферы на территории Европы, Северной и Южной Америки на вспышки, произошедшие 6 сентября 2017 г., быстрого отклика ионосферы выделить не удалось. Возможно, это связано с методами обработки. В дальнейшем исследовании будут рассмотрены различные методы (например, другие окна скользящего среднего при удалении тренда).

Проведенное исследование позволит сделать вывод, что выделяющиеся на общем фоне (повышение *ПЭС* до 0.25 TECU) ионосферные возмущения генерируются не столько мощностью солнечной вспышки, сколько частотой возникновения сильных и мощных вспышек, наибольшую реакцию дает также дневная ионосфера, ближе к ночи происходит релаксация состояния верхней атмосферы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00043 [<https://rscf.ru/project/21-72-00043>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Бахтияров В.Ф., Загретдинов Р.В. Обзор постоянных GNSS-станций на территории Российской Федерации. IX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем»: Сб. докладов. Казань, 2–3 сентября 2020 г., С. 128–136.

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.

Сыроватский С.В., Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М. и др. Влияние солнечных вспышек на ионосферу Земли в 24-м цикле солнечной активности. *Ученые записки физического факультета московского университета*. 2018. № 4. 1840403.

Yasyukevich Yu., Astafyeva E., Padokhin A. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impact on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation. *Space Weather*. 2018. 16. DOI: [10.1029/2018SW001932](https://doi.org/10.1029/2018SW001932).

URL: https://tesis.lebedev.ru/magnetic_storms.html?m=9&d=8&y=2017 (дата обращения 14 мая 2021 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/21-72-00043> (дата обращения 14 мая 2021 г.).