

Исследование уровня возмущенности ионосферы по данным ГНСС радиозондирования в период работы УНУ стенд СУРА в 2021-2023 гг. и её влияния на полное электронное содержание и мощность навигационных сигналов

Д.А. Когогин¹, Д.С. Максимов¹, И.А. Насыров¹, Р.В. Загретдинов¹, А.В. Шиндин², С.М. Грач²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет

420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18

E-mail: denis.kogogin@gmail.com

² Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского

603105, г. Нижний Новгород, проспект Гагарина, 23

В работе представлены результаты исследования влияния воздействия мощного наземного радиоизлучения уникальной научной установки стенд СУРА на показатели вариаций полного электронного содержания и мощности сигналов навигационных спутников в области пространства, ограниченной размерами диаграммы направленности стенда. Исследования проводились в 2021-2023 годах. Обнаружено, что в большинстве периодов работы стенда СУРА имеются коррелированные с режимом излучения волны накачки вариации полного электронного содержания. Влияния работы стенда на мощности сигналов навигационных спутников по итогам исследования выявлено не было.

Ключевые слова: полное электронное содержание, УНУ стенд СУРА, ионосфера, ГНСС

The study of ionospheric disturbances based on GNSS data during the operation of the Sura facility from 2021 to 2023, and its impact on total electronic content and carrier-to-noise ratio

D.A. Kogogin¹, D.S. Maksimov¹, I.A. Nasyrov¹, R.V. Zagretdinov¹, A.V. Shindin², S.M. Grach²

¹ Kazan (Volga region) Federal University

² National Research Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod

The results of studies on the effects of exposure to high-power radio radiation from the Sura facility on indicators of changes in the total electron content in the area covered by the radiation patterns of the facility as well as the signal-to-noise ratio of navigation satellite signals are presented. The research was conducted between 2021 and 2023, and showed that changes in the total electron content variations were correlated with the mode of radiation of the pumping wave for most operating periods of the Sura facility. Based on the results, there was no impact of exposure from the facility on signal-to-noise ratio of navigation satellite signals.

Keywords: total electron content, Sura facility, ionosphere, GNSS

Введение

На основе обработанных данных с наземных ГНСС приемников, в настоящий момент рассчитываются изменения полного электронного содержания (ПЭС), вариаций ПЭС, других индексов ионосферной активности на базе ПЭС, таких как ROT, ROTI, AATR и др., строятся двумерные карты данных параметров для визуализации распределения их интенсивности. При помощи вышесказанного анализируется влияние на ионосферу различных гелиогеофизических событий [1,2]. Помимо этого, имея ГНСС

данные с плотной сети станций, можно строить карты изменения мощности навигационных сигналов.

Описание эксперимента

В исследовании рассматривались экспериментальные дни работы Уникальной научной установки (УНУ) «Многофункциональный комплекс для исследования околоземного и космического пространства (Стенд СУРА, рег. № 06-30)» в период 2021-2023 гг. Информация о количестве экспериментальных дней, количестве используемых станций, видов накачки и периодов в зависимости от года указаны в таблице 1.

Таблица 1. Данные об экспериментальных сессиях

Год	Количество дней	Среднее количество ГНСС-приемников	Моды накачки	Периоды накачка-пауза, мин
2021	6	860	-O	6
2022	16	960	-O, -X	6, 15, 30, 60
2023	9	1020	-O	6

Методика обработки данных

Исходные данные берутся из файлов RINEX от наземных ГНСС приемников. Далее, для отдельных пар спутник-приемник вычисляется наклонное ПЭС по фазовым измерениям, выделяются значения мощности навигационного сигнала (отношение несущей к плотности шума – C/No) [3]. Затем осуществляется перевод наклонного ПЭС в вертикальный и объединение для всех имеющихся пар спутник-приемник в один массив. Последним общим этапом обработки является разбиение всей собранной информации на временные интервалы, в которые они были зарегистрированы.

Построение карт ПЭС и мощности навигационных сигналов

Общий подход к построению карт ПЭС изложен в работах [1,2]. Принцип построения карт мощности навигационных сигналов схож с построением карт ПЭС: значения мощности, как и значения ПЭС привязываются к координатам подионосферных точек в соответствующие моменты времени наблюдений. Временной шаг каждой карты определяется частотой записи ГНСС данных в RINEX-файлах и в нашем случае составляет 30 секунд.

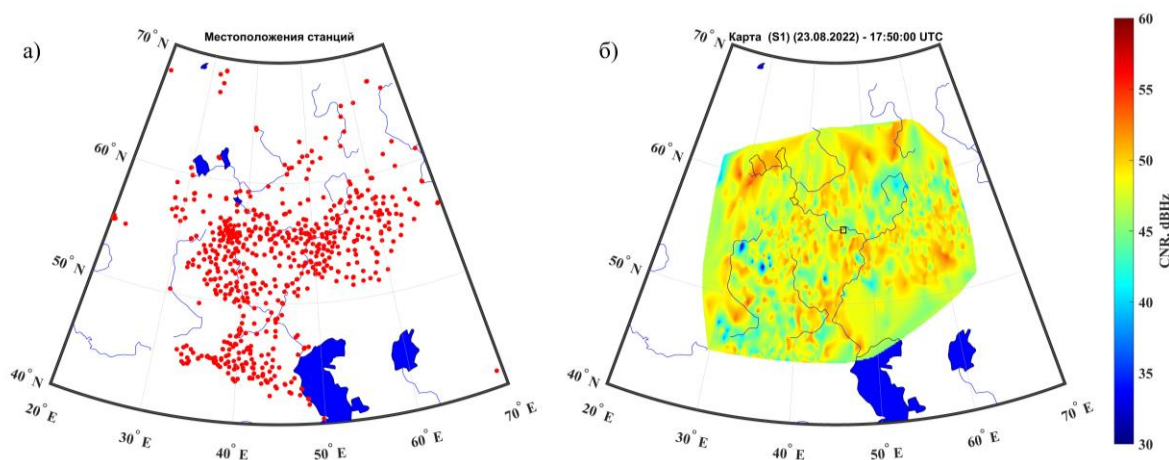


Рис. 1. а) Карта распределения ГНСС – станций; б) Карта мощности сигнала, объединенного по группе S1 для 23.08.2022

На рис. 1-б представлен пример отображения карты распределения сигналов мощности в регионе исследования. Так как значения мощности сигналов записывают не все наземные ГНСС-приемники, было решено объединить 14 параметров отношения сигнал-шум содержащихся в RINEX файле (S1C, S2W, S1, S2, S1P, S5X, S2C, S1X, S6X, S7X, S8X, S1I, S6I, S7I) по шести группам (S1, S2, S5, S6, S7, S8). На рис. 2 показана карта ПЭС за этот же экспериментальный день 23.08.2022, что и на рис. 1. Крупным планом выделена область пространства, по которой осуществлялась дальнейшая обработка (черный квадрат, вписанный в ДН), а именно, расчет медианных значений вариаций ПЭС и мощностей навигационных сигналов. Данная область была определена исходя из размеров диаграммы направленности (ДН) УНУ стенд СУРА, в проекции на географические координаты без учета рефракции и для высоты 250 км.

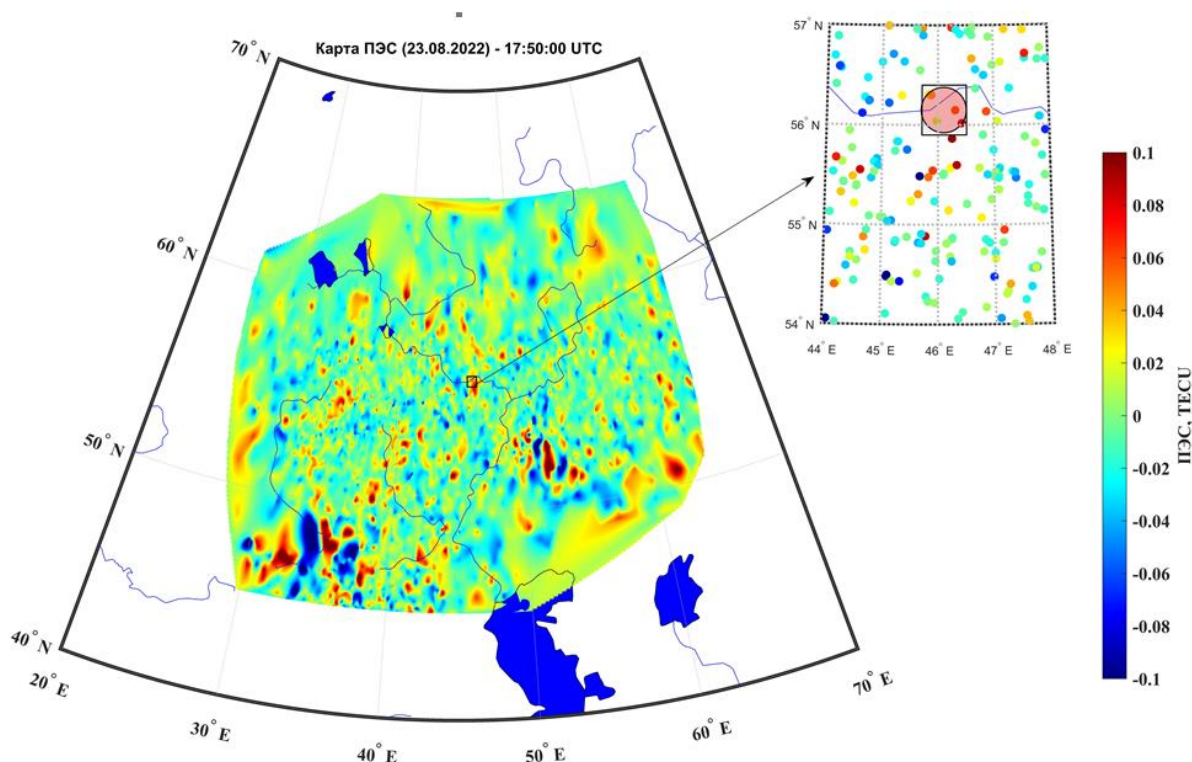


Рис. 2. Карта распределения ПЭС во время излучения волны накачки. В правом верхнем углу отображены значения ПЭС в соответствующих координатах подыоносферных точек. Красным кругом отмечена диаграмма направленности УНУ стенд СУРА. Черный квадрат, вписанный в ДН, отображает область пространства, по которой осуществлялась дальнейшая обработка.

Количество рассчитанных точек ПЭС, попавших в площадку, ограниченную ДН стенда СУРА в зависимости от времени варьировалось от 5 до 25. Для значений мощности навигационного сигнала количество точек, попавших в ДН, достигает 15, в зависимости от времени и типа сигнала. При этом часто в ДН не попадало вообще ни одной точки, особенно это относится к группам сигналов S5, S6, S7 и S8. Поэтому в дальнейшем для мощности сигналов будет использоваться площадка в 4 раза больше, чем указано на рис. 2. В таком случае мы получаем непрерывный ряд мощности сигнала, без пропусков связанных с отсутствием данных для рассматриваемой области.

Для определения корреляции между воздействием мощного излучения стенда СУРА и откликом ПЭС, а также мощности навигационных сигналов, были вычислены медианные значения исследуемых параметров, внутри рассматриваемых площадок. В качестве примера на рис. 3-6 отображены медианные вариации ПЭС и изменения

мощности сигналов для нескольких экспериментальных дней в зависимости от времени с учетом режима излучения волны накачки и уровня геомагнитной активности определяемого с помощью индекса Dst (рис. 6).

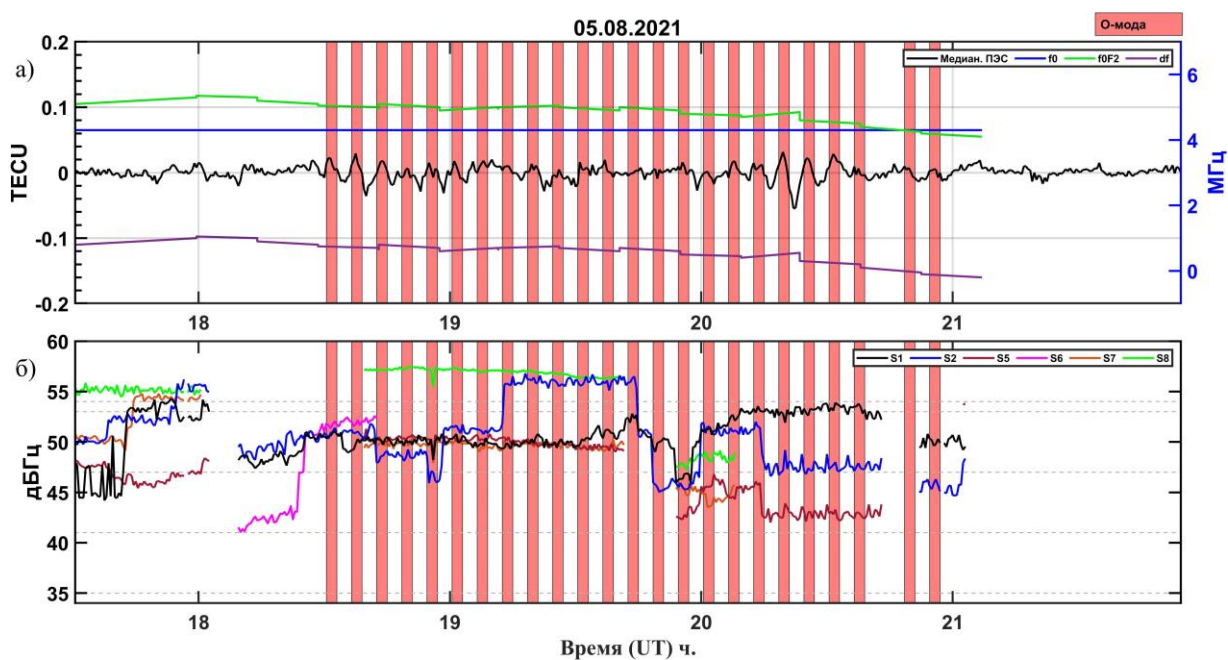


Рис. 3. Эксперимент 05.08.2021 г. О-мода. Излучение волны накачки показано красными вертикальными прямоугольниками. Режим излучения: 2.5 минуты нагрев; 3.5 минуты пауза. а) изменение ПЭС (черным), частота накачки (синим), критическая частота (зеленым), разница между критической частотой и частотой волны накачки (розовым). б) изменение мощности навигационных сигналов по шести группам (S1, S2, S5, S6, S7, S8).

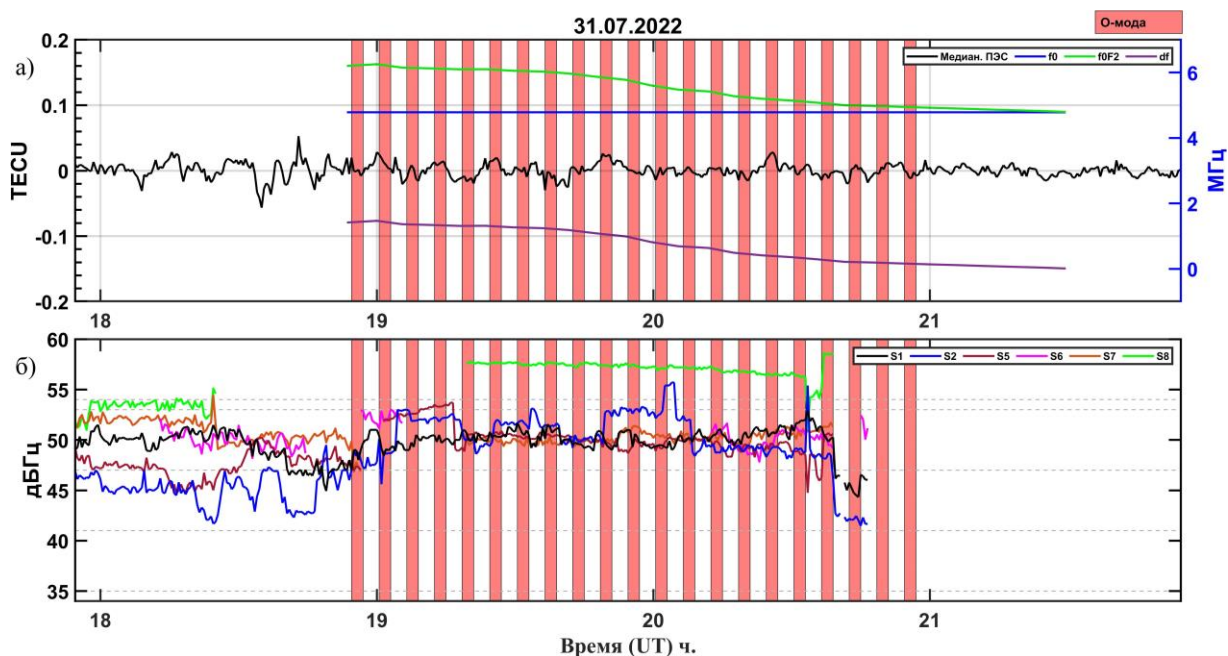


Рис. 4. Эксперимент 31.07.2022 г. О-мода. Обозначения аналогичны рис. 3

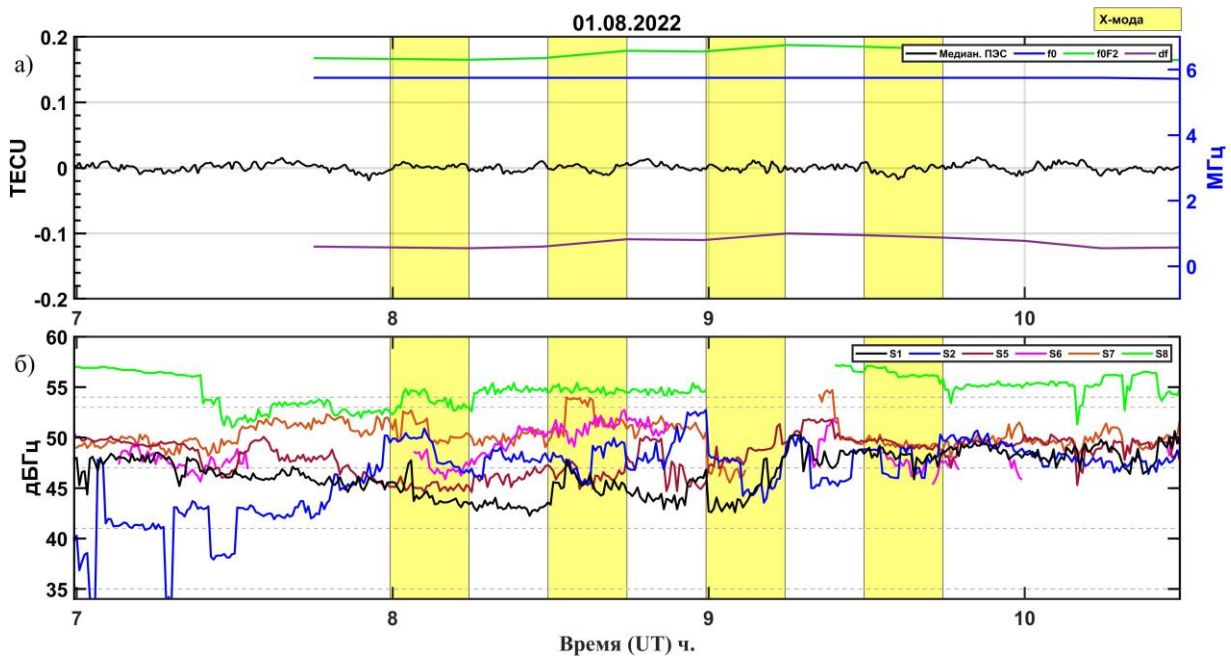


Рис. 5. Эксперимент 01.08.2022 г. X-мода. Излучение волны накачки показано желтыми прямоугольниками, остальные обозначения аналогичны рис. 3. Режим излучения: 15 минут нагрев; 15 минут пауза.

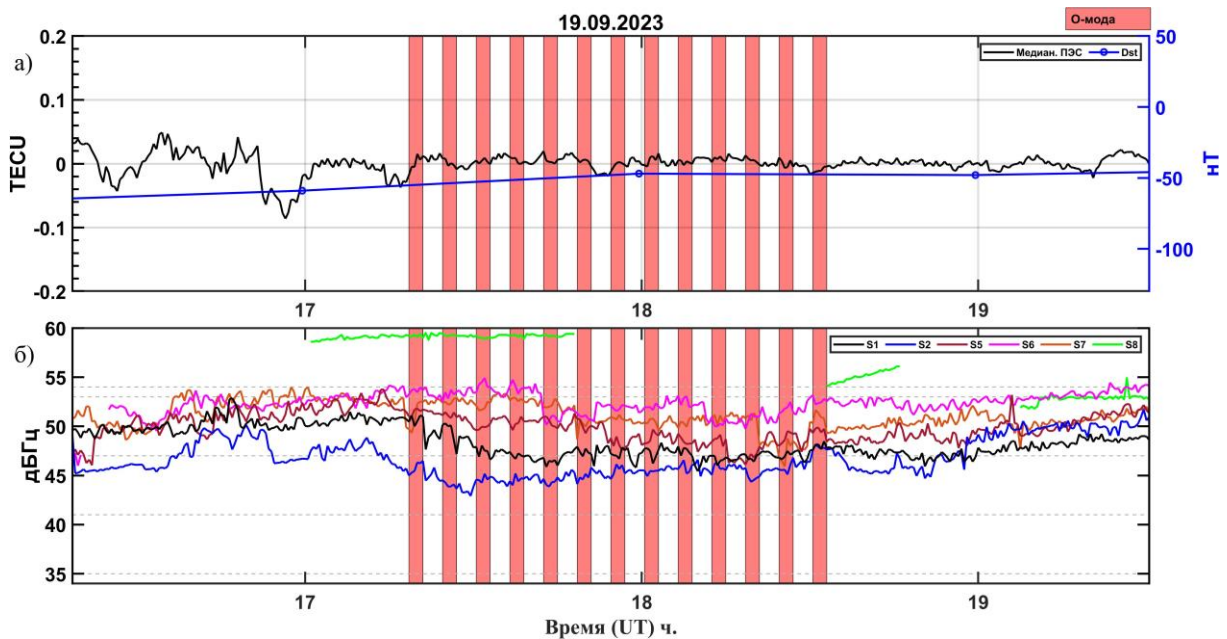


Рис. 6. Эксперимент 19.09.2023 г. O-мода. Обозначения аналогичны рис. 3. а) изменения ПЭС (черным), изменение индекса Dst (синим)

Заключение

Для большинства 6-ти минутных циклов излучения волны накачки O-поляризации характерно падение значения вариаций медианного ПЭС во время воздействия мощного излучения и возрастание во время пауз, что наглядно видно на рис 3, в первых 5 циклах. Для более длительных циклов накачки O-модой и для циклов накачки X-модой последовательного изменения вариаций медианного ПЭС выявить не удалось.

Значимого влияния на медианные значения мощности сигналов по группам S1-S8 коррелированного с режимом воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением

УНУ станд СУРА выявлено не было. При это стоит отметить, что наиболее стабильными являются сигналы из групп S1 и S2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00323.

Литература

1. Когогин Д.А., Насыров И.А., Шиндин А. В. И др. // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. - № 2. – С. 89-104.
2. Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., и др. // Солнечно-земная физика. - 2023. - Т. 9, № 2. - С. 52-59
3. Inside GNSS, Measuring GNSS Signal Strength: [Электронный ресурс]. New Jersey, 2010. URL: <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength/> (Дата обращения 25.02.2024).