




**ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК 5–12 СЕНТЯБРЯ 2017 г.
НА РЕГИОНАЛЬНУЮ ВОЗМУЩЕННОСТЬ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ
ПО ДАННЫМ ГНСС-СТАНЦИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ
В ПРИВОЛЖСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ ОКРУГЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**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**

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

Д.А. Когогин 
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

И.А. Насыров 
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия, igor.nasyrov@kpfu.ru

Р.В. Загредтинов 
Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Казань, Россия, Renat.Zagretdinov@kpfu.ru

D.S. Maksimov
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia, denis-maksimov16@yandex.ru

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

I.A. Nasyrov
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Russia, igor.nasyrov@kpfu.ru

R.V. Zagretdinov
Kazan (Volga Region) Federal University,
Kazan, Renat.Zagretdinov@kpfu.ru

Аннотация. В работе представлены результаты оценки влияния солнечных вспышек 5–12 сентября 2017 г. на региональную возмущенность ионосферы Земли по данным распределенной сети ГНСС-станций, большая часть которых расположена в Приволжском федеральном округе Российской Федерации (ПФО РФ). С помощью разработанного нами программного комплекса обработки ГНСС-данных анализировались регистрируемые мощности сигнала, суточные двухчастотные фазовые измерения, проводился расчет полного электронного содержания и картирование этих данных. Результаты проведенного исследования показали, что медианное значение вариаций полного электронного содержания, рассчитанное по региону ПФО РФ, увеличилось до 0.25 и 0.6 TECU во время мощных солнечных вспышек X2.2 и X9.3 6 сентября соответственно, когда рассматриваемый регион, расположенный в пределах 40° – 55° E, был освещен Солнцем. Продолжительные магнитные бури 8 сентября привели также к ощутимым возмущениям в ионосфере, достигавшим 0.2 TECU. В то же время, ни солнечные вспышки, ни следовавшие за ними магнитные бури не оказали заметного влияния на мощностные характеристики регистрируемых сигналов навигационных спутников в ПФО РФ. Медианное отношение значения несущей навигационного сигнала к шуму, рассчитанное для рассматриваемой области, за все время наблюдения варьировалось в пределах 47–53 дБГц и 38–49 дБГц для частот $L1$ и $L2$ соответственно без каких-либо резких градиентов, что характерно для невозмущенной ионосферы.

Abstract. The paper presents the results of estimation of the effects of September 5–12, 2017 solar flares on the regional disturbance of Earth's ionosphere according to data from a distributed network of GNSS stations located mostly in the Volga Federal District of the Russian Federation. The GNSS data processing software package we have developed is used to analyze recorded signal power and daily two-frequency phase measurements, as well as to calculate the total electron content and map the data. The results of the study show that during powerful solar flares X2.2 and X9.3 on September 6 the median value of the total electron content, calculated for the Volga Federal District, increased up to 0.25 TECU and 0.6 TECU respectively. At that time, the region of interest (40° – 55° E) was sunlit. The prolonged magnetic storms on September 8 also generated noticeable ionospheric disturbances up to 0.2 TECU. At the same time, neither the solar flares nor the magnetic storms had a significant effect on the power characteristics of the recorded signals from navigation satellites in the region under study. The median carrier-to-noise ratio calculated for the region considered over the entire observation period did not differ from the values recorded under undisturbed ionospheric conditions and varied between 47–53 dBHz and 38–49 dBHz for frequencies $L1$ and $L2$ respectively.

Keywords: ionosphere, GNSS, total electron content, solar flare, magnetic storms, GPS, GLONASS, TEC maps.

Ключевые слова: ионосфера, ГНСС, полное электронное содержание, солнечная вспышка, магнитные бури, GPS, ГЛОНАСС, карты ПЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Исследование волновых возмущений в верхней атмосфере Земли является актуальным в силу того, что спутниковые и наземные телерадиокоммуникационные системы, использующие трансionoсферные каналы связи, подвергаются воздействию со стороны ионосферы, находящейся на высотах ~50–1500 км над поверхностью Земли. Изменения концентрации свободных электронов в ионосфере оказывают влияние на качество принимаемого сигнала, приводя к увеличению временной задержки сигнала, уширению доплеровского спектра, а также к увеличению ошибок позиционирования.

Одним из методов изучения ионосферной плазмы является определение вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и построение карт перемещений вариаций ПЭС над поверхностью Земли. Для этого в основном используются двухчастотные фазовые измерения с навигационных спутников Земли (GPS (США), ГЛОНАСС (Россия), Galileo (Европа), Beidou (Китай)), принимаемые наземными ГНСС-станциями.

Исследованию ионосферной погоды при помощи анализа данных ПЭС за последние три десятилетия посвящено достаточно большое количество работ. Например, в работах [Денисенко, Сказик, 2007; Первалова, 2014; Ларюнин и др., 2014] отмечаются следующие аспекты исследования ионосферы при помощи наземных ГНСС-приемников: чувствительность, временное и пространственное разрешение. Было выделено, что интегральный характер ПЭС позволяет изучать преимущественно горизонтальные пространственные характеристики ионосферных неоднородностей. В рассматриваемых работах описываются также различные принципы расчета ПЭС по данным ГНСС-приемников с использованием одной или двух несущих частот сигналов. Двухчастотные измерения также разделяются на два вида: с использованием или набега фазы волны, или времени распространения сигнала. Отмечается, что наибольшую точность обеспечивают фазовые измерения на двух частотах [Афраймович, Первалова, 2006].

На состояние ионосферы влияет множество различных факторов. Одним из них является воздействие Солнца в виде рентгеновского и ультрафиолетового излучений, а также потоков частиц (электронов, протонов и тяжелых ядер). Классификация и детектирование солнечных вспышек осуществляется с помощью системы геостационарных спутников GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) по потоку излучения в рентгеновском диапазоне [Svetska, 1981; GOES I-M Databook, 1996; Сыроватский и др., 2018]. Уровни солнечных вспышек классифицируются по пиковому потоку, измеряемому в $[\text{Вт}/\text{м}^2]$, где самый мощный уровень вспышки обозначается буквой X и его значение превышает $10^{-4} \text{ Вт}/\text{м}^2$

[<https://www.spaceweatherlive.com/ru/pomoshch/chto-predstavlyayut-soboy-solnechnye-vspyshki.html>]. Вспышки X-класса происходят не более десяти раз за год и вызывают на Земле критический уровень радиопомех. Проблемы с радиосвязью возникают из-за сложного взаимодействия солнечного рентгеновского и ультрафиолетового излучений с земной магнитосферой и ионосферой. В результате данного взаимодействия образуются плазменные неустойчивости, что, в свою очередь, приводит к изменению ионизации, а также к частотной, пространственной и временной дисперсии радиосигналов. Все вышеперечисленное оказывает влияние на широкий диапазон частот электромагнитных волн (УКВ, КВ, СВ, ДВ), используемых в радиосвязи, локации и навигации. При этом увеличение ионизации влечет за собой и рост ПЭС [Ясюкевич и др., 2013; Сыроватский и др., 2018; Qian et al., 2019].

Ранее подобные исследования в рассматриваемом регионе не проводились из-за малой плотности ГНСС-приемников на территории ПФО РФ. В то же время исследование воздействия солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы методами ГНСС-радиозондирования с использованием данных глобальной сети ГНСС-станций проводится регулярно. Например, в работе [Сыроватский и др., 2018] рассматривалось глобальное влияние солнечных вспышек на сигналы ГНСС и оценка надежности их детектирования в данных ПЭС. Исследования проводились также по данным ГНСС в автоматическом режиме с учетом изменений значений ПЭС. В общей сложности было задействовано около 4200 приемных станций. В данной работе рассматривались 224 солнечных вспышки с 2014 по 2017 г. В частности, было показано, что в период вспышек M- и X-классов на солнечной стороне Земли регистрировалось увеличение ПЭС на 97 % от фонового уровня. Амплитуда ПЭС во время откликов варьировалась в зависимости от класса солнечной вспышки и динамики солнечного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Было отмечено, что задача автоматической классификации солнечных вспышек по данным ПЭС сильно усложняется из-за изменчивости ионосферного отклика.

В работе [Yasyukevich et al., 2018] представлен обзор влияния на ионосферу вспышек 6 сентября 2017 г. по данным анализа изменения усредненного глобального ПЭС. Было зафиксировано возрастание усредненной амплитуды вариаций ПЭС на освещенной Солнцем области Земли до 0.2 TECU после вспышки X2.2, а также увеличение до 1.3 TECU после вспышки X9.3. Вместе с тем во время вспышки X2.2 в течение 30 мин было отмечено увеличение ошибки позиционирования в три раза по сравнению с фоновым уровнем. Изменений качества сигнала с ГНСС-спутников по сравнению со значениями в спокойных условиях космической погоды выявлено не было.

Таблица 1

Солнечные вспышки, произошедшие в сентябре 2017 г.

Дата	Класс вспышки	Начало (UTC)	Максимум (UTC)	Окончание (UTC)
6 сентября	X2.2	08:57:00	09:10:00	09:17:00
6 сентября	X9.3	11:53:00	12:02:00	12:10:00
7 сентября	X1.3	14:20:00	14:36:00	14:55:00
10 сентября	X8.2	15:35:00	16:06:00	15:31:00
6 сентября	M2.5	15:51:00	15:56:00	16:03:00
6 сентября	M1.4	19:21:00	19:30:00	19:35:00
7 сентября	M2.4	04:59:00	05:02:00	05:08:00
7 сентября	M7.3	10:11:00	10:15:00	10:18:00
7 сентября	M3.9	23:50:00	23:59:00	00:14:00
8 сентября	M2.9	18:09:00	18:47:00	19:04:00
8 сентября	M8.1	07:40:00	07:49:00	07:58:00
9 сентября	M3.7	10:50:00	11:04:00	11:42:00

В работе [Qian et al., 2019] исследовался также глобальный отклик вариаций ПЭС на солнечные вспышки X9.3 6 сентября и X8.2 10 сентября 2017 г. Авторам удалось определить, что наибольшие эффекты вспышек наблюдаются в экваториальных широтах. В данных пространственных областях во время регистрации вспышки X9.3 амплитуды вариаций ПЭС достигали ~ 2.5 TECU, а для широт, исследуемых в нашей работе, аналогичные значения составляли ~ 1 TECU. Во время регистрации вспышки X8.3 наибольшие амплитуды вариаций ПЭС составляли до ~ 2 TECU, но стоит уточнить, что регионы, где зарегистрированы возмущения, были в это время освещены Солнцем.

В работах [Afraimovich et al., 2001; Леонович, 2003] также показана зависимость отклика ионосферы от положения вспышки на Солнце. В частности, продемонстрировано, что с увеличением расстояния между солнечной вспышкой и центральным солнечным меридианом уменьшается интенсивность импульсной фазы мягкого ультрафиолетового излучения и также уменьшается амплитуда отклика ПЭС.

В связи с вышесказанным и отсутствием подобных исследований в ПФО РФ было решено провести собственный анализ. Задачей настоящей работы является исследование изменения вариаций ПЭС и мощности навигационных сигналов над ПФО РФ в дни повышенной солнечной активности в сентябре 2017 г. Это позволит закрыть существующий пробел в измерениях для данного широтно-долготного сектора и внести вклад в повышение точности мониторинга ионосферы как в региональном, так и в глобальном масштабах. В разделе 1 приводятся исходные данные эксперимента: возникшие на Солнце за исследуемый период времени вспышки, геомагнитные бури, происходившие в атмосфере Земли и формат обрабатываемых в эксперименте данных. В разделе 2 описывается разработанный программный комплекс с кратким описанием этапов обработки ГНСС-данных, полученных от распределенной сети базовых станций. Раздел 3 содержит анализ и обсуждение полученных результатов. В заключении сделаны общие выводы.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исходный набор экспериментальных данных содержит 30-секундные ГНСС-данные, представленные в формате RINEX 2.10 и 2.11 [Gurtner, 2007], полученные с приемных базовых ГНСС-станций (от 70 до 120 в зависимости от дня) за 5–12 сентября 2017 г.

Видно (рис. 1, а), что используемые ГНСС-станции в большинстве своем сконцентрированы в регионе 40° – 60° E, 50° – 60° N.

По данным [<https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl.html>] за 24-й цикл солнечной активности было зафиксировано 49 вспышек X-класса, 748 — M-класса и 7802 — C-класса. Наиболее мощные и частые солнечные вспышки X-класса были зарегистрированы в сентябре 2017 г. С 5 по 10 сентября 2017 г. зафиксировано четыре вспышки X-класса и двадцать — M-класса. Длительность и время возникновения наиболее мощных вспышек (по данным [https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html?m=9&d=8&y=2017]) указаны в табл. 1.

За исследуемый период были зафиксированы магнитные бури 7 и 8 сентября 2017 г. Особенно стоит выделить две: первая началась около 22:00 UTC 7 сентября и длилась ~ 8 ч. Следующая началась на фоне предыдущей в $\sim 12:00$ UTC 8 сентября и длилась ~ 20 ч. Для примера в табл. 2 указаны наиболее высокие значения K_p - и G -индексов, соответствующие уровню магнитной бури [Fleming et al., 1939; <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>, https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html?m=9&d=8&y=2017], которые были зафиксированы в период с 5 по 12 сентября 2017 г. Далее для анализа влияния магнитных бурь используется также индекс Dst [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201709/index.html].

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Общая блок-схема алгоритма обработки ГНСС-данных показана на рис. 2. Данный программный ком-

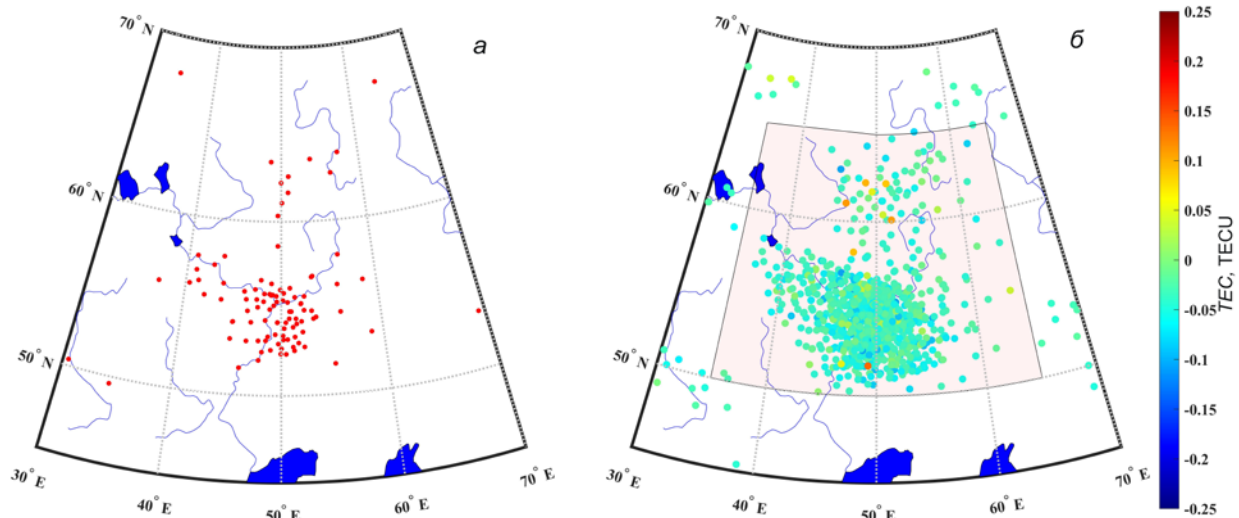


Рис. 1. Расположение ГНСС-станций (а); пример карты отображения пространственного расположения подионосферных точек, к которым привязываются амплитуды вариаций ПЭС (б). Выделенная область отражает регион, по которому вычислялось медианное значение вариаций ПЭС и мощности навигационных сигналов

Таблица 2

Наиболее высокие K_p - и G-индексы 5–12 сентября 2017 г.

Дата	K_p -индекс	Уровень магнитной бури	Время наблюдения (UTC)
7 сентября	8	G4	21:00–00:00*
8 сентября	8	G4	00:00–03:00
8 сентября	5	G1	03:00–06:00
8 сентября	5	G1	09:00–12:00
8 сентября	8	G4	12:00–15:00
8 сентября	7	G3	15:00–18:00
8 сентября	6	G2	18:00–21:00
8 сентября	5	G1	21:00–00:00*
12 сентября	5	G1	21:00–00:00*

где 00:00* — начало следующих суток.

плекс является улучшенным и адаптированным к решаемым в работе задачам вариантом, первично представленным в [Когогин и др., 2020]. Стоит отметить, что исследование производилось только по данным спутников GPS и ГЛОНАСС ввиду того, что лишь малое число базовых станций, показанных на рис. 1, а, в рассматриваемый период времени поддерживало запись ГНСС-сигналов Galileo и Beidou.

Первым этапом обработки является конвертация RINEX-файлов в mat-файлы при помощи программного обеспечения MATLAB [https://www.mathworks.com/products/matlab.html]. Конвертация производится для дальнейшего более быстрого и универсального пересчета данных ПЭС в зависимости от имеющихся входных параметров, которые определяются в зависимости от природы источников возмущений (окно скользящего среднего, время накопления данных и т. д.).

Следующий шаг заключается в расчете наклонного и вертикального ПЭС по фазовым измерениям на двух частотах [Hofmann-Wellenhof et al., 1994]:

$$I_s = -\frac{1}{K} \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \left[(L_i \lambda_i - L_j \lambda_j) + const + \sigma L \right], \quad (1)$$

где I_s — наклонное ПЭС; $K=40.308$; $L_i \lambda_i$, $L_j \lambda_j$ — приращения фазового пути радиосигнала, происходящие за счет задержки фазы в ионосфере; $L_i = \frac{\Delta \varphi}{2\pi}$ —

фазовые измерения ГНСС-приемника на частотах f_i ; $const$ — неоднозначность фазовых измерений; σL — ошибка измерений фазы. В качестве единицы измерений ПЭС используется величина TECU (Total Electron Content Unit): $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл} \cdot \text{м}^{-2}$.

Кроме того, на этом шаге происходит удаление тренда с помощью вычитания из вектора измерений полинома шестой степени, чтобы учесть влияние перемещения навигационных спутников по орбите. Стоит отметить, что из полученных рядов ПЭС исключались данные, полученные при низких углах места (менее 30°) для получения более достоверных результатов при переходе от наклонного ПЭС к вертикальному:

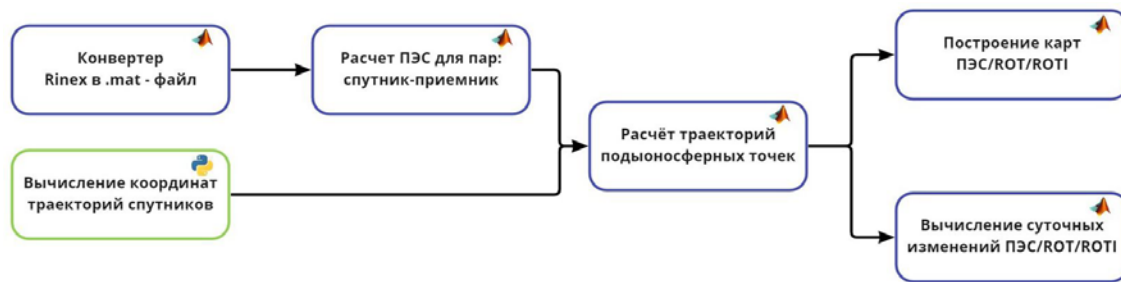


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программного комплекса обработки ГНСС-данных и вычисления ПЭС

$$I_v = I_s \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_z}{R_E + h_{\max}} \cos \theta_s \right) \right], \quad (2)$$

где I_v — вертикальное ПЭС; R_E — радиус Земли [м]; h_{\max} — высота максимума электронной концентрации в слое F2 ионосферы; θ_s — угол места навигационного спутника

Параллельный вычислению ПЭС этап — расчет траекторий движения навигационных спутников. Для этого был разработан скрипт на языке программирования Python, отправляющий на интернет-ресурс Space-track [<https://www.space-track.org>] запрос с идентификатором спутников, диапазоном дат, именем зарегистрированного пользователя и паролем. Запрос реализован с использованием библиотеки Spacetrack [<https://pypi.org/project/spacetrack>]. В ответ на запрос формируется файл в формате tle — двухстрочный формат данных, представляющий собой набор элементов орбиты для спутника Земли. Далее с использованием библиотеки Skyfield [<https://pypi.org/project/skyfield>] производится расчет положений спутников в определенные временные промежутки для выбранных дат. Последний шаг на этом этапе — сохранение рассчитанных значений траекторий спутников в mat-файлы для последующей обработки в среде MATLAB.

Следующий шаг — определение траекторий подыоносферных точек по формулам [Афраймович, Первалова, 2006]:

$$\varphi_p = \arcsin \left(\sin \varphi_B \cos \psi_p + \cos \varphi_B \sin \psi_p \cos \alpha_s \right), \quad (3)$$

$$\lambda_p = \lambda_B + \arcsin \left(\sin \psi_p \sin \alpha_s \sec \varphi_p \right), \quad (4)$$

$$\varphi_p = \frac{\pi}{2} - \theta_s - \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \cos \theta_s \right), \quad (5)$$

где R_E — радиус Земли; (φ_p, λ_p) и (φ_B, λ_B) — географические координаты (широта и долгота) подыоносферной точки и ГНСС-приемника соответственно; θ_s и α_s — угол места и азимут луча на спутник. В соответствующие моменты времени амплитуда вариаций ПЭС привязывается к местоположению подыоносферной точки. Аналогично к местоположению подыоносферной точки были привязаны и значения мощности навигационного сигнала (отношение несущей к плотности шума C/N_0) в единицах дБГц [<https://insidengnss.com/measuring-gnss-signal-strength>],

полученные из RINEX файлов. Затем было проведено объединение данных, рассчитанных для одного момента записи приемниками со всех пар спутник — приемник. Шаг сохраненных файлов обработанных данных (соответственно и их карт (см. рис. 1, б)) составляет 30 с, так как измерение сигналов ГНСС-приемниками проводилось раз в 30 с.

В одном файле содержалось от 500 до 1000 точек с амплитудами вариаций ПЭС (на рис. 1, б отображен файл с ~800 измерениями), а также 100–150 точек со значениями мощности сигналов. Причина разницы в количестве значений вариаций ПЭС и значений мощности сигналов заключается в достаточно малом количестве приемников, способных записывать параметр мощности навигационного сигнала. Из доступных нам ГНСС-приемников менее половины записывали мощностные характеристики.

Завершающими этапами в обработке данных были сглаживание векторов за счет вычитания скользящего среднего с десятиминутным окном и расчет изменения медианного значения вариаций ПЭС и медианной мощности навигационных сигналов по региону, выделенному на рис. 1, б.

3. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 3–5 синими кривыми показаны медианные изменения вариаций ПЭС над ПФО РФ, рассчитанные по ГНСС-данным с приемников, расположенных в пространственной области $50^\circ\text{--}65^\circ\text{ N}$; $35^\circ\text{--}65^\circ\text{ E}$ (см. рис. 1, б), с геомагнитными широтой $42.37^\circ\text{--}60.60^\circ$ и долготой $117.48^\circ\text{--}148.11^\circ$ или $8.2^\circ\text{--}22.1^\circ\text{ D}$ (склонение); $67.2^\circ\text{--}79.1^\circ\text{ I}$ (наклонение). Расчет проводился на основе модели IGRF-13 [Alken et al., 2021]. Каждый из рис. 3–5 разбит на несколько горизонтальных панелей, представляющих дни экспериментов с 5 по 12 сентября 2017 г.

Для оценки влияния солнечных вспышек и геомагнитных бурь на качество радиосвязи была проведена регистрация изменения отношения несущей к шуму C/N_0 , соответствующая сигналам центральных частотных поддиапазонов $L1$ и $L2$ (обозначены на рис. 3–5 как $S1$ и $S2$), принимаемых ГНСС-станциями с навигационных спутников. На рис. 3–5 представлены медианные значения данных (черные сплошные и черные пунктирные кривые соответственно), полученные для пространственной области $50^\circ\text{--}65^\circ\text{ N}$; $35^\circ\text{--}65^\circ\text{ E}$. Красные, желтые и голубые

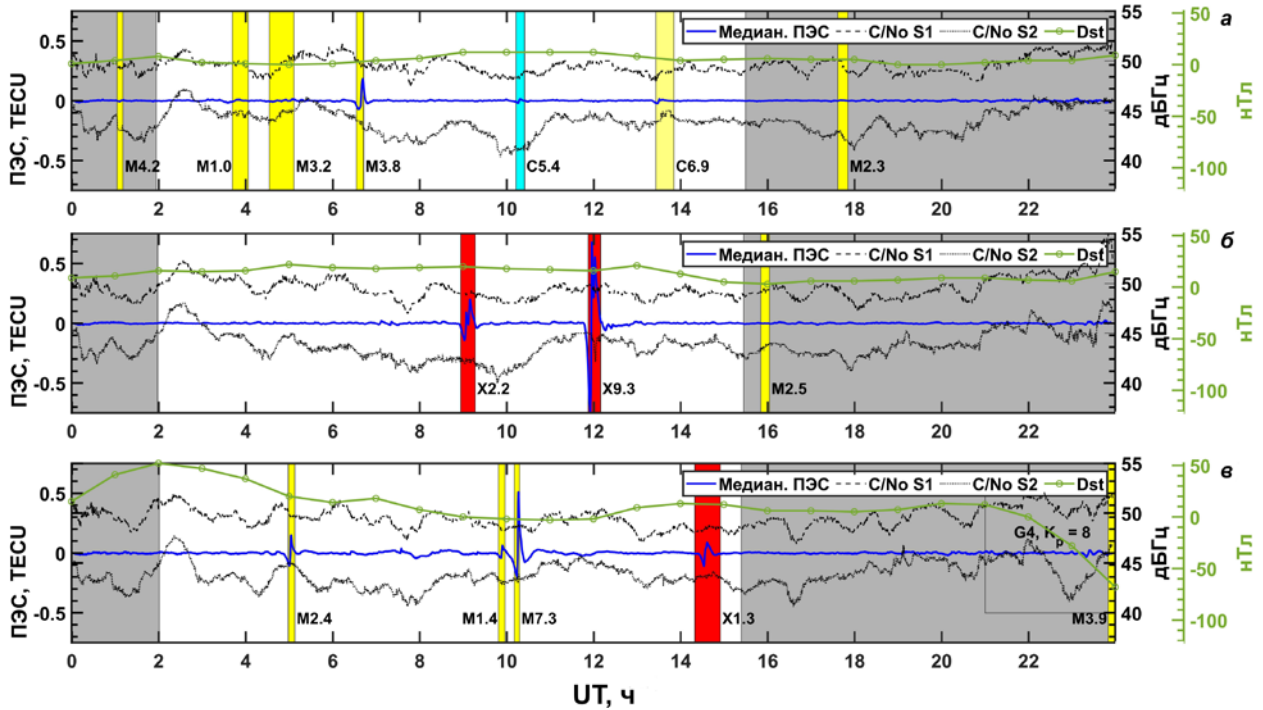


Рис. 3. Изменения во времени медианных значений вариаций ПЭС (синие кривые) и мощности сигнала для частоты L1 (черные сплошные кривые, обозначение S1) и для частоты L2 (черные пунктирные кривые, обозначение S2), зеленые кривые — изменения индекса Dst. Красные, желтые и голубые вертикальные полосы — временные интервалы произошедших вспышек X-, M- и C-классов соответственно с указанием оценки мощности вспышки. Прозрачный прямоугольник — значения G- и K_p-индексов. Интервал времени, выделенный белым фоном, соответствует световому дню для Казани (55.78° N, 49.12° E). Даты регистрации: 5–7 сентября (а–в)

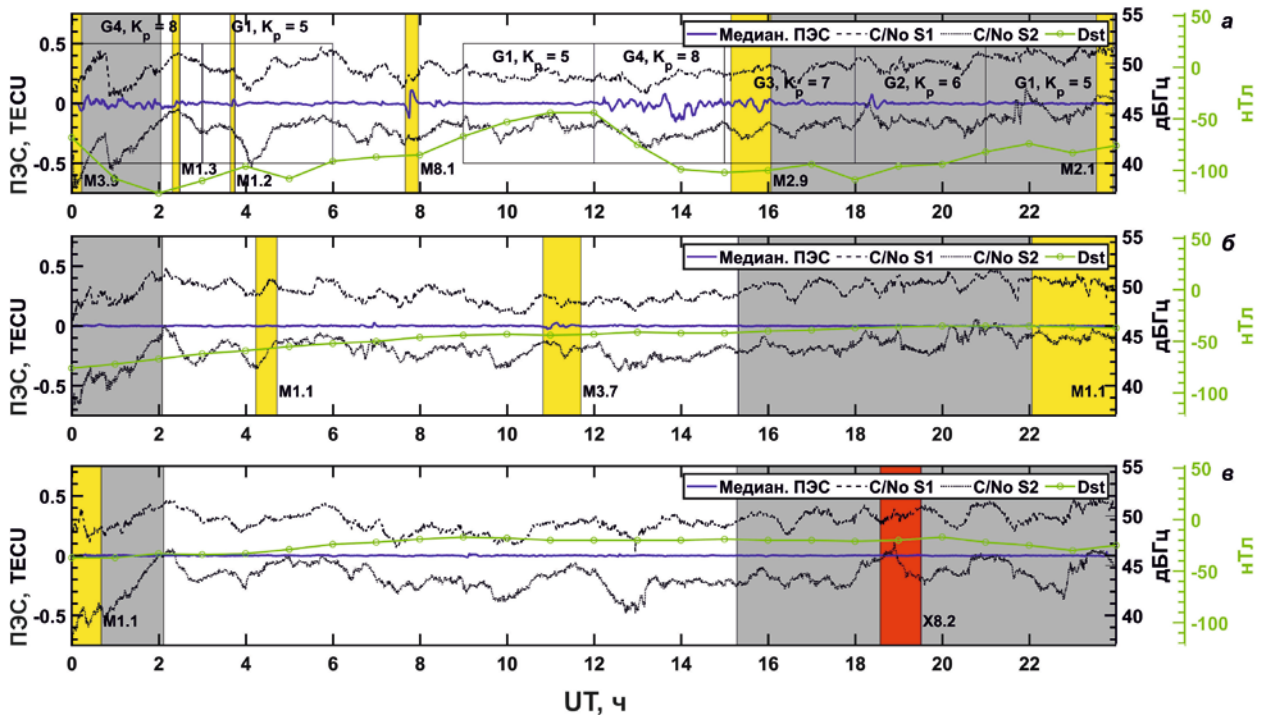


Рис. 4. То же, что на рис. 3 для 8–10 сентября 2017 г. (а–в)

прямоугольники — вспышки X-, M- и C-классов соответственно, прозрачные прямоугольники — зафиксированные магнитные бури с указанными G- и K_p-индексами, зеленые кривые — изменения индекса Dst. Белый фон соответствует времени, когда рассматри-

ваемый регион был освещен Солнцем, серый — времени, когда регион был в тени.

Результаты обработки экспериментальных данных показали, что наиболее активные возмущения ионосферы зафиксированы в периоды возникновения

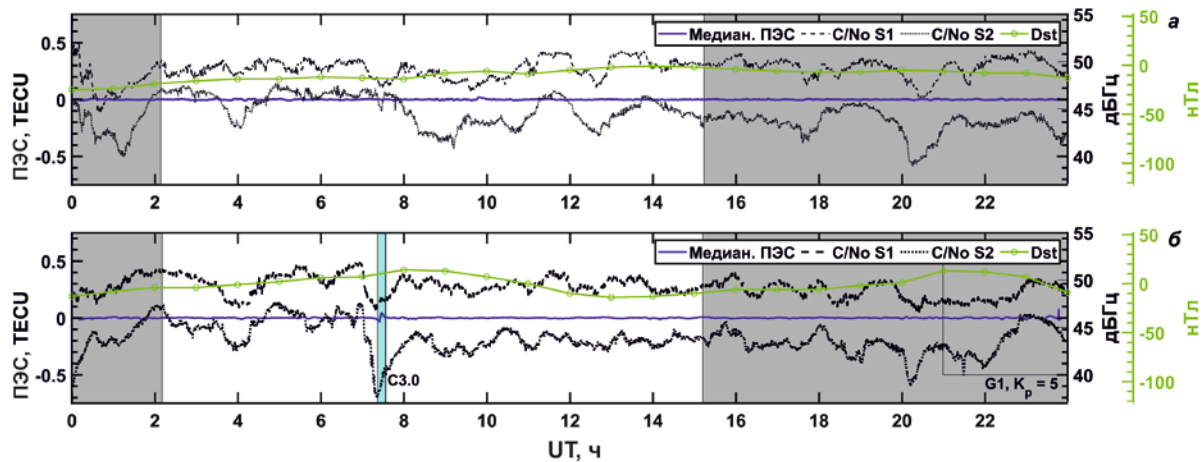


Рис. 5. То же, что на рис. 3 для 11, 12 сентября 2017 г. (а, б)

наиболее мощных солнечных вспышек (6 сентября, рис. 3, б). Амплитуда вариаций ПЭС достигала 0.25 TECU во время действия вспышки X2.2 (~9:00 UTC) и 0.6 TECU во время вспышки X9.3 (~12:00 UTC). Важно отметить, что исследуемая пространственная область 50° – 65° N, 35° – 65° E во время вспышек была освещена Солнцем. Вспышка M7.3 7 сентября (см. рис. 3, в) вызвала возмущенность до 0.5 TECU.

Таким образом, значимые относительно фоновых вариации ПЭС фиксируются в моменты регистрации солнечных вспышек, когда исследуемый регион освещен Солнцем. Необходимо отметить, что в вариациях ПЭС видны отклики не только на вспышки X- и M-классов, но в ряде случаев и на вспышки C-класса (см. рис. 5, б).

Наиболее длительные эффекты наблюдаются, когда $Dst < -50$ нТл, что классифицируется как магнитная буря [Ермолаев, Ермолаев, 2009]: 7–8 сентября в 23:00–02:00 UTC (см. рис. 3, в, и 4, а) и 8 сентября в 12:00–16:00 UTC (рис. 4, а). В этих случаях амплитуда медианных вариаций ПЭС достигала 0.2 TECU, но при этом характеризовалась большей продолжительностью возмущений (до 3–4 ч).

С 5 по 12 сентября в Казани восход и заход Солнца был в интервалах 03:01–03:12 и 15:19–15:50 UTC соответственно [<https://time365.info/voshod-i-zakat/kazan-rossiya>]. В то время, когда исследуемый регион был в тени, зарегистрированные вспышки, включая вспышки X-класса, не привели к существенному превышению амплитуды вариаций ПЭС над фоновым уровнем. Исключением можно считать послезакатные вариации ПЭС 7–8 сентября, когда были зафиксированы геомагнитные бури с $K_p=8$ и $Dst < -100$ нТл.

Большую роль во влиянии солнечной вспышки на ионосферу Земли играет место ее возникновения на Солнце. Зафиксированные вспышки были обнаружены в области 2673, которая 7 сентября и в последующие дни была на краю видимого солнечного диска. В случае расположения солнечных вспышек ближе к центральному меридиану их влияние на земную атмосферу оказалось бы выше [Afraimovich et al., 2001; Леонович, 2003].

Медианное отношение несущей к шуму C/N_0 навигационного сигнала для частоты $L1$ составляло

~50 дБГц, для частоты $L2$ — 45 дБГц как во время воздействия солнечных вспышек, так и в спокойных гелиогеофизических условиях. Отмечено понижение отношения несущей к шуму 12 сентября в ~06:55–07:20 UTC перед возникновением вспышки C3.0, достигающее 5 дБГц для $L1$ и 10 дБГц для $L2$ за 25 мин (см. рис. 5, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дана оценка влияния солнечных вспышек 5–12 сентября 2017 г. на возмущенность ионосферы, выполненная с использованием собственного программного обеспечения на основе рассчитанных вариаций ПЭС и изменения мощности навигационных сигналов. Для анализа использованы ГНСС-сигналы, полученные на распределенной сети базовых станций, расположенной преимущественно на территории ПФО РФ. В результате выполнения работы прошел апробацию программный комплекс, осуществляющий полный цикл обработки ГНСС-данных, в частности, расчет ПЭС и его производных, таких как ROT, ROTI, AATR и др., значений мощности сигнала, картирование полученных данных и т. д.

После обработки исходного набора данных удалось выявить отклик медианных вариаций ПЭС, рассчитанных для пространственной области 50° – 65° N; 35° – 65° E, на воздействие солнечных вспышек X-, M- и C-классов во все дни исследований. Вместе с тем было определено, что вспышки, произошедшие после захода Солнца, для рассматриваемого региона не внесли существенных изменений в фоновые значения ПЭС. Стоит отметить также, что мощные возмущения геомагнитного поля 7–8 сентября (см. рис. 3, в и 4, а) вызвали значимые по длительности возмущения в ионосфере, достигавшие значений 0.2 TECU и длившиеся 3–4 ч. За исключением резкого понижения отношения несущей к шуму 12 сентября не удалось выявить значимого снижения мощности сигнала в дни возникновения солнечных вспышек и продолжительных магнитных бурь.

Валидация данных, полученных при помощи оригинального программного комплекса, проводилась по результатам, приведенным в работах [Yasyukevich et al., 2018; Qian et al., 2019]. Получено хорошее со-

гласие результатов от 06.09.2017 г. по характеру отклика вариаций ПЭС на воздействие со стороны солнечных вспышек X2.2 и X9.3.

К сожалению, в данном исследовании мы были ограничены только двумя созвездиями навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС в виду малого количества ГНСС-приемников в 2017 г. в ПФО РФ, способных регистрировать ГНСС-данные других созвездий навигационных спутников, например, таких как Galileo и Beidou. На данный момент в исследуемом регионе (см. рис. 1, а) количество базовых приемных ГНСС-станций значительно возросло и большая их часть способна регистрировать сигналы от всех действующих ГНСС-созвездий. Поэтому аналогичное исследование, проведенное для событий текущего 25-го цикла солнечной активности, может дать более детальные карты распределения интенсивности вариаций ПЭС, что расширит диагностические возможности данного метода исследования ионосферных возмущений.

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: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Денисенко П.Ф., Сказик А.И. Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по данным спутникового зондирования. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2007. Т. 12, № 5. С. 33–35.

Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю. Солнечные и межпланетные источники геомагнитных бурь: аспекты космической погоды. *Геофизические процессы и биосфера*. 2009. Т. 8, № 1. С. 5–35.

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.

Ларюнин О.А., Куркин В.И., Подлесный А.В. Использование данных двух близко расположенных ионозондов при диагностике перемещающихся ионосферных возмущений. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19, № 1. С. 10–17.

Леонович Л.А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки и магнитные бури по данным глобальной сети GPS. *Автореф. дис. ... к-та физ.-мат. Наук: 25.00.29*. Иркутск, 2003. 15 с.

Перевалова Н.П. Исследование ионосферных возмущений методом трансionoсферного GPS зондирования. *Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29*. Иркутск, 2014. 32 с.

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 МГУ*. 2018. № 4. С. 1840403.

Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Перевалова Н.П. и др. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2013. 271 с.

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. Vol. 27, no. 6-7. P. 1333–1338.

Alken P., Thébaud E., Beggan C.D., et al. International Geomagnetic Reference Field: the thirteenth generation. *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73, no. 49. DOI: [10.1186/s40623-020-01288-x](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x).

Fleming J.A., Harradon H.D., Joyce J.W. Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity. *Seventh General Assembly of the Association of Terrestrial Magnetism and Electricity at Washington*. 1939. Vol. 44, no. 4. P. 477–478. DOI: [10.1029/TE044i004p00471](https://doi.org/10.1029/TE044i004p00471).

GOES I-M Databook. *Space System Loral*. 1996. P. 184.

Gurtner W. *RINEX: The Receiver Independent Exchange Format version 2.11*. Astronomical Institute, University of Berne, UNAVXO Boulder, 2007. 57 p.

Hofmann-Wellenof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System. Theory and Practice*: 3rd ed. Wien, New York: Springer-Verlag, 1994. 355 p. DOI: [10.1017/S0016756897438256](https://doi.org/10.1017/S0016756897438256).

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. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124, iss. 3. P. 2298–2311. DOI: [10.1029/2018JA.026175](https://doi.org/10.1029/2018JA.026175).

Svetska Z. *Flare observations*. Gordon and Breach Science Publisher, 1981.

Yasyukevich Y., Astafyeva E., Padokhin A., et al. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation. *Space Weather*. 2018. Vol. 16, iss. 8. P. 1013–1027. DOI: [10.1029/2018SW001932](https://doi.org/10.1029/2018SW001932).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/pomoshch/chto-predstavlyayut-soboy-solnechnye-vspyshki.html> (дата обращения 17 сентября 2022 г.).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl.html> (дата обращения 17 сентября 2022 г.).

URL: https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html?m=9&d=8&y=2017 (дата обращения 27 августа 2022 г.).

URL: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation> (дата обращения 25 сентября 2022 г.).

URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (дата обращения 7 октября 2022 г.).

URL: <https://www.space-track.org> (дата обращения 7 октября 2022 г.).

URL: <https://pypi.org/project/spacetrack> (дата обращения 7 октября 2022 г.).

URL: <https://pypi.org/project/skyfield> (дата обращения 7 октября 2022 г.).

URL: <https://insidegnss.com/measuring-gnss-signal-strength> (дата обращения 23 октября 2022 г.).

URL: <https://time365.info/voshod-i-zakat/kazan-rossiya> (дата обращения 20 января 2023 г.).

URL: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/201709/index.html (дата обращения 20 января 2023 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/21-72-00043/> (дата обращения 20 января 2023 г.).

Как цитировать эту статью:

Максимов Д.С., Когогин Д.А., Насыров И.А., Загреддинов Р.В. Влияние солнечных вспышек 5-12 сентября 2017 г. на региональную возмущенность ионосферы Земли по данным ГНСС-станций, расположенных в Приволжском федеральном округе Российской Федерации. *Солнечно-земная физика*. 2023. Т. 9, № 2. С. 52–59. DOI: [10.12737/szf-92202306](https://doi.org/10.12737/szf-92202306).