

Солнечные вспышки в 25-м цикле активности: влияние на ионосферную возмущённость и мощность ГНСС-сигналов

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

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия
E-mail: denis-maksimov16@yandex.ru

Представлены результаты исследования влияния солнечных вспышек и геомагнитных бурь, произошедших в первой половине 25-го цикла солнечной активности, на ионосферную возмущённость. Особое внимание уделено исследованию отношения сигнал/шум для различных сигнальных компонент на приёмниках глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Были зафиксированы отклики ионосферы в виде повышения медианных значений индекса ROTI (*англ.* Rate of Total Electron Content Index) по региону исследования во время действия солнечных вспышек X- и M-классов до 0,2 TECU/мин с длительностью до получаса. Также зафиксирован отклик ионосферы на мощную геомагнитную бурю 10–11 мая 2024 г. с повышением медианного ROTI до 0,24 TECU/мин. Возмущения ионосферы длились при этом в течение действия магнитной бури. При исследовании изменений медианных значений отношения сигнал/шум по региону исследования выявлены снижения во время отдельных солнечных вспышек как с резким, так и плавным градиентом. Вспышки, вызвавшие снижения отношения сигнал/шум, сопровождалась радиоизлучением на рабочих частотах ГНСС. Значения снижения достигали 3–5 дБГц для большинства групп сигнальных компонент ГНСС, за исключением компоненты в частотном поддиапазоне L1. При рассмотрении отдельных векторов для пар спутник – приёмник были обнаружены сигналы со срывами передачи данных до 40 мин. Также были зафиксированы резкие снижения отношения сигнал/шум на 7 дБГц и более.

Ключевые слова: ГНСС, ионосфера, полное электронное содержание, ПЭС, ROTI, солнечная вспышка, солнечная активность, магнитные бури, отношение сигнал/шум, поток мощности солнечного радиоизлучения, 1415 МГц, ультрафиолет 26–34 нм

Одобрена к печати: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-301-317

Введение

В связи с вхождением Солнца в фазу максимума 25-го цикла активности (Язев и др., 2023; Lozitsky, Efimenko, 2023; <https://www.weather.gov/news/201509-solar-cycle>; <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>) определённый научный интерес представляет рассмотрение вопроса влияния на возмущённость ионосферы и мощность сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) наиболее заметных гелиогеофизических событий текущего солнечного цикла. Данный интерес обуславливается и тем, что ГНСС-сигналы являются основой большинства систем наземного позиционирования, их стабильность и качество работы играет важную роль в современной хозяйственной и экономической деятельности.

Сигналы ГНСС, проходя путь от источника (навигационного спутника) до любого наземного приёмника, подвержены воздействию со стороны среды распространения, в частности ионосферы. Под воздействием внешних факторов, например, таких как потоки рентгеновского, ультрафиолетового излучения Солнца, потоки частиц и т. д., в ионосфере образуются различного масштаба неоднородности концентрации свободных электронов и ионов. Что, в свою очередь, приводит к временным задержкам сигналов, уширению доплеровского спектра и, как следствие, к увеличению ошибок позиционирования.

Одним из наиболее популярных методов исследования возмущённости ионосферы и количественной оценки неоднородностей различного масштаба является трансionoсферное зондирование сигналами ГНСС. В частности, определение полного электронного содержания (ПЭС) в толще атмосферы на пути распространения сигнала от спутника к наземному

приёмнику (ГНСС-станции) и других индексов возмущённости на его основе, таких как ROT (*англ.* Rate of Total Electron Content (TEC)), ROTI (*англ.* Rate of TEC Index) (Pi et al., 1997), AATR (*англ.* Along Arc TEC Rate) и др. Исследование отклика ионосферы по значениям ПЭС на воздействие солнечных вспышек ранее уже применялось. Так, в работах (Сыроватский и др., 2018; Qian et al., 2019) показано, что повышение ионизации в результате воздействия солнечных вспышек приводит к увеличению ПЭС. Данный факт обусловлен тем, что на высотах выше 100 км основным источником ионизации ионосферы является ультрафиолетовое излучение (5–105 нм) (Афраймович, Перевалова, 2006).

Спектр частот излучения во время солнечной вспышки достаточно широкий, так, радиовсплески Солнца охватывают весь L-диапазон частот, являющихся рабочими для ГНСС (1176–1610 МГц), приводя к затуханию отношения сигнал/шум (de Paula et al., 2022), так как солнечное излучение в данном случае действует как повышенный фоновый шум. В работах (Afraimovich et al., 2008; Yasyukevich et al., 2021) порогом для снижения соотношения сигнал/шум до 10 дБ отмечается значение радиовсплеска 4000 с.е.п. (солнечные единицы потока, 1 с.е.п. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). В публикации (Sato et al., 2019) было обнаружено снижение на 10 дБГц в частотных диапазонах L2 и L5 при воздействии радиовсплеска в 2000 с.е.п.

В работе (Максимов и др., 2023) были выявлены реакции медианных вариаций ПЭС по региону исследования на солнечные вспышки X- и M-классов, произошедшие в 2017 г. (24-й цикл солнечной активности), превышающие фоновые значения на порядок. По сравнению с данными за 2017 г. в 2022–2024 гг. значительно увеличилось количество приёмных ГНСС-станций в рассматриваемой области с 120 до 800–1100. В силу увеличения количества приёмных станций и возможности записи данных всех ГНСС-систем для большинства станций возросло количество лучей спутник – приёмник в исследуемом регионе, изменилась геометрия его зондирования, улучшилось пространственное разрешение карт ПЭС, ROTI. Исследуемый регион представляет в настоящей работе широтно-долготный сектор (40–65° с. ш.; 25–65° в. д.). Стоит также отметить, что до сих пор подавляющая часть экспериментальных данных ГНСС-радиозондирования на плотных сетях и соответственно результатов исследований получена для таких регионов, как Япония, США, Западная Европа, либо же в мировом масштабе, поэтому важной задачей становится использование растущей сети ГНСС-станций на территории РФ в научных исследованиях с целью построения региональных карт возмущённости ионосферы и мощности навигационных сигналов в виде тепловых карт, обладающих высоким пространственно-временным разрешением.

Учитывая описанные выше обстоятельства, целью настоящей работы является детальный анализ влияния солнечных вспышек первой половины 25-го цикла солнечной активности на ионосферную возмущённость всего исследуемого региона с использованием набора экспериментальных данных, включающего в себя индекс ионосферной возмущённости ROTI, полученный на основе данных полного электронного содержания с распределённой сети ГНСС-станций, отношение сигнал/шум для различных сигнальных компонент, интенсивность рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца, а также поток мощности радиоизлучения на частоте 1415 МГц и индексы космической погоды Dst и Kp.

Методология исследования

В настоящей работе используются двухчастотные фазовые измерения (Афраймович, Перевалова, 2006) от четырёх действующих ГНСС: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, а для оценки возмущённости ионосферы — индекс ROTI, представляющий собой стандартное отклонение скорости изменения ПЭС для выбранной пары спутник – приёмник в некотором временном интервале (Pi et al., 1997). Для расчёта ROT фиксированный шаг наблюдений по времени выбран равным 1 мин, а временной интервал для ROTI — 5 мин, что в целом используется в большинстве исследований с применением данного индекса. Единицы измерения ROT и ROTI — TECU/мин. Так как целью исследования являлась оценка ионосферной возмущённости и отношения сигнал/шум и их реакции на экстремальные гелиогеофизические собы-

тия всего исследуемого региона, представляющего широтно-долготный сектор (40–65° с. ш.; 25–65° в. д.) (рис. 1а), в работе не рассматривались локальные отношения сигнал/шум, индексы ROT, ROTI для отдельных лучей спутник – приёмник, а рассчитывались медианные значения по всей области в каждый фиксированный момент времени с частотой соответствующей записи ГНСС-данных. Исключением является лишь вспышка X2.2 от 09.05.2024, когда детально были изучены отдельные ряды отношения сигнал/шум для пар спутник – приёмник. Можно ожидать, что медианные по области исследования значения ионосферной возмущённости по индексу ROTI и отношения сигнал/шум могут показать влияние значимых гелиогеофизических событий в широкой области пространства без учёта настроек каждого приёмника ГНСС-сети отдельно.

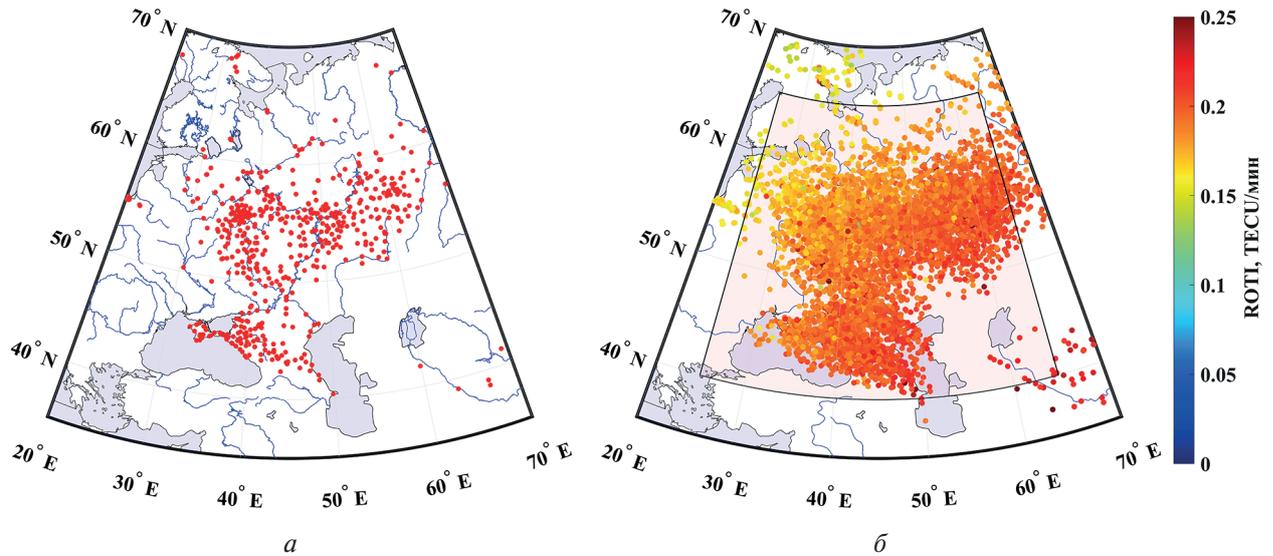


Рис. 1. Распределённая ГНСС-сеть (а) и пример карты отображения пространственного распределения индекса ROTI 10.05.2024 во время действия солнечной вспышки X3.9, 06:44 UTC (англ. Coordinated Universal Time) (б). Выделенная область отражает регион, по которому вычислялись исследуемые медианные параметры

Исходный набор ГНСС-данных представляет собой RINEX-файлы версий 2.11, 3.02 (Gurtner, Estey, 2007, 2013) с частотой записи раз в 30 с. Количество приёмных станций варьировалось от 800 до 1100 (см. рис. 1а) в зависимости от дня исследования.

В работе рассматриваются экстремальные гелиогеофизические события, в первую очередь солнечные вспышки 25-го цикла солнечной активности, произошедшие в период 2022–2024 гг. Частота возникновения солнечных вспышек X- и M-классов существенно выросла в 2024 г. (табл. 1), включая повышение плотности излучения вспышек в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, поэтому большая часть изученных событий относится к 2024 г.

Таблица 1. Количество солнечных вспышек в 2022–2024 гг. (<https://www.spaceweatherlive.com>)

Год	Количество произошедших солнечных вспышек		
	С-класса	M-класса	X-класса
2022	2036	178	7
2023	2752	342	13
2024	2740	673	28

Для подробного исследования были выбраны следующие дни: 30.04.2022, 10.05.2022, 08–11.05.2024 (табл. 2). В табл. 2 приводится количество солнечных вспышек за день, минимальное значение индекса Dst и максимальное значение индекса Kp (https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/; <https://xras.ru>).

Таблица 2. Характеристики солнечных вспышек и состояние космической погоды в выбранные для дальнейшего анализа дни

День	Количество произошедших солнечных вспышек		Мин. Dst, нТ	Макс. Kp
	М-класса	Х-класса		
30.04.2022	4	1	–47	3
10.05.2022	0	1	–19	3
08.05.2024	13	3	–5	3
09.05.2024	12	2	2	4
10.05.2024	10	1	–351	9
11.05.2024	5	2	–412	9

Для обнаружения отклика ионосферы использовался программный комплекс, представленный в работе (Когогин и др., 2020).

Кратко об этапах обработки:

1. Вычисление из RINEX-файлов значений ПЭС, ROT, ROTI; получение значений отношения сигнал/шум для пар спутник – приёмник.
2. Учёт данных только для моментов времени, когда угол видимости между навигационным спутником и приёмником был более 30°.
3. В каждый фиксированный момент времени вариациям ПЭС, индексам ROT, ROTI и значениям сигнал/шум сопоставляется координата подионосферной точки, привязанная к высоте 300 км.
4. По полученным данным для каждого фактического момента записи строилось двумерное изображение пространственного распределения ROTI и отношения сигнал/шум (см. рис. 1б).
5. Итоговым результатом обработки являются суточные ряды медианных значений ROTI и отношения сигнал/шум по региону исследования (область выделена на рис. 1б).

Для дальнейшего анализа данных отношения сигнал/шум все сигнальные компоненты были объединены в шесть групп: **S1** (с сигнальными компонентами S1, S1C, S1X, S1P, S1I), **S2** (S2, S2W, S2C), **S5** (S5X), **S6** (S6X, S6I), **S7** (S7X, S7I), **S8** (S8X) (Gurtner, Estey, 2013), далее S1–S8. Ниже на рис. 2 (см. с. 305) представлено общее количество доступных авторам ГНСС-приёмников распределенной ГНСС-сети, представленной на рис. 1, а также сигнальные компоненты отношения сигнал/шум, записываемые данными приемниками за 08.05.2024. Из общего количества ГНСС-приёмников рассматриваемые компоненты регистрировали 550–600 станций.

Стоит отметить, что объединение компонент в группы было необходимо для повышения количества точек (данных отношения сигнал/шум на луче спутник – приёмник в фиксированный момент времени), попадающих в исследуемый регион, т. е., по сути, для повышения чувствительности данного подхода к оценке влияния солнечных вспышек и геомагнитных бурь с использованием картирования отношения сигнал/шум. Обеспечить более высокую детализацию можно также за счёт нанесения на карту всех сигнальных компонент в фиксированный момент времени, но это едва ли является правильным, учитывая их широкий частотный диапазон (1176–1610 МГц), и, скорее всего, окажет отрицательный эффект на чувствительность. Увеличение же времени накопления точек на карте в силу низкой частоты регистрации ГНСС-данных может негативно сказаться на интерпретации результатов.

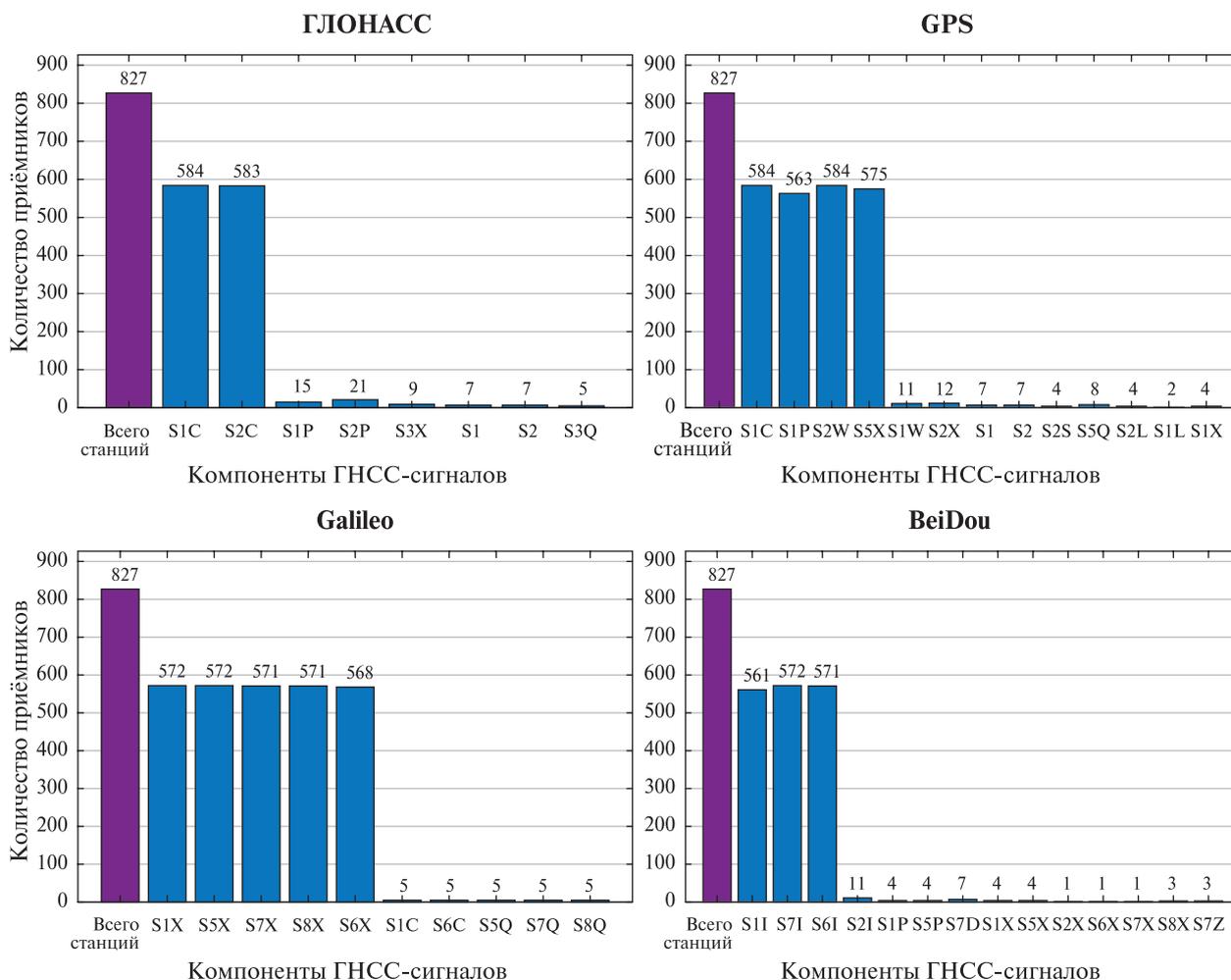


Рис. 2. Количество приёмников, записывающих данную компоненту сигнала (синий цвет), общее количество приёмников для 08.05.2024 (фиолетовый)

Среднесуточное количество точек (значений отношения сигнал/шум) для групп сигналов, попадающих в регион исследования (выделенная часть рис. 1б), составляет: S1 — 3100, S2 — 1600, S5 — 1200, S6 — 650, S7 — 1100, S8 — 100 шт. Для ROTI в каждый момент измерения ~5200 точек попадают в рассматриваемый регион.

Для анализа также были использованы данные рентгеновского излучения в диапазоне 0,1–0,8 нм (<https://swx.sinp.msu.ru/>), данные ультрафиолетового излучения в диапазоне 26–34 нм (https://lasp.colorado.edu/eve/data_access/eve_data/lasp_soho_sem_data/long/15_sec_avg/), данные потока мощности радиоизлучения на частоте 1415 МГц (<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-1-second/san-vito/>), спектры излучения Солнца в частотном диапазоне 1,0–2,0 ГГц (<https://www.asu.cas.cz/~radio/>).

Результаты исследования

Основываясь на методологии обработки данных, рассмотренной выше, в этом разделе представлены результаты анализа индекса ROTI и отношения сигнал/шум для выбранных групп сигналов в период воздействия солнечных вспышек и геомагнитных бурь на верхнюю атмосферу Земли в 2022–2024 гг.

Особое внимание уделено анализу влияния вспышки X2.2 от 09.05.2024, сопровождающейся радиовсплеском, на отношение сигнал/шум для отдельных лучей спутник – приёмник в выбранном регионе исследования.

Влияние солнечных вспышек и геомагнитных бурь на медианные значения индекса ROTI и отношения сигнал/шум по региону исследования

Произошедшая 30.04.2022 солнечная вспышка X1.1 в 13:46 UTC вызвала повышение медианных значений ROTI до 0,05 TECU/мин (рис. 3а). Данная вспышка произошла в момент освещённости исследуемого региона Солнцем. Далее на панелях рис. 3–12, за исключением рис. 7 и 9, области с белым фоном всегда соответствуют времени между восходом и заходом Солнца. Дополнительными элементами на рис. 3–12 отображены зафиксированные вспышки X- и M-классов (красными и жёлтыми вертикальными полосами) в рентгеновском диапазоне. На верхней панели а рис. 3, 4, 6, 8, 11, 12 красная кривая показывает изменение рентгеновского излучения в диапазоне 0,1–0,8 нм, синяя — изменение ультрафиолетового излучения в диапазоне 26–34 нм. Средняя панель б на этих рисунках отображает изменение значений сигнал/шум для групп S1–S8. На нижней панели в рис. 3, 4, 6, 8, 11, 12 синяя кривая соответствует потоку мощности радиоизлучения на частоте 1415 МГц, чёрная — Dst, красная — Kp.

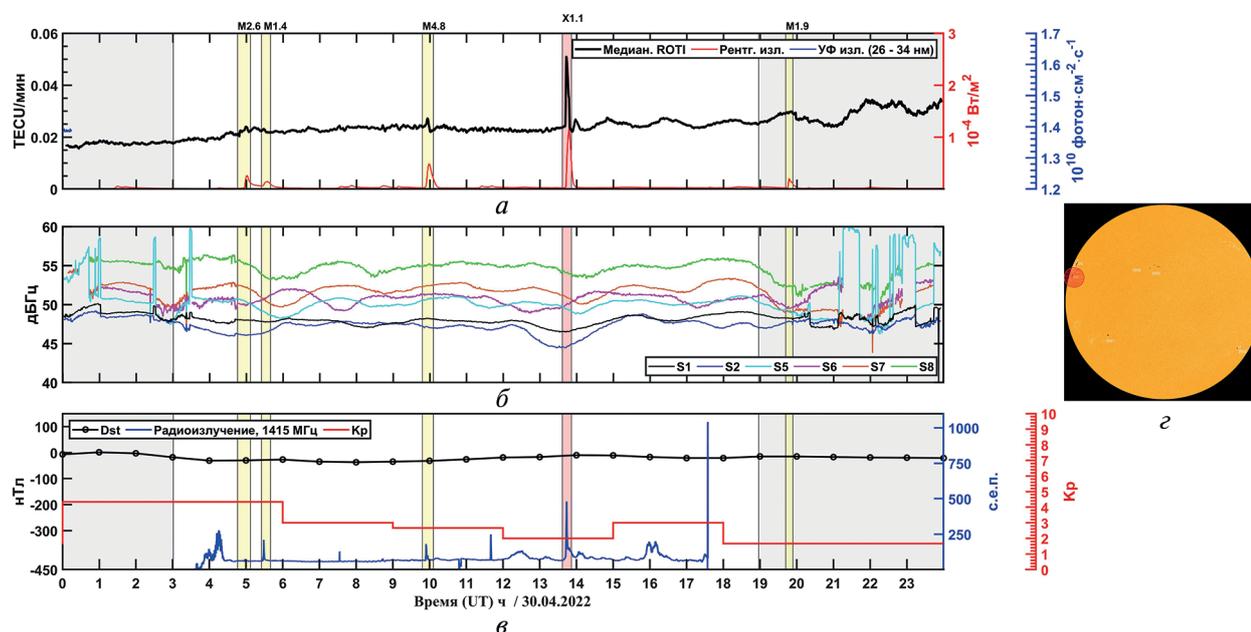


Рис. 3. Суточная динамика возмущённости ионосферы и отношения сигнал/шум в широтно-долготном секторе (40–65° с.ш.; 25–65° в.д.): а — медианный по региону ROTI, TECU/мин (чёрная кривая), плотность потока рентгеновского излучения Солнца, Вт/м² (красная), поток ультрафиолетового излучения Солнца, фотон·см⁻²·с⁻¹ (синяя); б — медианное отношение сигнал/шум для групп сигналов S1–S8, дБГц; в — индекс Dst, нТл (чёрная кривая), поток мощности радиоизлучения на частоте 1415 МГц, с.е.п. (синяя) и индекс Kp (красная). Красные и жёлтые вертикальные полосы соответствуют длительности вспышек X- и M-классов соответственно, область с белым фоном — освещённости региона исследования Солнцем; z — Солнечный диск с отображением группы пятен (красный круг), откуда произошла вспышка

Стоит отметить, что отклик ионосферы на вспышки помимо плотности потока излучения зависит и от местоположения вспышки на солнечном диске, на рис. 3z красным кругом выделена группа пятен, откуда произошли вспышки. Чем ближе пятно к центральному солнечному меридиану, тем более существенное влияние на ионосферу она оказывает (Леонович, 2003; Afraimovich et al., 2001).

Отмеченные солнечные вспышки 30.04.2022 произошли из пятна, находящегося на восточном краю солнечного диска, здесь и далее данные о положении пятна приводятся согласно сайту (<https://www.spaceweather.com>). Подобные недолгие, в пределах получаса, воз-

мушения ROTI, отличающиеся от фоновых значений в амплитуде до 0,08 TECU/мин, наблюдаются в большинстве последующих рассматриваемых исследовательских дней.

Большой отклик ROTI показали дни 10.05.2022 (рис. 4а) и 10.05.2024 (рис. 11а, см. с. 311). 10.05.2022 была единственная вспышка X1.5, в 13:50 UTC, которая вызвала возмущение медианного ROTI до 0,16 TECU/мин. Данная вспышка произошла из центрального меридиана Солнца (см. рис. 4г).

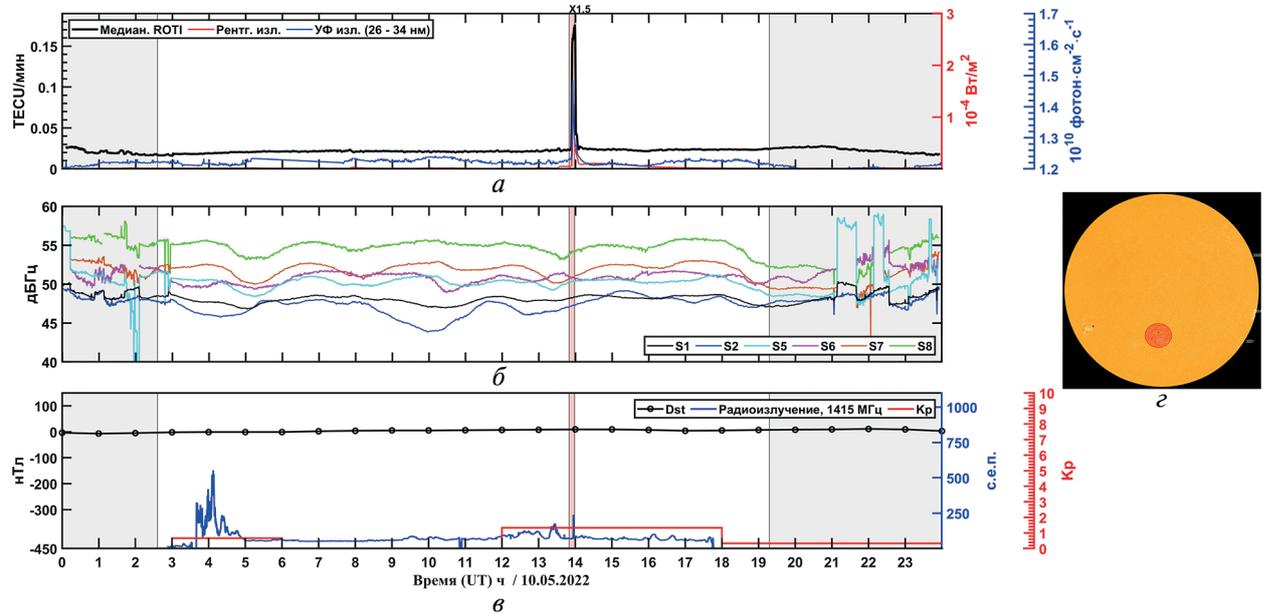


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для 10.05.2022

На рис. 5 (см. с. 308) отображена динамика изменения ROTI по региону исследования для 10.05.2022 в интервале 13:35–14:10 UTC, когда была зарегистрирована вспышка X1.5. На верхней панели представлены карты распределения ROTI. Карты на рис. 5, А–Д соответствуют точкам, отмеченным на графике ROTI нижней панели.

В дополнение к оценкам влияния степени ионизации ионосферы в период регистрации солнечных вспышек выделим влияние на показатели отношения сигнал/шум. Так, во время действия вспышки M8.7 08.05.2024 в 11:40 UTC наблюдается резкое снижение значений на 3–4 дБГц в рассматриваемом регионе (рис. 6б, см. с. 308). Данный отклик заметен на всех группах сигналов, кроме группы S1. Также в этот день можно выделить уменьшение отношения сигнал/шум сразу в нескольких группах сигналов: S5, S7, S8 во время вспышки X1.0, 04:40–05:30 UTC, однако понижение было плавным и не превышало 2 дБГц, что явно не выделяется на фоне суточной динамики. Значения потока мощности Солнца (радиовсплеск) на частоте 1415 МГц во время вспышки X1.0 достигали 593 с.е.п., что не вызвало заметного снижения отношения сигнал/шум. Также стоит принять во внимание, что рассматривается суточная динамика медианных значений по региону в исследуемой группе сигнальных компонент, а не ряды отношения сигнал/шум для отдельных лучей.

Особенностью дня исследования 08.05.2024 являются две группы пятен, откуда происходили вспышки. Первая группа 3663, обозначенная на рис. 6а, г красными кругами, находилась на восточном краю диска Солнца. Группа 3664, отмеченная синими кругами, была вблизи центрального меридиана, из этой группы пятен произошла вспышка M8.7, вызвавшая снижение медианного отношения сигнал/шум на 4–5 дБГц. В сопровождение данной вспышки было зафиксировано повышение радиовсплеска на частоте 1415 МГц до 2400 с.е.п. По данным спектра (рис. 7б, см. с. 309) видно, что во время вспышки M8.7 зафиксирован радиовсплеск в диапазоне 1,0–2,0 ГГц в 12:05–12:15 UTC, что привело к заметному снижению медианных значений сигнал/шум для всех сигнальных групп, кроме S1.

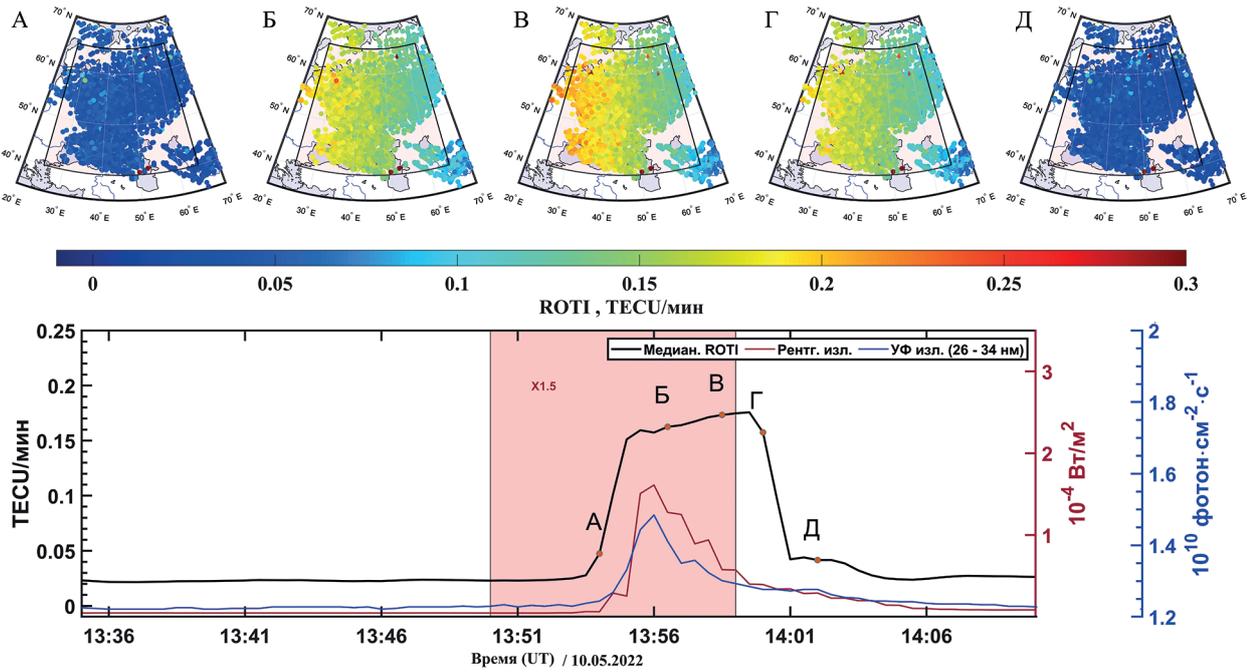


Рис. 5. Динамика ROTI в период регистрации вспышки X1.5 10.05.2022. Верхняя панель: отображение карт распределения ROTI для 10.05.2022 с выделенным регионом исследования. Нижняя панель: медианный по региону индекс ROTI, TECU/мин (чёрная кривая), точками А–Д отмечено время наблюдений, соответствующее картам на верхней панели; интенсивность рентгеновского излучения Солнца (0,1–0,8 нм), Вт/м² (красная кривая); поток ультрафиолетового излучения Солнца (26–34 нм), фотон·см⁻²·с⁻¹ (синяя кривая); красным прямоугольником выделена длительность вспышки X1.5

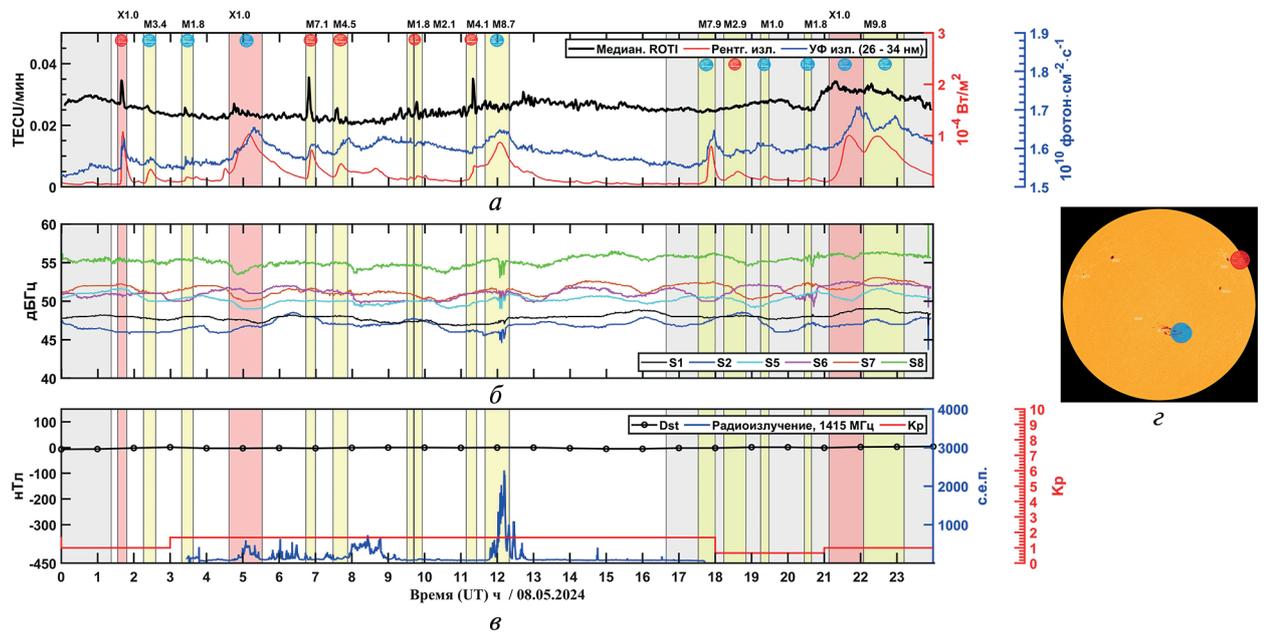


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для 08.05.2024

Анализируя спектр радиоизлучения Солнца в частотном диапазоне 1,0–2,0 ГГц (см. рис. 7а), можно выделить наличие потока радиоизлучения в интервале 08:00–08:30 UTC в частотах 1,0–1,6 ГГц, что вызвало заметное, но незначительное снижение медианного отношения сигнал/шум для сигнальных компонент S6, S8 ~2 дБГц.

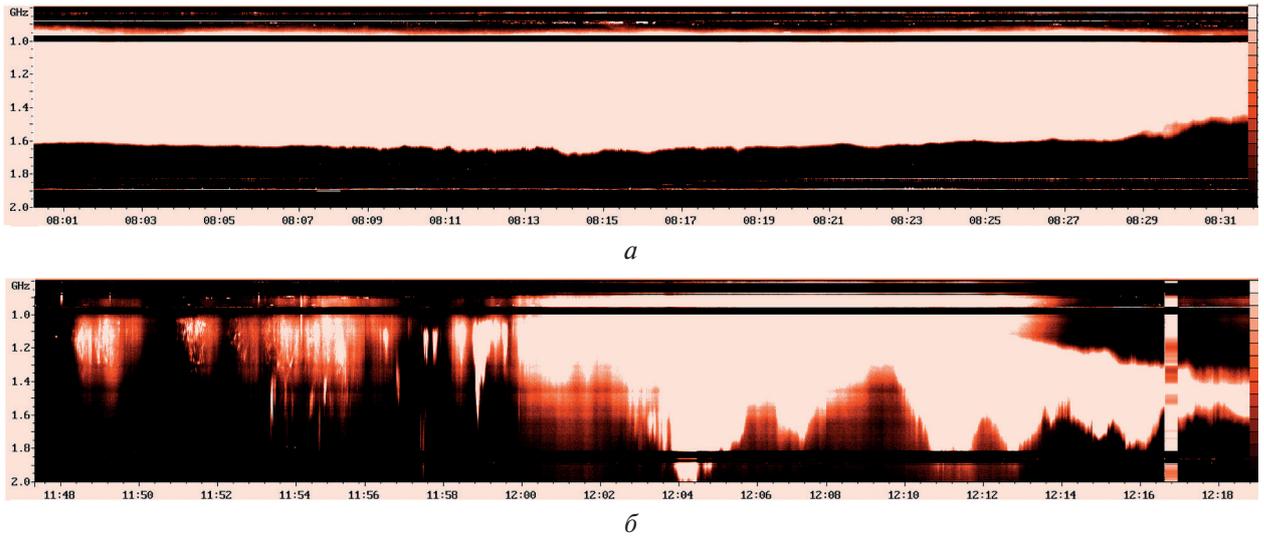


Рис. 7. Спектр излучения Солнца в частотном диапазоне 1,0–2,0 ГГц для 08.05.2024: а — 08:00–08:32 UTC; б — 11:47–12:19 UTC

Наиболее ярким зафиксированным событием является отклик отношения сигнал/шум на вспышку X2.2, произошедшую 09.05.2024 в 08:45 UTC (рис. 8б). Так же, как и в предыдущих случаях, снижение наблюдается для всех групп сигналов, кроме S1. Подавление сигнал/шум наблюдалось в трёх разных промежутках времени, соответствующих одной вспышке в рентгеновском диапазоне: первое снижение зафиксировано на 4–6 дБГц (09:00 UTC), второе и третье, к окончанию вспышки, на 2–3 дБГц (09:40, 10:00 UTC). Данные снижения хорошо соотносятся с тремя пиками в радиоизлучении на частоте 1415 МГц, достигающими значений 2 435, 176 000, 250 000 с. е. п. соответственно (см. рис. 8в).

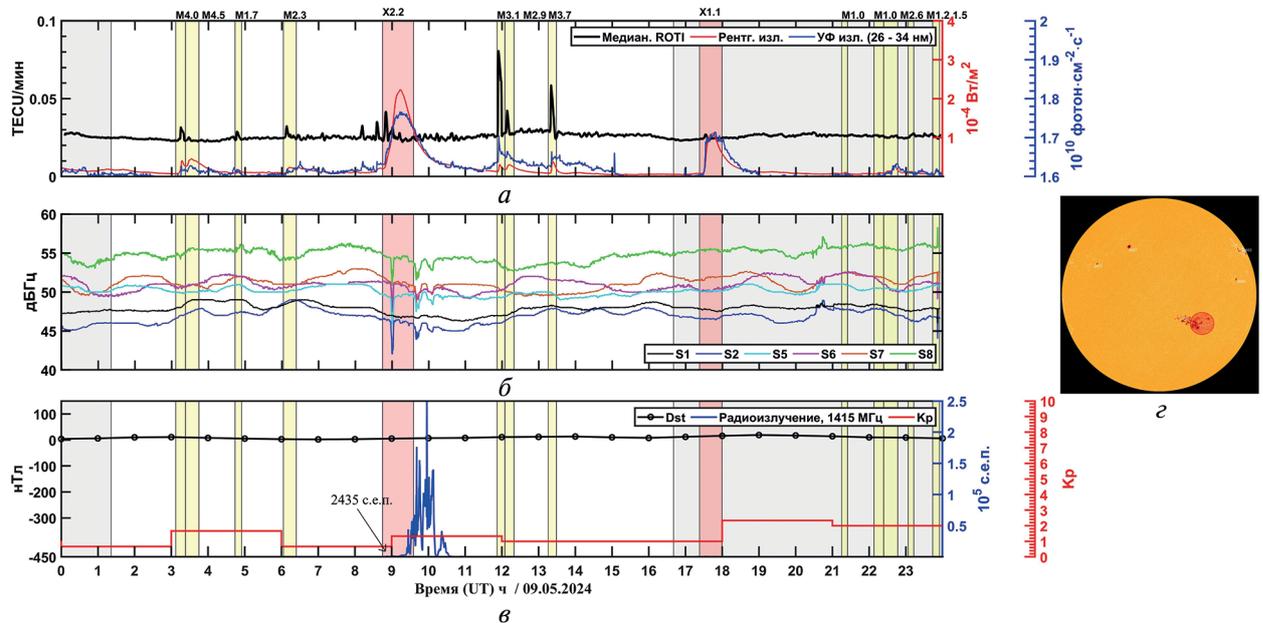


Рис. 8. То же, что на рис. 3, для 09.05.2024

Также по спектру радиовсплесков на рис. 9 (см. с. 310) видно увеличение потока в частотном диапазоне работы ГНСС: около 09:00 на частотах 1,0–1,4 ГГц, для интервала 09:25–10:03 UTC на частотах 1,0–2,0 ГГц.

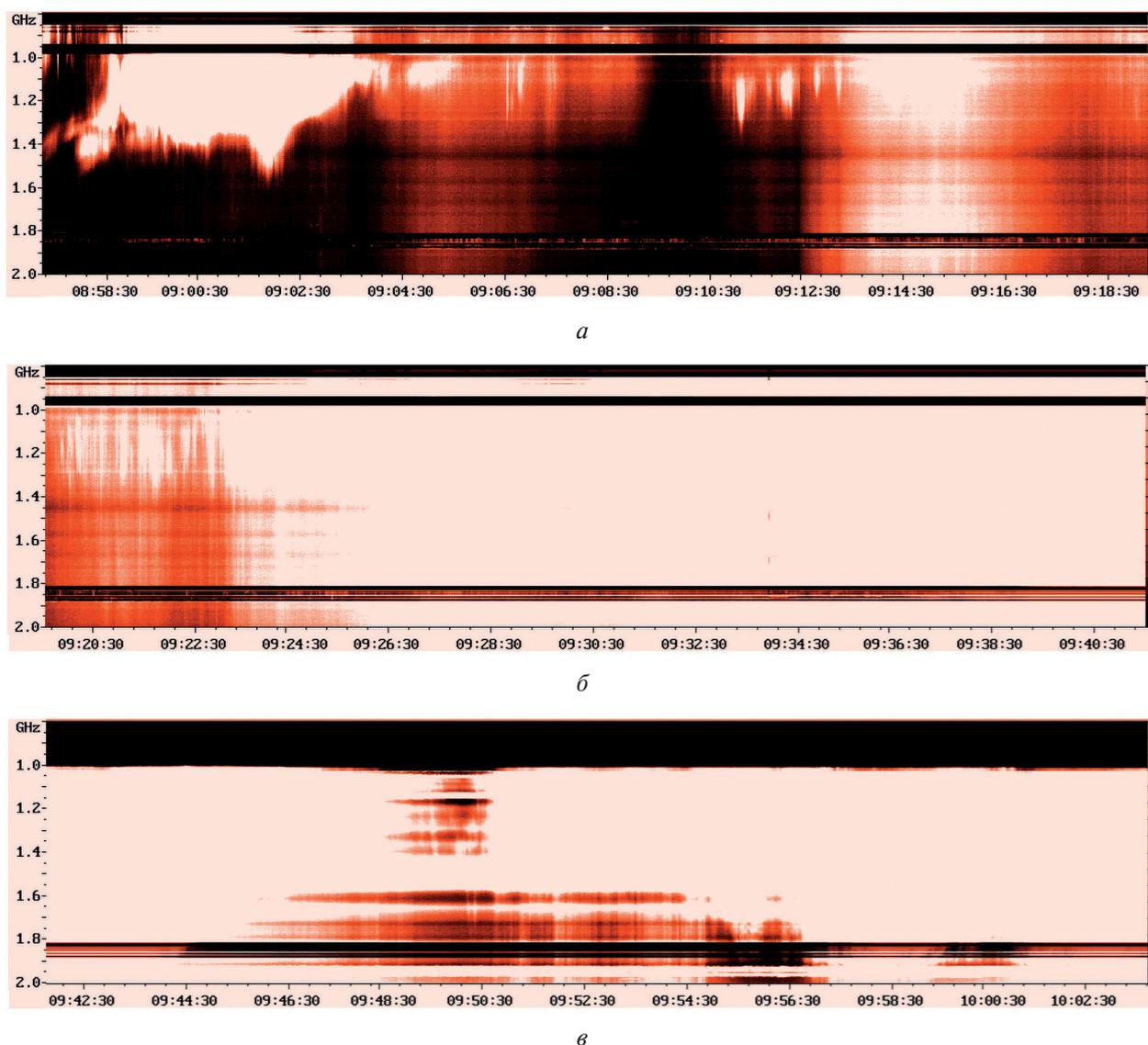


Рис. 9. Спектр излучения Солнца в частотном диапазоне 1,0–2,0 ГГц для 09.05.2024:
a — 08:57–09:19 UTC; *б* — 09:19–09:41 UTC; *в* — 09:41–10:03 UTC

На рис. 10 (см. с. 311) более подробно рассмотрено описанное выше событие на примере изменения отношения сигнал/шум для компонент группы S2 (S2, S2W, S2C). Исходя из данных картирования отношения сигнал/шум для группы S2, представленных на верхней панели рис. 10, видно неравномерное снижение данного показателя. Учитывая, что для значений отношения сигнал/шум на картах различаются углы видимости луча спутник – приёмник и настройки приёмников, можно отметить общую тенденцию к уменьшению фиксируемых значений в области исследования во время действия радиовспышек (см. рис. 10, Б, Г).

10.05.2024 зафиксировано повышение ROTI до 0,19 TECU/мин во время вспышки X3.9 в 06:27 UTC (рис. 11а, см. с. 311). Вспышка X3.9 зафиксирована в юго-восточной стороне солнечного диска. Также видно повышение до 0,2 TECU/мин примерно в 22:30 UTC, когда индекс Dst достигал значений -351 нТ (Кр = 9), во время мощной геомагнитной бури.

Необходимо отметить, что возмущения ионосферы с повышением ROTI над фоновыми значениями начались примерно в 18:30 UTC 10.05.2024 и продолжались в течение следующего дня (рис. 12а, см. с. 312).

При этом не произошло наложения эффекта от геомагнитной бури на действие вспышек X5.8 и X1.5 в 01:10 и 11:15 UTC соответственно (см. рис. 12а). Вспышка X5.8 11.05.2024,

возможно, не оказала существенного эффекта, так как произошла, когда Солнце ещё не полностью вышло из-за горизонта для исследуемого региона. Так же как и все вспышки X-и M-классов, произошедшие во время неосвещённости Солнцем региона исследования, не вызвали видимых возмущений (см. рис. 6, 8). К тому же пятно возникновения вспышек сместилось ближе к восточному краю диска Солнца.

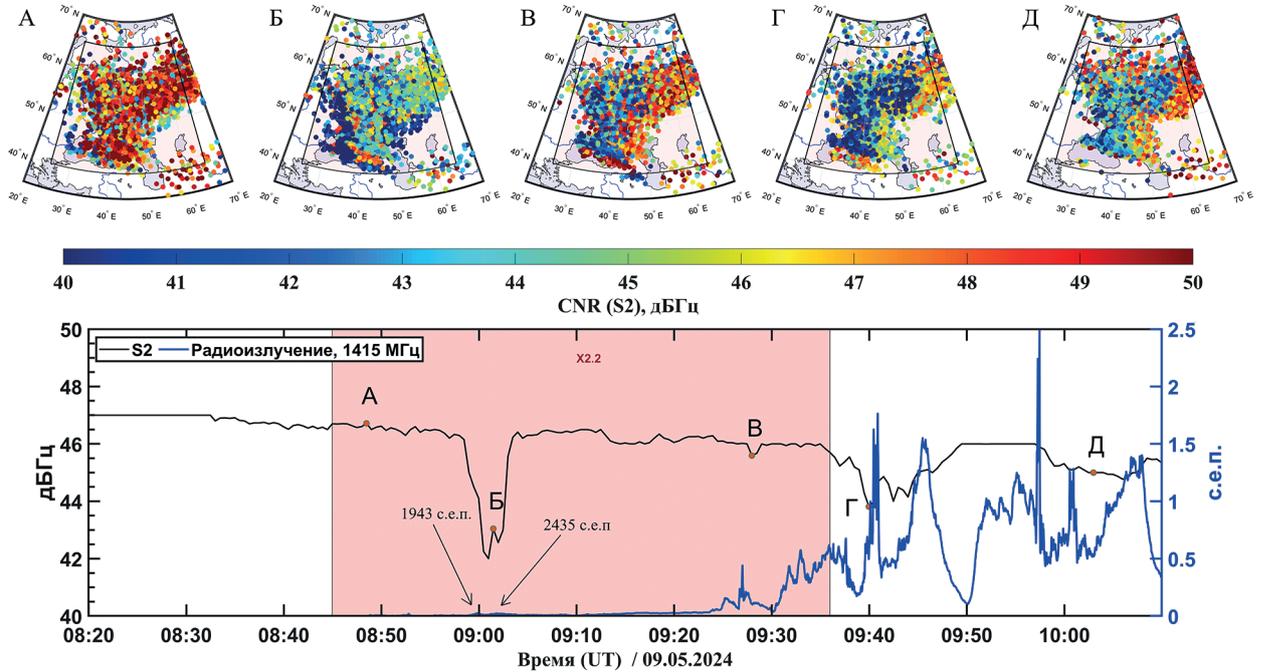


Рис. 10. Динамика отношения сигнал/шум группы S2 в период регистрации вспышки X2.2 09.05.2024. Верхняя панель: отображение карт распределения отношения сигнал/шум для компонент группы S2 с выделенным регионом исследования. Нижняя панель: медианное значение отношения сигнал/шум для группы сигналов S2 (чёрная кривая), точками А–Д отмечено время наблюдений для карт на верхней панели; радиоизлучение Солнца на 1415 МГц (синяя кривая); красным прямоугольником выделена длительность вспышки X2.2 в рентгеновском диапазоне

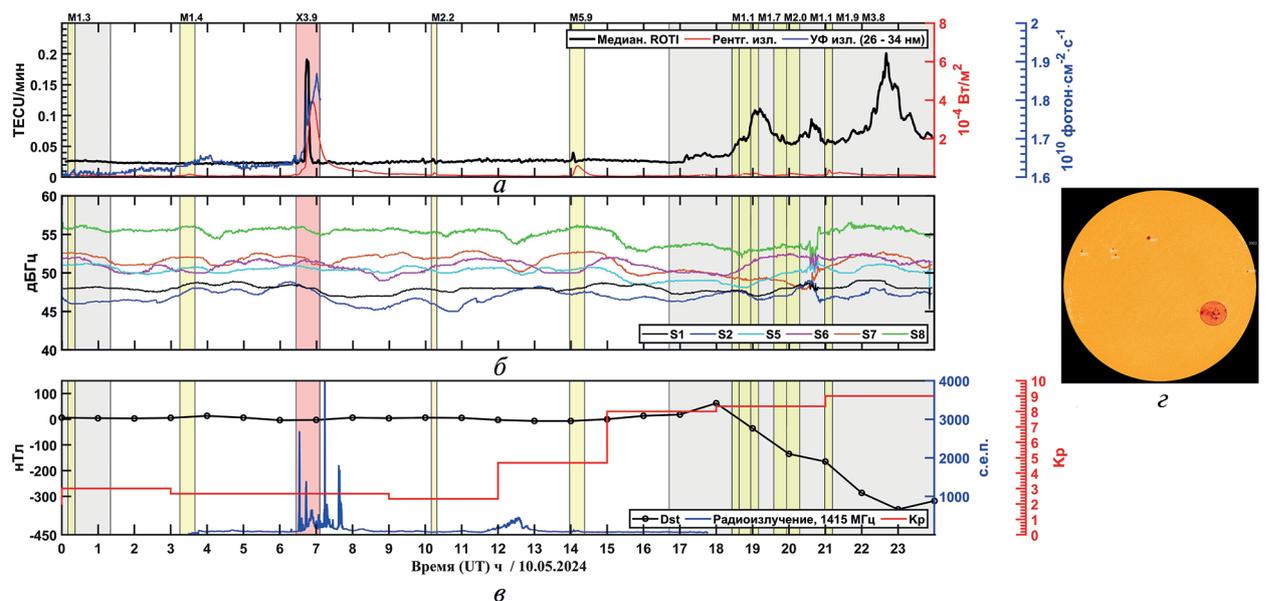


Рис. 11. То же, что на рис. 3, для 10.05.2024

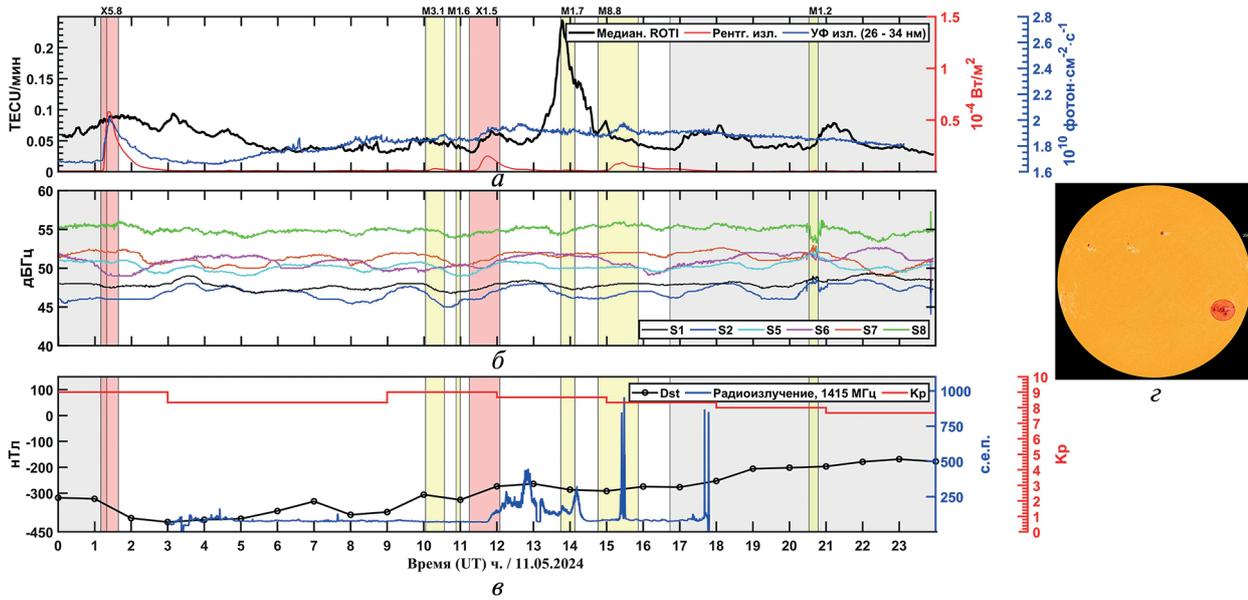


Рис. 12. То же, что на рис. 3, для 11.05.2024

Однако можно отметить, что 11.05.2024 во время вспышки M1.7 было зарегистрировано максимально наблюдаемое значение ROTI из всех рассмотренных в работе дней, равное 0,24 TECU/мин (14:00 UTC), при этом индексы геомагнитной активности достигают экстремальных значений $K_p = 9$, $Dst = -264$ нТ и ультрафиолетовое излучение показывает одно из максимальных значений среди всех дней исследования $1,94 \cdot 10^{10}$ фотон·см⁻²·с⁻¹, наряду с повышением во время вспышки X5.8 в тот же день примерно в 01:30 UTC.

Влияние вспышки X2.2 и радиовсплеска 09.05.2024 на отношение сигнал/шум

Для более подробного рассмотрения влияния солнечных вспышек на отношение сигнал/шум было выбрано событие: вспышка X2.2 от 09.05.2024 (см. рис. 8). Анализировались отдельные ряды для пар спутник – приёмник, когда угол видимости спутника из точки наблюдения (ГНСС-приёмника) превышал 70°, так как наиболее критичным для радионавигации является фактор нарушения качества сигналов от спутников с наибольшим углом возвышения (Барабанова, 2010). Исследовались все доступные сигнальные компоненты, включая компоненты группы S1.

Из рассмотренных изменений отношения сигнал/шум в интервале времени 08:20–11:00 UTC было выявлено, что помимо стандартного изменения: с возрастанием значений пропорционально углу видимости спутника, имеются периоды прерывания сигнала, а также резкого падения значений (рис. 13, см. с. 313).

Из рис. 13, А видно резкое снижение на 9 дБГц для сигнальной компоненты S2C во время действия вспышки X2.2. Данное событие совпадает с первыми повышениями радиоизлучения на частоте 1415 МГц до 2435 с. е. п. около 09:00 UTC. Также зафиксировано снижение на ~4 дБГц примерно в 09:40 UTC, когда радиоизлучение достигло значений 176 000 с. е. п.

На рис. 13, Б видно два интервала прерывания сигналов с длительностью 30–40 мин каждый, которые также согласуются с периодами повышения радиоизлучения.

Третьим зафиксированным видом изменений под воздействием солнечных вспышек является плавное снижение значений в то время, как угол видимости спутника возрастал (см. рис. 13, В).

Выявленные снижения отношения сигнал/шум были замечены для всех рассмотренных сигнальных компонент. Однако для компонент группы S1 подобные снижения происходили реже относительно «стандартных» форм изменения отношения сигнал/шум.

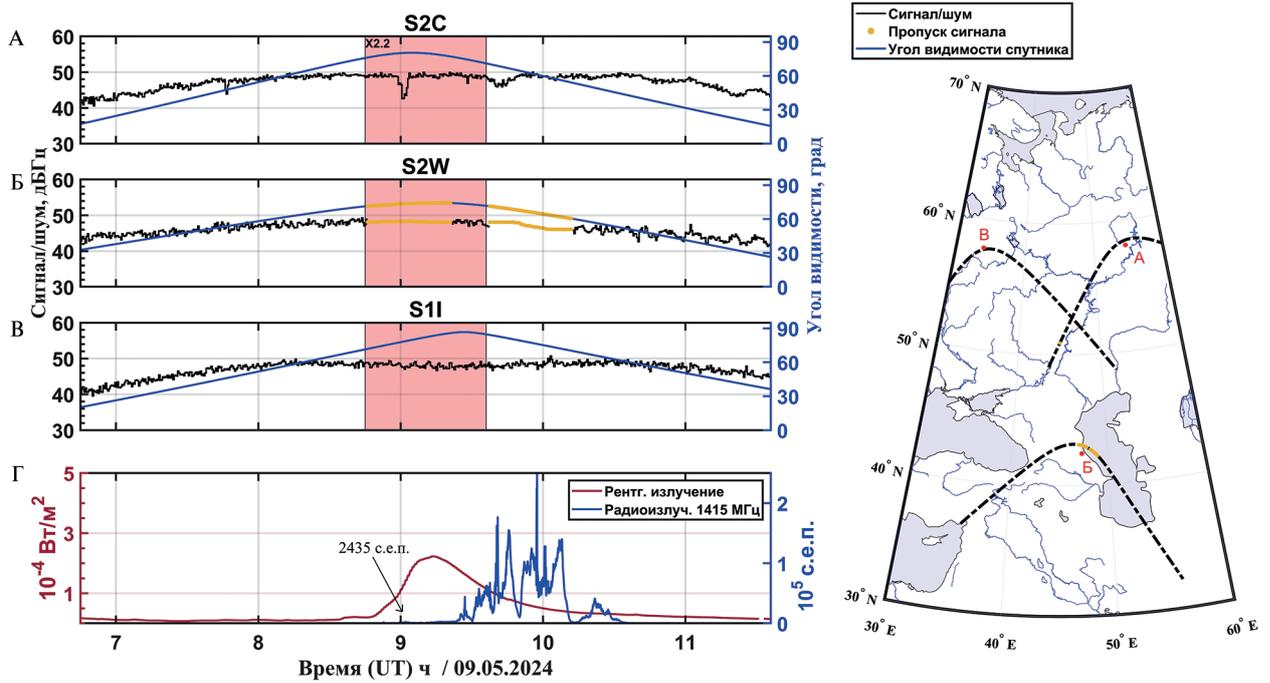


Рис. 13. Динамика изменения отношения сигнал/шум компонент S2C, S2W, S1I 09.05.2024: А–В — отношение сигнал/шум компонент S2C, S2W, S1I (чёрная кривая), изменение угла видимости спутника (синяя), красный прямоугольник — длительность вспышки X2.2; Г — суточное изменение рентгеновского излучения (красная кривая) и радиоизлучения на частоте 1415 МГц (синяя). Правая панель: траектории подионосферных точек для пар спутник – приёмник А, Б, В соответствуют одноименным панелям слева

Во время действия вспышки X2.2 09.05.2024 было более 1600 записей отношения сигнал/шум для всех компонент сигналов и пар спутник – приёмник с углом видимости спутника свыше 70° , из них с резким падением зафиксировано ~ 950 (см. рис. 13, А), ~ 150 -секундным прерыванием сигналов (см. рис. 13, Б) и ~ 310 -секундным плавным снижением значений во время возрастания угла видимости спутника (см. рис. 13, В).

Заключение

В настоящей работе рассматривалось воздействие на ионосферу солнечных вспышек в 25-м цикле солнечной активности в широтно-долготном секторе ($40\text{--}65^\circ$ с. ш.; $25\text{--}65^\circ$ в. д.), как отображено на рис. 1б. Для исследования отклика ионосферы использовался метод картирования значений ROTI и отношения сигнал/шум для различных сигнальных компонент и анализ их медианных значений в выбранном широтно-долготном секторе. Полученные ряды суточной динамики ROTI и отношения сигнал/шум сопоставлялись с интенсивностью рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца, потоком мощности радиоизлучения на частоте 1415 МГц и индексами космической погоды Dst и Kp.

Зафиксированные повышения ROTI как отклик на солнечные вспышки отличались в зависимости от плотности мощности вспышки в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах, а также от места возникновения вспышки на солнечном диске. В основном были повышения до $0,08$ TECU/мин. Однако были обнаружены и более яркие эффекты влияния солнечной вспышки, достигающие $0,2$ TECU/мин (10.05.2024, см. рис. 11). Длительность реакций на солнечные вспышки не превышала получаса. В основном повышенные значения были зафиксированы, когда вспышка происходила ближе к центральному меридиану Солнца (см. рис. 4а, г).

Однако отметим, что максимальное повышение ROTI до 0,24 TECU/мин зарегистрировано во время вспышки M1.7 11.05.2024, когда пятно было расположено ближе к восточному краю солнечного диска, при этом ультрафиолетовое излучение достигало максимальных значений среди всех дней исследования $1,94 \cdot 10^{10}$ фотон \cdot см $^{-2}$ \cdot с $^{-1}$. Также отклик сопровождался геомагнитной бурей с индексами Kp = 9 и Dst = -264 нТ. В пик геомагнитной бури 10.05.2024 примерно в 22:40 UTC (см. рис. 11) возмущения достигали 0,2 TECU/мин и далее в течение длительности бури сопровождались заметными вариациями ROTI (см. рис. 12). Интересной особенностью является отсутствие наложения эффекта солнечных вспышек X-класса на геомагнитную бурю (см. рис. 12).

Помимо исследования отклика ионосферы детально рассмотрено влияние произошедших солнечных вспышек на стабильность отношения сигнал/шум. Оценивалось изменение данных показателей во время солнечных вспышек, радиовспышек и геомагнитных бурь.

При исследовании медианных значений по региону удалось обнаружить снижение отношения сигнал/шум для всех объединённых групп сигналов (см. разд. «Методология исследования»), за исключением S1, включающих в себя сигнальные компоненты: S1, S1C, S1X, S1P, S1I. Снижения были зафиксированы на отдельные солнечные вспышки, в основном сопровождающиеся радиовсплесками на частотах, близких к работе ГНСС, в частности 1415 МГц, что согласуется с результатами работ (de Paula et al., 2022; Demyanov et al., 2012; Sato et al., 2019). Снижение отношения сигнал/шум для выбранных групп ГНСС-сигналов: S1, S2, S5, S6, S7, S8 — при этом составляло 3–5 дБГц (см. рис. 6б, 8б). Влияния геомагнитных бурь на отношение сигнал/шум выявлено не было. Стоит отметить, отсутствие реакции на геомагнитные бури может быть связано с недостаточной чувствительностью выбранного авторами способа диагностики на основе расчёта медианных значений по всему региону исследования. Вероятно, повысить чувствительность можно, например, при более строгом частотном распределении сигнальных компонент в группы, а также введя селекцию по углу возвышения и типу используемой модуляции сигнала ГНСС, картируя отношения сигнал/шум в диапазонах 30–50, 50–70, 70–90°. В работах (Carrano et al., 2009, de Paula et al., 2022) сообщается, что угол падения солнечных лучей влияет на отношение сигнал/шум и интенсивность радиоизлучения является максимальной при нормальном падении, в то же время и у антенн ГНСС коэффициент усиления максимальный в направлении зенита. Описанные выше исследования, однако, выходят за рамки данной работы, но, по всей видимости, найдут место в будущих исследованиях авторов.

Выявленные снижения медианных значений сигнал/шум 09.05.2024 (см. рис. 8б) были проанализированы подробнее. При рассмотрении отдельных сигнальных компонент каждой пары спутник–приёмник (см. рис. 13) подтвердилось, что во время действия вспышки X2.2 зафиксированные события соответствуют радиовсплескам Солнца на частоте 1415 МГц свыше 2000 с. е. п. Были выявлены резкие снижения соотношения сигнал/шум (более половины от количества всех рассмотренных), а также прерывание приёма сигнала во время двух радиовсплесков на 30–40 мин.

Кроме того, стоит отметить, что возрастание радиовсплеска на 2435 с. е. п. оказало большее влияние на снижение отношения сигнал/шум, чем радиовсплески до 250 000 с. е. п.

При этом зафиксировано неравномерное снижение значений по области исследования (см. рис. 10, Б) во время действия радиовсплесков. Скорее всего, это является следствием рассмотрения лучей спутник–приёмник с диапазоном углов видимости 30–90°, а также различием в настройках каждого приёмника отдельно. Однако таким образом удалось пронаблюдать общую тенденцию снижения мощностных показателей во время радиовспышек в диапазоне частот работы ГНСС.

Для 08.05.2024 были зафиксированы радиовсплески с возрастанием до 2405 с. е. п. (см. рис. 6), которые вызвали снижение отношения сигнал/шум на 3–4 дБГц для всех групп сигналов, кроме S1. При повышении до 1000 с. е. п. обнаруженное снижение отношения сигнал/шум было незначительным и относилось к вспомогательным группам сигналов S6–S8.

Применённый метод анализа медианных мощностных характеристик сигналов по области исследования отражает групповое влияние на сеть ГНСС-приёмников без учёта настроек

отдельных станций. Что может нести в себе информацию о региональном влиянии исследуемых в работе событий в выбранном широтно-долготном секторе.

Авторы благодарны Центру анализа космической погоды НИИЯФ МГУ, Лаборатории солнечной астрономии ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН, Лаборатории физики атмосферы и космоса (*англ.* Laboratory for Atmospheric and Space Physics — LASP, Colorado State University, Boulder, USA), Мировому центру данных по геомагнетизму (Япония, Киото) и NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration), Обсерватории Ondřejov (Академия наук Чешской Республики) за данные, использованные в работе.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-10029, <https://rscf.ru/project/23-77-10029/>.

Литература

1. *Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. *Барабанова Л. П.* К минимизации геометрических факторов GNSS // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 2. С. 145–152.
3. *Когогин Д. А., Насыров И. А., Шиндин А. В., Грач С. М., Максимов Д. С., Загретдинов Р. В., Дементьев В. О.* 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.
4. *Леонович Л. А.* Отклик ионосферы на солнечные вспышки и магнитные бури по данным глобальной сети GPS: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 2003. 135 с.
5. *Максимов Д. С., Когогин Д. А., Насыров И. А., Загретдинов Р. В.* Влияние солнечных вспышек 5–12 сентября 2017 г. на региональную возмущённость ионосферы Земли по данным ГНС-станций, расположенных в Приволжском федеральном округе Российской Федерации // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. № 2. С. 52–59. DOI: 10.12737/szf-92202306.
6. *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-м цикле солнечной активности // Ученые записки физ. фак. Московского ун-та. 2018. № 4. С. 1840403-1–1840403-6.
7. *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. DOI: 10.12737/szf-93202301.
8. *Afraimovich E. L., Altyntsev A. T., Grechnev V. V., Leonovich L. A.* Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data // Advances in Space Research. 2001. V. 27. Iss. 6–7. P. 1333–1338. DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00172-7.
9. *Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Ishin A. B., Smolkov G. Ya.* Powerful solar radio bursts as a global and free tool for testing satellite broadband radio systems, including GPS–GLONASS–GALILEO // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. No. 15. P. 1985–1994. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.09.008.
10. *Carrano C. S., Bridgwood C. T., Groves K. M.* Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS // Radio Science. 2009. V. 44. No. 1. Article RS0A25. 12 p. DOI: 10.1029/2008RS004071.
11. *de Paula E. R., Martinon A. R. F., Carrano C. et al.* Solar flare and radio burst effects on GNSS signals and the ionosphere during September 2017 // Radio Science. 2022. V. 57. No. 10. Article e2021RS007418. 15 p. DOI: 10.1029/2021RS007418.
12. *Demyanov V. V., Afraimovich E. L., Jin S.* An evaluation of potential solar radio emission power threat on GPS and GLONASS performance // GPS Solutions. 2012. V. 16. No. 4. P. 411–424. DOI: 10.1007/s10291-011-0241-9.
13. *Gurtner W., Estey L.* RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. IGS/RTCM RINEX Working Group, 2007. 57 p.
14. *Gurtner W., Estey L.* RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02. IGS/RTCM RINEX Working Group, 2013. 83 p.
15. *Lozitsky V. G., Efimenko V. M.* Clarified forecast for the 25th cycle of solar activity // 17th Intern. Conf. “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”. 2023. Article Mon23–241. 5 p. DOI: 10.3997/2214-4609.2023520241.
16. *Pi X., Manucci A. J., Lindqwiser U. J., Ho C. M.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // Geophysical Research Letters. 1997. V. 24. No. 18. P. 2283–2286. DOI: 10.1029/97GL02273.

17. Sato H., Jakowski N., Berdermann J. et al. Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies // *Space Weather*. 2019. V. 17. P. 816–826. DOI: 10.1029/2019SW002198.
18. Qian L., Wang W., Burns A. G. et al. Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 September 2017 // *J. Geophysical Research: Space Physics*. 2019. V. 124. Iss. 3. P. 2298–2311. DOI: 10.1029/2018JA026175.
19. Yasyukevich Yu. V., Yasyukevich A. S., Astafyeva E. I. How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts // *GPS Solutions*. 2021. V. 25. No. 2. Article 46. DOI: 10.1007/s10291-021-01091-5.

Solar flares in the 25th cycle of activity: Effect on ionospheric disturbance and GNSS signal strength

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

Kazan Federal University, Kazan 420008, Russia
E-mail: denis-maksimov16@yandex.ru

The paper presents the results of a study of the effect of solar flares and geomagnetic storms that occurred in the first half of the 25th solar activity cycle on ionospheric disturbance. Special attention is paid to the study of the signal-to-noise ratio for various signal components on Global Navigation Satellite System (GNSS) receivers. Ionospheric responses were recorded in the form of an increase in the median values of the Rate of Total Electron Content Index (ROTI) for the study region during the action of X- and M-class solar flares to 0.2 TECU/min with a duration of up to 30 min. The ionosphere's response to a powerful geomagnetic storm on May 10–11, 2024, was also recorded, with an increase in the median ROTI to 0.24 TECU/min. The ionospheric disturbances lasted throughout the action of the magnetic storm. The study of changes in the median values of the signal-to-noise ratio across the study region revealed decreases during individual solar flares with both sharp and smooth gradients. The flares that caused a decrease in the signal-to-noise ratio were accompanied by radio emission at the operating frequencies of GNSS. The reduction values reached 3–5 dBHz for most groups of GNSS signal components, with the exception of the component in the L1 frequency sub-band. When examining individual vectors for the satellite–receiver pairs, signals with data transmission delays of up to 40 min were detected. There were also sharp decreases in the signal-to-noise ratio by 7 dBHz or more.

Keywords: GNSS, ionosphere, total electron content, TEC, ROTI, solar flare, solar activity, magnetic storms, signal-to-noise ratio, solar radio flux, 1415 MHz, EUV

Accepted: 19.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-301-317

References

1. Afraimovich E. L., Perevalova N. P., *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli* (GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere), Irkutsk: GU NTS RVKH VSNTS SO RAMN, 2006, 480 p. (in Russian).
2. Barabanova L. P., Minimization of GNSS geometric factors, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2010, V. 49, No. 2, pp. 310–317, DOI: 10.1134/S1064230710020164.
3. Kogogin D. A., Nasyrov I. A., Shindin A. V. et al., Dynamic changes of the ionospheric artificial airglow region caused by high-power radio waves based on a joint analysis of night-sky snapshots in the 630 nm line and total electron content variation maps, *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2020, V. 63, Iss. 2, pp. 83–96, DOI: 10.1007/s11141-020-10037-9.
4. Leonovich L. A., *Otklik ionosfery na solnechnye vspyshki i magnitnye buri po dannym global'noi seti GPS: Avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk* (Ionospheric response to solar flares and magnetic storms according to the global GPS network, Cand. ph.-math. sci. thesis), Irkutsk, 2003, 15 p. (in Russian).

5. Maksimov D. S., Kogogin D. A., Nasyrov I. A., Zagretdinov 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, *Solnechno-zemnaya fizika*, 2023, V. 9, No. 2, pp. 52–59 (in Russian), DOI: 10.12737/szf-92202306.
6. Syrovatskiy S. V., Yasyukevich Yu. V., Vesnin A. M., Edemskiy I. K., Voeykov S. V., Zhivetiev I. V., The effect of solar flares on the ionosphere of the Earth during 24th cycle of solar activity, *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo Universiteta*, 2018, No. 4, pp. 1840403-1–1840403-6 (in Russian).
7. Yazev S. A., Isaeva E. S., Hos-Erdene B., Solar activity cycle 25: The first three years, *Solnechno-zemnaya fizika*, 2023, V. 9, No. 3, pp. 5–11 (in Russian), DOI: 10.12737/szf-93202301.
8. Afraimovich E. L., Altyntsev A. T., Grechnev V. V., Leonovich L. A., Ionospheric effects of the solar flares as deduced from global GPS network data, *Advances in Space Research*, 2001, V. 27, Iss. 6–7, pp. 1333–1338, DOI: 10.1016/S0273-1177(01)00172-7.
9. Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Ishin A. B., Smolkov G. Ya., Powerful solar radio bursts as a global and free tool for testing satellite broadband radio systems, including GPS–GLONASS–GALILEO, *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, V. 70, No. 15, pp. 1985–1994, DOI: 10.1016/j.jastp.2008.09.008.
10. Carrano C. S., Bridgwood C. T., Groves K. M., Impacts of the December 2006 solar radio bursts on the performance of GPS, *Radio Science*, 2009, V. 44, No. 1, Article RS0A25, 12 p., DOI: 10.1029/2008RS004071.
11. de Paula E. R., Martinon A. R. F., Carrano C. et al., Solar flare and radio burst effects on GNSS signals and the ionosphere during September 2017, *Radio Science*, 2022, V. 57, No. 10, Article e2021RS007418, 15 p., DOI: 10.1029/2021RS007418.
12. Demyanov V. V., Afraimovich E. L., Jin S., An evaluation of potential solar radio emission power threat on GPS and GLONASS performance, *GPS Solutions*, 2012, V. 16, No. 4, pp. 411–424, DOI: 10.1007/s10291-011-0241-9.
13. Gurtner W., Estey L., *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11*, IGS/RTCM RINEX Working Group, 2007, 57 p.
14. Gurtner W., Estey L., *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 3.02*, IGS/RTCM RINEX Working Group, 2013, 83 p.
15. Lozitsky V. G., Efimenko V. M., Clarified forecast for the 25th cycle of solar activity, *17th Intern. Conf. "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 2023, Article Mon23-241, 5 p., DOI: 10.3997/2214-4609.2023520241.
16. Pi X., Manucci A. J., Lindqwiser U. J., Ho C. M., Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network, *Geophysical Research Letters*, 1997, V. 24, No. 18, pp. 2283–2286, DOI: 10.1029/97GL02273.
17. Sato H., Jakowski N., Berdermann J. et al., Solar radio burst events on 6 September 2017 and its impact on GNSS signal frequencies, *Space Weather*, 2019, V. 17, pp. 816–826, DOI: 10.1029/2019SW002198.
18. Qian L., Wang W., Burns A. G. et al., Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6–11 September 2017, *J. Geophysical Research: Space Physics*, 2019, V. 124, Iss. 3, pp. 2298–2311, DOI: 10.1029/2018JA026175.
19. Yasyukevich Yu. V., Yasyukevich A. S., Astafyeva E. I., How modernized and strengthened GPS signals enhance the system performance during solar radio bursts, *GPS Solutions*, 2021, V. 25, No. 2, Article 46, DOI: 10.1007/s10291-021-01091-5.