

## КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.388.2

<https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.297-304>

## Изменения полного электронного содержания ионосферы во время прохождения геомагнитной бури 31 августа – 3 сентября 2019 года по данным GPS

© 2020 А.А. Кирилов, В.Н. Сычев\*

Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке, Киргизия

\*E-mail: [sychev@gdirc.ru](mailto:sychev@gdirc.ru)

**Резюме.** Рассмотрены изменения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы во время прохождения умеренной геомагнитной бури ( $K_p = 4-6$ ), зарегистрированной 31 августа – 3 сентября 2019 г. Эта магнитная буря обладала самой большой в 2019 г. продолжительностью во времени. Для получения количественной оценки изменений, возникающих в ионосферном слое, проводился анализ вариаций угла наклона спектра мощности флуктуаций ПЭС по трассе распространения радиоволн от спутников GPS до приемной станции. В скользящем окне временной ряд ПЭС раскладывался в ряд Фурье и вычислялся тангенс угла наклона спектра мощности. В качестве исходной информации использовались первичные данные перманентной станции GPS POL2, которая входит в состав сети IGS. Станция находится на территории ИС РАН, Бишкек, Киргизия, оснащена приемником Javad Delta-3, высокоточной антенной TPSCR.G3.

**Ключевые слова:** магнитная буря, ионосфера, GPS, полное электронное содержание, преобразование Фурье, спектр мощности

**Для цитирования:** Кирилов А.А., Сычев В.Н. Изменения полного электронного содержания ионосферы во время прохождения геомагнитной бури 31 августа – 3 сентября 2019 года по данным GPS. *Геосистемы переходных зон*, 2020, т. 4, № 3, с. 297–304. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.297-304>

**For citation:** Kirilov A.A., Sychev V.N. Changes in the total electron content of the ionosphere during a geomagnetic storm August 31 – September 3, 2019 according to GPS data. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 3, pp. 297–304. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.3.297-304>

## Changes in the total electron content of the ionosphere during a geomagnetic storm August 31 – September 3, 2019 according to GPS data

Artem A. Kirilov, Vladimir N. Sychev\*

Research Station of Russian Academy of Sciences in Bishkek City, Bishkek, Kyrgyzstan

\*E-mail: [sychev@gdirc.ru](mailto:sychev@gdirc.ru)

**Abstract.** This article considers changes in the total electron content (TEC) in the ionosphere during a moderate geomagnetic storm ( $K_p = 4-6$ ) recorded in Kyrgyzstan between August 31 and September 3, 2019. This geomagnetic storm was recognized to be the longest-lasting among those registered in 2019. In order to obtain a quantitative assessment of changes arising in the ionospheric layer during such geomagnetic events, variations in the slope of the power spectrum of TEC fluctuations along the propagation path of the radio waves from GPS satellites to the receiving station were analysed. Using a sliding window method, the TEC time series was expanded in a Fourier series, and the slope of the power spectrum was calculated. As initial information, primary data provided by the GPS POL2 permanent station, which is a part of the IGS network, on the territory of Research Station of the Russian Academy of Sciences located in Bishkek were used. This station is equipped with a Javad Delta-3 receiver and a TPSCR.G3 high-precision antenna.

**Keywords:** magnetic storm, ionosphere, GPS, total electronic content, Fourier transform, power spectrum

## Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Научная станция Российской академии наук в г. Бишкеке (тема № АААА-А19-119020190064-9).

## Введение

Источником энергии большинства процессов, протекающих в атмосфере Земли, является излучение Солнца. По мере достижения заряженными частицами зоны действия земного магнитного поля они направляются этим полем к высокоширотным областям, вызывая возмущения электрического и магнитного полей, так называемые магнитные бури. В периоды сильных бурь возмущения распространяются и на средние широты, в большинстве случаев приводя к «отрицательным» возмущениям. Магнитные бури принято характеризовать следующими индексами:  $K$ ,  $K_p$ ,  $G$  [Lanyi, Roth, 1988].

$K$ -индекс, введенный Дж. Бартельсом в 1938 г., характеризует отклонение магнитного поля Земли от нормы каждые 3 ч. Значения  $K$ -индексов определяются по данным 13 геомагнитных обсерваторий, объединенных в сеть, из которых 11 находятся в северном, а 2 – в южном полушарии. Значения  $K$ -индексов варьируют от 0 до 9 для каждого трехчасового интервала (0–3, 3–6, 6–9 и т.д.) мирового времени. Значение  $K = 0$  соответствует спокойному магнитному полю,  $K = 9$  – экстремально сильному возмущению.

Используемый в настоящей работе планетарный индекс  $K_p$  представляет собой среднюю величину  $K$ -индекса, взятого по данным геомагнитных обсерваторий.  $G$ -индекс определяется по 5-балльной шкале, характеризующей интенсивность магнитной бури по воздействию магнитного поля на электротехнику, связь, навигацию и т.д. По этой шкале магнитные бури подразделяются на уровни от G1 до G5. При этом установлено следующее соответствие между G- и  $K_p$ -индексом: G1 (слабая буря) –  $K_p = 5$ ; G2 (умеренная) –  $K_p = 6$ ; G3 (сильная) –  $K_p = 7$ ; G4 (очень сильная) –  $K_p = 8$ ; G5 (экстремально сильная) –  $K_p = 9$ .

Использование спутников GPS для изучения ионосферы при внешних воздействиях – быстро развивающееся направление в науках о Земле. Изменениям полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы при воздей-

ствиях различного рода как естественного, так и техногенного происхождения (землетрясения, солнечная и геомагнитная активность, грозы, цунами, взрывы и т.д.) посвящено много исследований [Афраймович, 2006; Гохберг и др., 2011; Pezzopane et al., 2019; Belakhovsky et al., 2017; Candido et al., 2018]. Первые публикации подобных исследований с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем появились почти сразу же после внедрения этих систем навигации [Lanyi, Roth, 1988]. Исследования с использованием такого вида данных при оценке флуктуаций ПЭС ионосферы как индикатора воздействий остаются актуальными и в настоящее время, так как воздействия можно трактовать как активные эксперименты и использовать для решения ряда задач физики ионосферной плазмы, распространения радиоволн, физики ударных волн и пр. [Афраймович, 2006].

Цель данной работы – исследование изменений ионосферы в период прохождения умеренной магнитной бури уровня G1 и G2, которая наблюдалась с 31 августа по 3 сентября 2019 г. Изменения в ионосфере оценивали по значениям полного электронного содержания, полученным по измерениям перманентной станции GPS POL2, которая входит в состав сети IGS. Станция находится на территории Научной станции РАН, оснащена приемником Javad Delta-3 и высокоточной антенной TPSCR.G3. Географические координаты станции: 74° 41' 39.37" N; 42° 40' 47.17" E [IGS...]. Особенностью работы этой приемной станции является также высокая частота дискретизации входного сигнала – одно измерение в секунду.

## Методика

### Алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС

В работе используется уже опубликованная и широко известная методика определения ПЭС [Афраймович, 2006; Cherniak, Zakharenkova, 2017; Мыльникова и др., 2013] по данным GPS-измерений.

Стандартной формой передачи и хранения данных GPS-измерений являются файлы в формате RINEX (стандарт UNAVCO COMPACT 3) [Lou, Wier, 2014]. Файлы RINEX с расширениями \*.m12 и \*.m21 содержат фазовые измерения псевдодальности L1 и L2 для наблюдений для основной и дополнительной частот GPS – 1575.42 и 1227.60 МГц. Файлы RINEX с расширениями \*.p11 и \*.p12 содержат кодовые измерения псевдодальности P1 и P2 для приведенных выше частот. При прохождении радиосигнала через ионосферу проявляется ионосферная задержка. Время задержки прямо пропорционально ПЭС вдоль всей траектории распространения радиоволны.

Для вычисления ПЭС используются следующие выражения [Афраймович, 2006]: по фазовым измерениям по двум частотам вдоль луча «приемник – спутник» –

$$J_{\varphi} = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \cdot [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \delta L]; \quad (1)$$

по кодовым задержкам для тех же двух частот –

$$J_P = \frac{1}{40.308} \cdot \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} \cdot [(P_1 - P_2) + \delta P]. \quad (2)$$

Здесь  $J_{\varphi}$  и  $J_P$  – рассчитанные значения ПЭС;  $L_1 \lambda_1$  и  $L_2 \lambda_2$  – приращения фазового пути сигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере,  $L_1 = \Delta\varphi/2\pi$  и  $L_2 = \Delta\varphi/2\pi$  – фазовые измерения GPS-приемника, выполненные на частоте  $f_1$  и  $f_2$  соответственно;  $\delta L$  – ошибка измерения фазы;  $P_1$  и  $P_2$  – групповой путь для частот  $f_1$  и  $f_2$ ;  $\delta P$  – ошибка измерения дальности по P-коду. В работе используется разность  $J_{\varphi} - J_P$ , взятая по абсолютной величине, так как она несет наиболее исчерпывающую информацию об изменении амплитуды ПЭС.

Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (total electron content unit), она равна величине  $10^{16} \text{ м}^{-2}$  [Афраймович, 2006; Hofmann-Wellenhof et al., 2001].

### Преобразование наклонного ПЭС в вертикальное ПЭС

ПЭС, полученное из выражений (1) и (2), пропорционально расстоянию между приемником и передатчиком и измеренное при различных углах расположения навигацион-

ного спутника относительно линии горизонта  $\theta_s$ , является «наклонным». При исследовании ионосферных возмущений требуется некоторая нормировка амплитуды вариаций ПЭС. Для этого рассчитанную величину ПЭС необходимо преобразовать в значения вертикального ПЭС относительно подионосферной точки (точки пересечения луча зрения на навигационный ИСЗ с высотой главного максимума концентрации электронов ионосферы, соответствующее  $\theta_s = 90^\circ$ ). Для преобразования ПЭС из наклонного в вертикальное применяют следующий критерий [Иванов и др., 2011]:

$$J_{\text{верт}} = J_{\text{гор}} \cdot \left[ \arcsin \left( \frac{R_e}{R_e + h_{\text{max}}} \cdot \cos(\theta_s) \right) \right], \quad (3)$$

где  $J_{\text{верт}}$  и  $J_{\text{гор}}$  – значения вертикального и наклонного ПЭС, TECU;  $R_e$  – радиус Земли,  $h_{\text{max}}$  – высота максимума электронной концентрации в ионосфере,  $\theta_s$  – угол расположения навигационного спутника относительно линии местного горизонта.

Поскольку амплитуда колебаний ПЭС с периодами 2–120 мин варьирует в большом диапазоне значений, анализ спектров производится в логарифмическом масштабе [Афраймович, 2006]. С целью получения количественных оценок изменения ПЭС во время дополнительных возмущений (умеренной магнитной бури) вычисляется тангенс угла наклона спектра мощности флуктуаций ПЭС. Наклон спектра мощности  $S^2(F)$  в логарифмическом масштабе определяется наклоном аппроксимирующей прямой, которая может быть описана выражением:

$$\lg(S^2(F)) = k \cdot \lg(F) + b, \quad (4)$$

где коэффициент  $k = \text{tg}(\alpha)$  – это тангенс угла наклона  $\alpha$  аппроксимирующей прямой;  $b$  – масштабный коэффициент, характеризующий подъем прямой относительно оси абсцисс. Эти величины рассчитываются методом наименьших квадратов.

### Результаты

Для наблюдения изменения ПЭС во время прохождения умеренной магнитной бури с 31.08.2019 по 3.09.2019 были обработаны результаты измерений GPS-станции POL2 в интервале 243–247-й день 2019 г.

Чтобы ограничить область ионосферы, для которой будут найдены значения вертикального ПЭС, выбираются данные только от тех спутников, которые имеют наиболее полное покрытие зоны наблюдения. Исходя из этого критерия и для получения наиболее достоверной и полной информации было выбрано 4 спутника с непрерывным сигналом (спутники GPS G7, G10, G14, G20). На рис. 1 показаны траектории движения этих спутников в полярной системе координат.

Для получения информации об изменении ПЭС в рассматриваемом интервале выделяли скользящее окно размером 1024 точки и с шагом 16 точек. Скользящее окно выбирается кратным  $2^n$ , так как этого требует алгоритм быстрого преобразования Фурье. В каждом окне производили быстрое преобразование Фурье для разности  $J_\phi - J_p$ ,

вычисляли спектр мощности сигнала и находили угол наклона графика – коэффициент  $k$  (выражение (4)). Спектр мощности сигнала сохраняет информацию только об амплитудах спектральных составляющих [Рязанцева и др., 2017], поэтому он будет наиболее информативен при наличии значительных изменений в измеренном ПЭС. На рис. 2 показан спектр мощности флуктуаций ПЭС для спутника G7 в течение всего времени его прохождения, а также пример определения угла наклона спектра мощности ПЭС.

В таблице представлены характеристики магнитной бури в дни, когда она происходила, максимальные значения уровня  $K_p$  в течение суток и ПЭС. По данным таблицы видно, что значения ПЭС возрастают в соответствии с показателями интенсивности магнитного поля Земли.

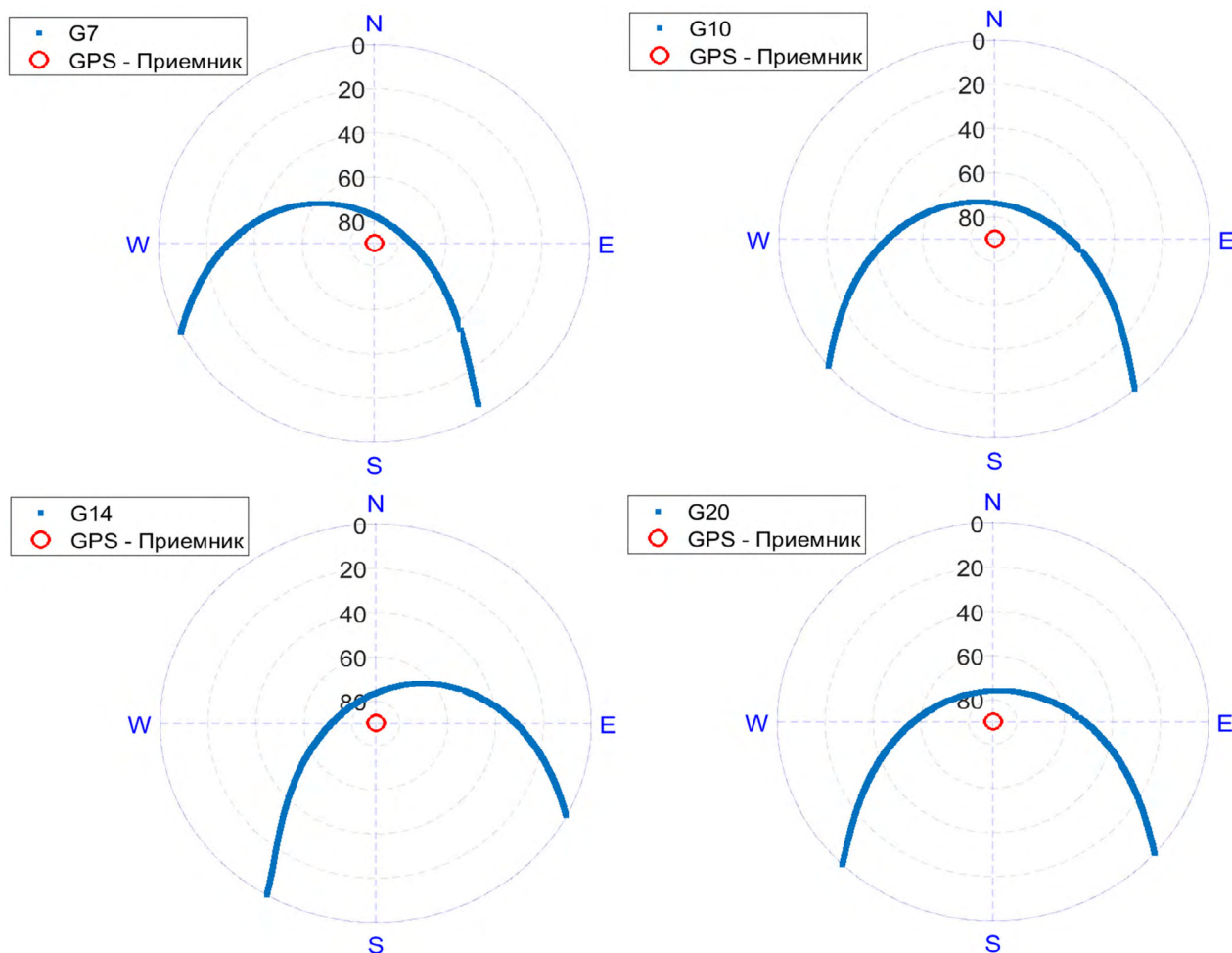


Рис. 1. Траектории для спутников G7, G10, G14, G20, полученные в полярных координатах, в 243-й день измерений 2019 г.

Figure 1. Trajectories for the G7, G10, G14, G20 satellites obtained in Cartesian coordinates on the 243rd day of measurements in 2019.

Таблица. Характеристики магнитной бури 31.08. – 3.09.2019

Table. Characteristics of the magnetic storm August 31 – September 3, 2019

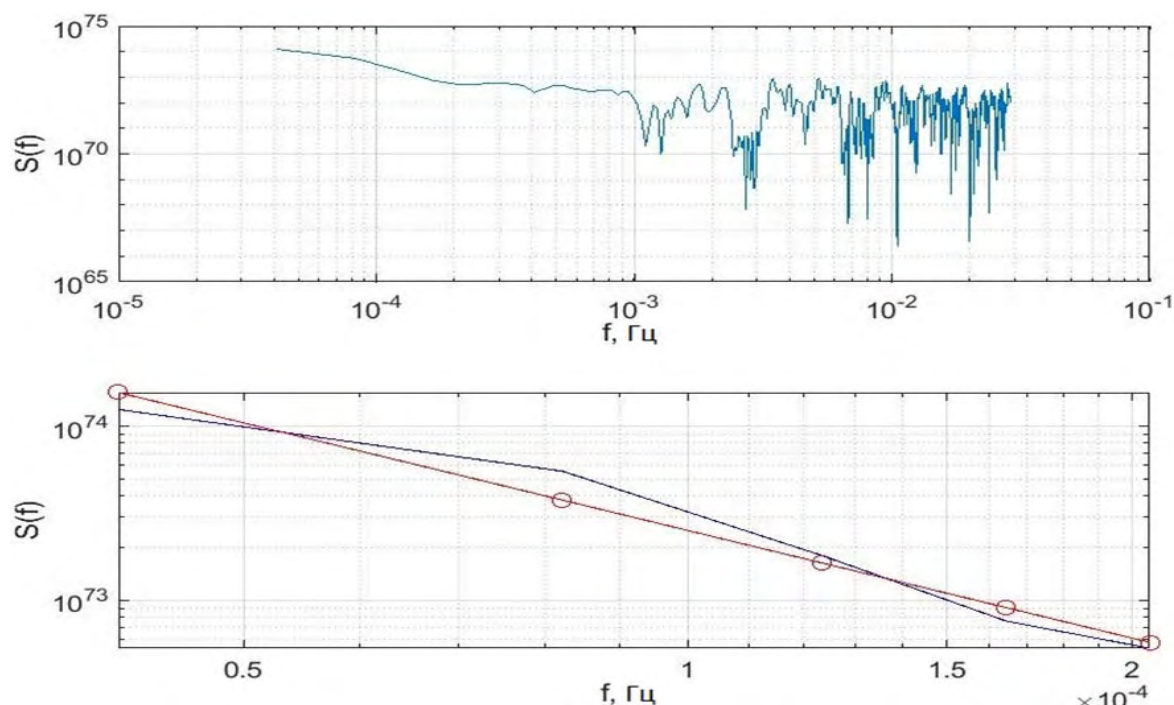
День года	Усредненный планетарный индекс, $K_p$	ПЭС, TECU, $10^{16}$ м <sup>2</sup> по спутникам GPS (максимальные значения в течение суток)				Индекс магнитной бури, $G$
		G7	G10	G14	G20	
243	6	13	11.9	17	9.9	2
244	6	29	17	13	9	2
245	5	5.9	13.1	9	9	1
246	4	7.9	9.9	2.6	7.3	0

Анализ динамики изменения угла спектра мощности ПЭС продемонстрировал, что ПЭС наиболее активно изменяется во время прохождения магнитных бурь. На рис. 3 показаны графики изменения угла наклона спектра мощности ПЭС и усредненного планетарного индекса  $K_p$  в течение суточного периода в первый и третий дни наблюдения (243-й и 245-й дни года). При  $K_p > 4$  прослеживается рост амплитуды изменения угла наклона спектра мощности ПЭС, а при  $K_p < 4$  – спад угла наклона спектра. При  $K_p = 4$  существенных изменений ПЭС не наблюдалось. Как видно из рис. 2 и 3, угол наклона спектра мощности воз-

растает с ростом  $K_p$ . Отмечается взаимосвязь между повышением и понижением  $K_p$  и амплитудой изменяющегося угла наклона спектра мощности ПЭС.

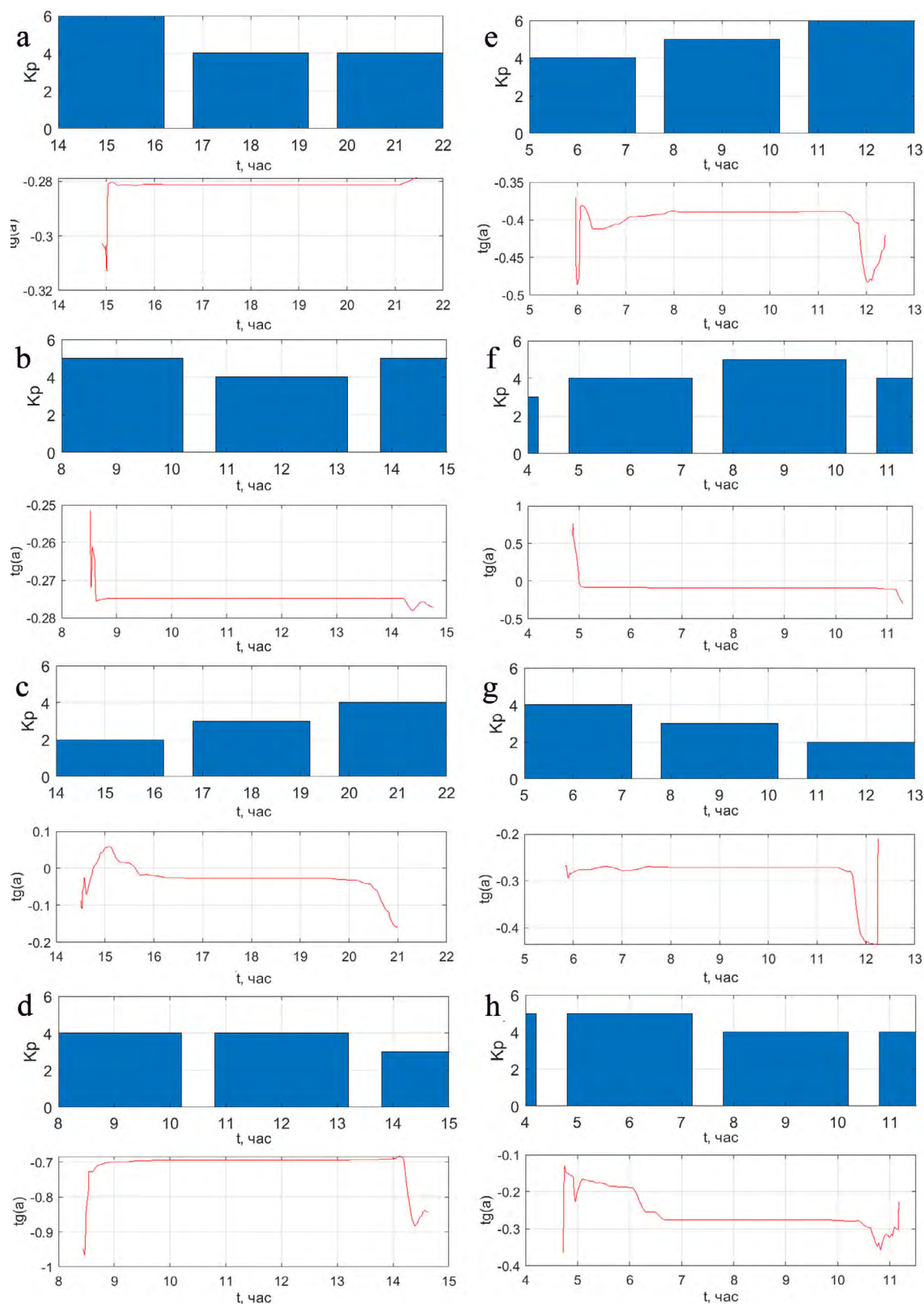
На рис. 4 показано изменение наклона спектра мощности ПЭС  $\text{tg}(\alpha)$  с 243-го по 246-й день года для спутника G10. На графиках в местах возрастания индекса  $K_p$  наблюдаются экстремумы угла наклона спектра мощности ПЭС.

На представленных графиках отчетливо видна взаимосвязь ПЭС с длительностью магнитной бури. Таким образом, можно получить количественные изменения ПЭС при различных магнитных бурях.



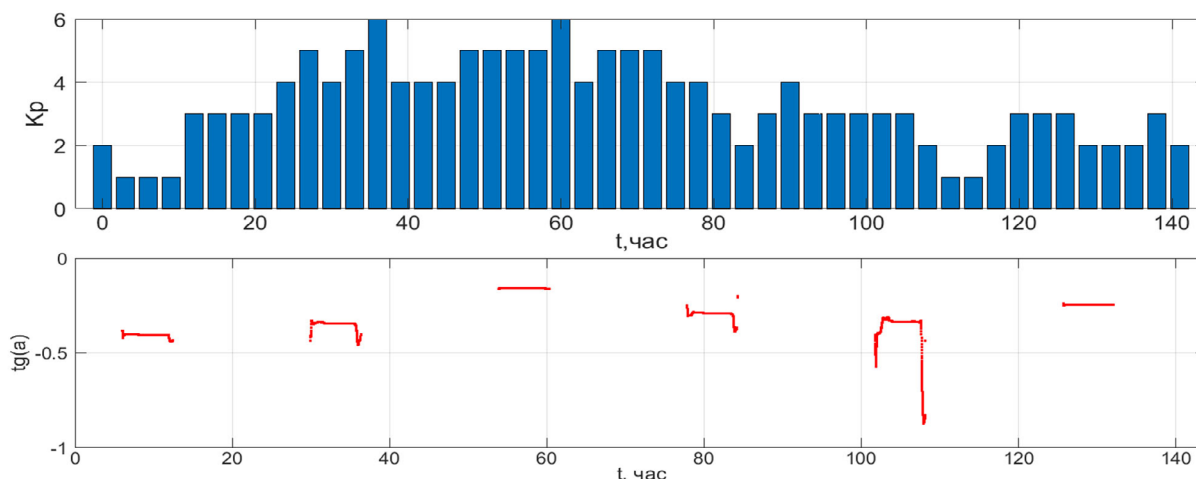
**Рис. 2.** Спектр мощности флуктуаций ПЭС. Нижний график показывает аппроксимируемый участок спектра мощности в логарифмическом масштабе. Аппроксимирующая прямая с рассчитанными точками выделена красным цветом.

**Figure 2.** Power spectrum of the TEC fluctuations. The bottom graph shows an approximated portion of the power spectrum on a logarithmic scale. The approximating straight line with calculated points is highlighted in red.



**Рис. 3.** Взаимосвязь изменений индекса  $K_p$  и угла наклона спектра мощности ПЭС  $tg(\alpha)$  в течение суточного прохождения в первый (243-й день года, левая колонка) и третий (245-й день года, правая колонка) дни наблюдения магнитной бури для спутников G7 (а и е), G10 (b и f), G14 (c и g), G20 (d и h).

**Figure 3.** The relationship of changes in the  $K_p$  index and the slope of the TEC power spectrum  $tg(\alpha)$  during the daily passage on the first (243<sup>rd</sup> day of year, left column) and third (245<sup>th</sup> day of year, right column) days of observation of the magnetic storm for the G7 (a, e), G10 (b, f), G14 (c, g), G20 (d, h) satellites.



**Рис. 4.** Изменение индекса  $K_p$  и угла наклона спектра мощности ПЭС  $\text{tg}(\alpha)$  в течение 4 дней наблюдения магнитной бури для спутника G10.

**Figure 4.** Change in the  $K_p$  index and the slope of the TEC power spectrum  $\text{tg}(\alpha)$  during 4 days of observation of the magnetic storm for the G10 satellite.

## Выводы

Данные по изменению угла наклона спектра мощности вариаций ПЭС позволяют оценить изменение ионосферы во время прохождения бури. Для определения параметров ПЭС использовались высокоточные данные перманентной GPS-станции. В обработке участвовали измерения по тем спутникам, для которых получен наиболее длительный непрерывный сигнал. Анализ

GPS-измерений проводился для интервала времени, в котором была зарегистрирована геомагнитная буря 31 августа – 3 сентября 2019 г. Из 14 магнитных бурь, зафиксированных в 2019 г., для исследований была выбрана буря самой большой продолжительности. Показаны существенные изменения угла наклона спектра мощности вариаций ПЭС во время прохождения этой умеренной геомагнитной бури.

## Список литературы

1. Афраймович Э.Л. **2006.** *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли.* Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 480 с.
2. Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л. **2011.** Ионосферный отклик на подводные курильские землетрясения по наблюдениям со спутников GPS. *Исследование Земли из космоса*, 1: 30–38.
3. Иванов В.А., Желонкин А.Ю., Рябова Н.В., Зуев А.В. **2011.** Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы. *Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*, 11(1): 24–30.
4. Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Демьянов В.В. **2013.** Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS. *Солнечно-земная физика*, 24: 70–77.
5. Рязанцева М.О., Будаев В.П., Рахманова Л.С., Бородкова Н.Л., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Шафранкова Я., Немечек З., Прех Л., Питна А. **2017.** Перемежаемость плотности солнечного ветра вблизи межпланетной ударной волны. *Геомагнетизм и аэрономия*, 57(6): 696–705. <https://doi.org/10.7868/S0016794017060104>
6. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A. **2017.** Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth Planets Space*, 69(105). <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0696-1>
7. Candido C.M.N., Batista I.S., Klausner V. **2018.** Response of the total electron content at Brazilian low latitudes to corotating interaction region and high-speed streams during solar minimum 2008. *Earth Planets Space*, 70(104). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0875-8>
8. Cherniak I., Zakharenkova I. **2017.** New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high-latitude ionospheric irregularities monitoring: case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth Planets Space*, 69(66). <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0>

9. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. **2001**. *Global positioning system: Theory and practice*. New York: Springer-Verlag, 5, 382 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-9>
10. IGS: *The International GNSS Service*.  
URL: [http://www.igs.org/igsnetwork/network\\_by\\_site.php?site=pol2](http://www.igs.org/igsnetwork/network_by_site.php?site=pol2) (accessed 15.01.2020).
11. Lanyi G.E., Roth T. A **1988**. Comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations. *Radio Science*, 4(23): 483–492. <https://doi.org/10.1029/rs023i004p00483>
12. Lou E., Wier S. **2014**. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products. *UNAVCO Inc*: 42.  
URL: [https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO\\_Teqc\\_Tutorial.pdf](https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf)
13. Pezzopane M., Del Corpo A., Piersanti M. **2019**. On some features characterizing the plasmasphere–magnetosphere–ionosphere system during the geomagnetic storm of 27 May 2017. *Earth Planets Space*, 71(77). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1056-0>

## References

1. Afraimovich E.L. **2006**. *GPS-monitoring verkhnei atmosfery Zemli [GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere]*. Irkutsk: GU NTs RVKh VSNTs SO RAMN [SC of Reconstructive and Restorative Surgery of the ESSC of the SB RAMS], 480 p. (In Russ.).
2. Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Steblor G.M., Shalimov S.L. **2011**. Ionospheric response to Kuril undersea earthquakes from GPS satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Earth Observation and Remote Sensing*, 1: 30–38. (In Russ.).
3. Ivanov V.A., Zhelonkin A.Yu., Ryabova N.V., Zuev A.V. **2011**. Influence of geomagnetic disturbances on the ionospheric total electron content. *Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy = Vestnik of Mari State Technical University. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 11(1): 24–30. (In Russ.).
4. Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Demyanov V.V. **2013**. Estimation of absolute vertical total electron content in the ionosphere from GLONASS/GPS data. *Solnechno-Zemnaya Fizika = Solar-Terrestrial Physics*, 24: 70–77. (In Russ.).
5. Ryazantseva M.O., Budaev V.P., Rakhmanova L.S., Borodkova N.L., Zastenker G.N., Yermolaev Y.I., Safrankova J., Nemecek Z., Prech L., Pitna A. **2017**. Intermittency of the solar wind density near the interplanetary shock. *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(6): 645–654. <https://doi.org/10.1134/s001679321706010x>
6. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Sakharov Y.A. **2017**. Geomagnetic and ionospheric response to the interplanetary shock on January 24, 2012. *Earth Planets Space*, 69(105). <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0696-1>
7. Candido C.M.N., Batista I.S., Klausner V. **2018**. Response of the total electron content at Brazilian low latitudes to corotating interaction region and high-speed streams during solar minimum 2008. *Earth Planets Space*, 70(104). <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0875-8>
8. Cherniak I., Zakharenkova I. **2017**. New advantages of the combined GPS and GLONASS observations for high-latitude ionospheric irregularities monitoring: case study of June 2015 geomagnetic storm. *Earth Planets Space*, 69(66). <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0652-0>
9. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. **2001**. *Global positioning system: Theory and practice*. Vienna, Springer-Verlag, 382 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-9>
10. IGS: *The International GNSS Service*. URL: [http://www.igs.org/igsnetwork/network\\_by\\_site.php?site=pol2](http://www.igs.org/igsnetwork/network_by_site.php?site=pol2) (accessed: 15.01.2020)
11. Lanyi G.E., Roth T.A. **1988**. Comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations. *Radio Science*, 23(4): 483–492. <https://doi.org/10.1029/rs023i004p00483>
12. Lou E., Wier S. **2014**. Teqc Tutorial: Basics of Teqc Use and Teqc Products. *UNAVCO Inc*: 42.  
URL: [https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO\\_Teqc\\_Tutorial.pdf](https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/doc/UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf)
13. Pezzopane M., Del Corpo A., Piersanti M. **2019**. On some features characterizing the plasmasphere–magnetosphere–ionosphere system during the geomagnetic storm of 27 May 2017. *Earth Planets Space*, 71(77). <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1056-0>

## Сведения об авторах

КИРИЛОВ Артем Александрович, инженер, лаборатория моделирования энергонасыщенных сред, Научная станция РАН в г. Бишкеке, [artemmiroy117@gmail.com](mailto:artemmiroy117@gmail.com)

СЫЧЕВ Владимир Николаевич (ORCID 0000-0001-7508-9087), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория моделирования энергонасыщенных сред, Научная станция РАН в г. Бишкеке, Киргизия, [sychev@gdirc.ru](mailto:sychev@gdirc.ru)