

УДК 551.501.89.

ДИНАМИКА ПЭС ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК X КЛАССА

© 2022 г. Д. А. Тауренис^{1,2*}, Н. С. Барабаш^{1,3}, И. А. Ряховский²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский институт), Москва, Россия

²Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия

³Геофизический центр РАН, Москва, Россия

*E-mail: taurenis.da@phystech.edu

В работе представлен комплексный анализ динамики ПЭС во время солнечных вспышек X класса, произошедших в сентябре 2017 года. Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового излучения, наблюдаемое во время хромосферных вспышек на Солнце, вызывает немедленное возрастание электронной концентрации во всей ионосфере. В настоящем исследовании была разработана методика оценки изменения ПЭС ионосферы, вызванного всплеском солнечной активности. По полученным результатам был определен диапазон длин волн, в большей степени определяющий изменение величины полного электронного содержания ионосферы во время Солнечных вспышек.

Ключевые слова: солнечные вспышки, ПЭС, ГНСС, ионосфера, рентген, ультрафиолет

Для цитирования: Тауренис Д.А., Барабаш Н.С., Ряховский И.А. Динамика ПЭС во время солнечных вспышек X класса // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14. № 1. С. 110–117. http://doi.org/10.26006/22228535_2022_14_1_110.

Введение

Современный уровень развития глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) дал возможность существенно продвинуться в вопросах изучения ионосферы [Афраймович, 2006]. К настоящему времени использование ГНСС позволило накопить большой объем уникальных экспериментальных данных о структуре ионосферы: глобальном распределении ионизации, ее суточных, сезонных, климатических вариациях и полном электронном содержании (ПЭС) [Афраймович, 2006; Bhuyan, 2006]. Высокое пространственно-временное разрешение систем ГНСС сделало возможным проведение исследований быстро протекающих процессов в ионосфере, вызванных различными гелиогеофизическими возмущениями (солнечные вспышки, магнитные бури, землетрясения, извержения вулканов и др.) [Митра, 1977; ChaliIdosa, 2022; Sanjay Kumar, 2011].

Увеличение интенсивности рентгеновского и ультрафиолетового (УФ) излучений, наблюдаемых во время хромосферных вспышек на Солнце, вызывает немедленное возрастание полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы [Афраймович, 2006; Abha Singh, 2020]. ПЭС – это физическая величина, численно равная количеству свободных электронов в вертикальном столбе с единичным поперечным сечением 1 м². Оценка этой величины стала возможной благодаря появлению двух частотных систем ГНСС.

Основной проблемой оценки динамики ПЭС, вызванной солнечными вспышками, является наличие ярко выраженных полиномиальных трендов (рис. 1.). Наличие этих трендов в экспериментальных данных обусловлено тем, что за время пролета спутника над точкой наблюдения существенно меняется наклон луча спутник-приемники, как следствие, толщина исследуемой ионосферы [Афраймович, 2006]. Для компенсации наличия полиномиальных трендов в экспериментальных данных была разработана методика, которая позволила оценить динамику ПЭС, вызванную солнечными вспышками.

Методика заключается в следующем: в автоматическом режиме выделяются невозмущенные данные, по которым строится полиномиальный тренд, который вычитается из исходных данных.

Опытным путем было выяснено, что полиномы 3 степени наиболее точно описывают характер невозмущенных данных: полиномы высших степеней имеют физически необоснованные осцилляции. Насколько нам известно, работы с подобными методиками не публиковались.

Разработанная методика позволила нам оценить динамику ПЭС, вызванную солнечными вспышками, более чем в 1000 наблюдательных пунктах в автоматизированном режиме. Используя данные по потоку УФ (эмпирической модели FISM2FLARE [https://lasp.colorado.edu/eve/data_access/evewebdata/fism/flare_hr_data/netcdf/2017/]) и рентгеновского излучения (спутник GOES), нам удалось построить эмпирическую зависимость динамики вертикального ПЭС ионосферы от потоков Солнечного излучения во время солнечных вспышек X класса, произошедших 6 и 10 сентября. 2017 г.

Экспериментальные данные и методы

С 2014 года в геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» ведутся непрерывные измерения наклонного и вертикального ПЭС [Ryakhovskii, 2021]. Большой объем экспериментальных данных позволил нам разработать автоматическую методику оценки динамики ПЭС, вызванной солнечными вспышками различного класса. Результаты расчета наклонного ПЭС за 6 сентября 2017 года представлены на рис. 1 (нижняя панель). Наличие отрицательных значений ПЭС связано с неопределенностью фазовых измерений [Афраймович, 2006]. Красным прямоугольником отмечен период, во время которого произошла солнечная вспышка X класса. Поток рентгеновского излучения представлен на рис. 1: верхняя панель. Наблюдается существенное изменение величины ПЭС, вызванное резким изменением потока электромагнитного излучения в широком диапазоне частот.

Как уже было сказано, для оценки динамики ПЭС, вызванной солнечной вспышкой, алгоритм

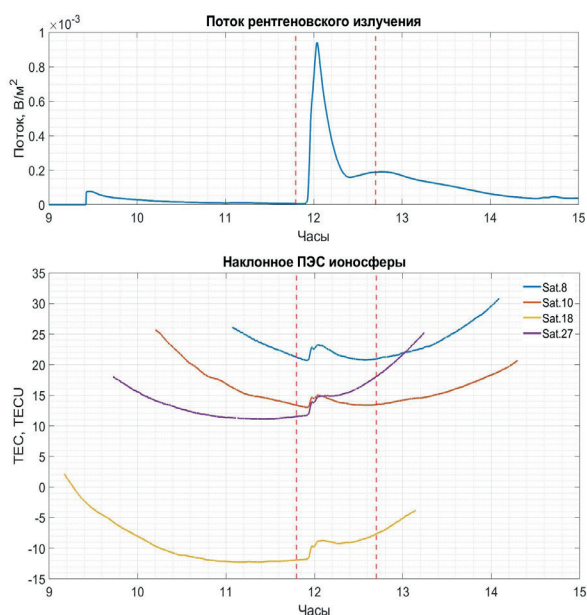


Рис. 1. Верхняя панель: график зависимости потока рентгеновского излучения (в диапазоне 0.1–0.8 нм) от времени во время солнечной вспышки X класса, произошедшей 6 сентября 2017 года. Нижняя панель: экспериментальные данные по вариации наклонного ПЭС, рассчитанные для спутников в ГФО «Михнево» 6 сентября 2017 года. Красным прямоугольником отмечен момент солнечной вспышки класса X 9.3

определяет полиномиальный тренд, который содержится в невозмущенных данных, а затем вычитает его. В качестве примера на рис. 2 красными кривыми представлены параболические тренды, рассчитанные в автоматическом режиме для четырех спутников GPS, наблюдаемых в ГФО «Михнево» во время вспышки X класса. После вычитания полиномиального тренда и перерасчета наклонного ПЭС в вертикальный была получена динамика ПЭС над ГФО «Михнево», вызванная солнечной вспышкой (рис. 3).

Разработанный автоматический алгоритм позволил нам оценить динамику ПЭС на освещенной части Земли во время двух солнечных вспышек: 6 и 10 сентября (рис. 3).

Анализировались данные более чем с 1000 ГНСС приёмников, расположенных по всему миру

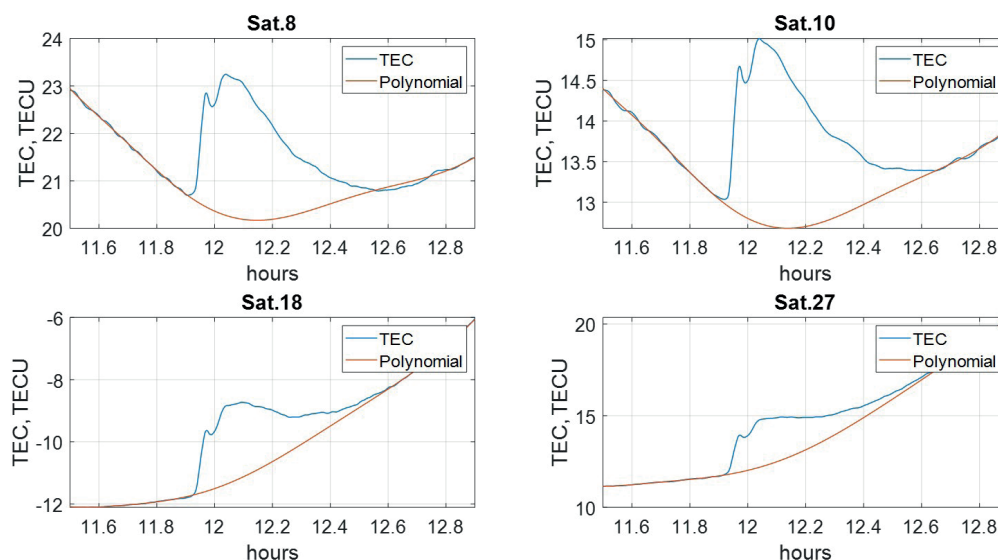


Рис. 2. Вариация наклонного ПЭС во время солнечной вспышки класса X9.3 06.09.2017, полученные в ГФО «Михнево», с полиномиальными трендами

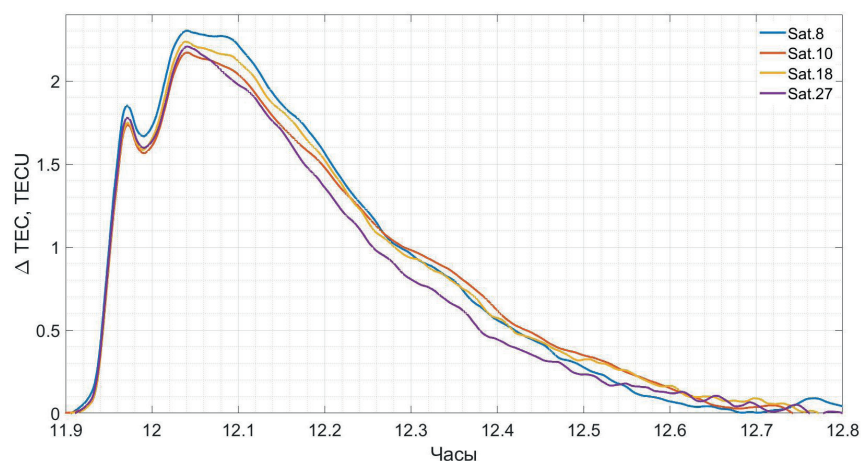


Рис. 3. Динамика вертикального ПЭС над ГФО «Михнево», вызванная солнечной вспышкой X9.3 6 сентября 2017 года

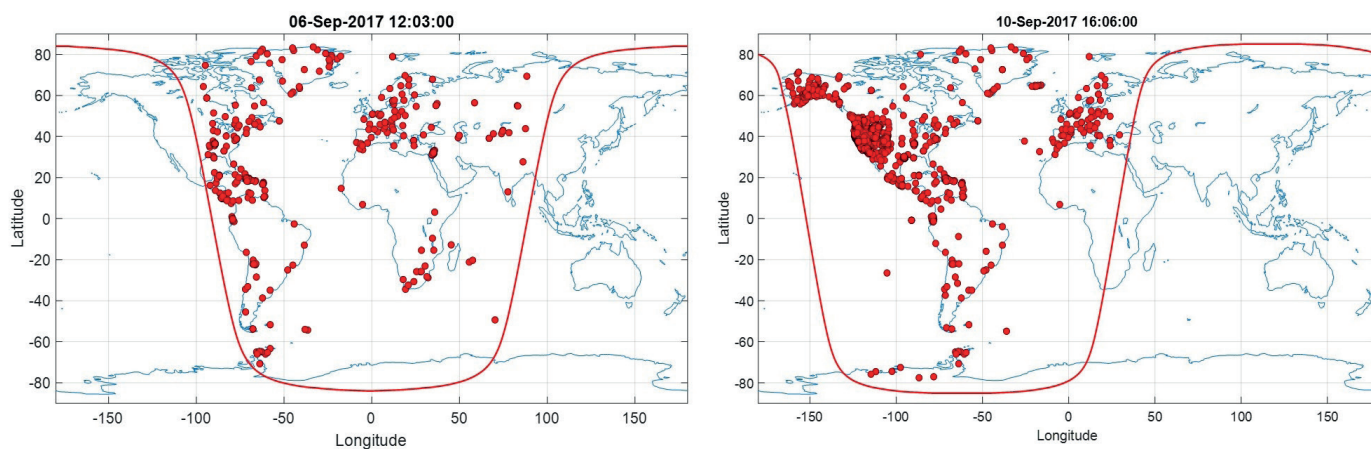


Рис. 4. Схема расположения приемников ГНСС, данные с которых были использованы для оценки динамики ПЭС, вызванной солнечными вспышками

(рис. 4). Для анализа выбирались только те станции, где угол наклонения Солнца составлял больше 15 градусов.

Результаты

Как уже было сказано ранее, 6 и 10 сентября 2017 г. произошли две мощные солнечные вспышки (табл. 1, рис. 5).

Таблица 1.

Солнечные вспышки, исследуемые в ходе работы

Дата	Класс вспышки	Время старта	Время максимума	Время окончания
06.09.2017	X9.3	11:53	12:02	12:10
10.09.2017	X8.2	13:35	16:06	16:31

Обработка данных, полученных в различных измерительных пунктах, в автоматическом режиме

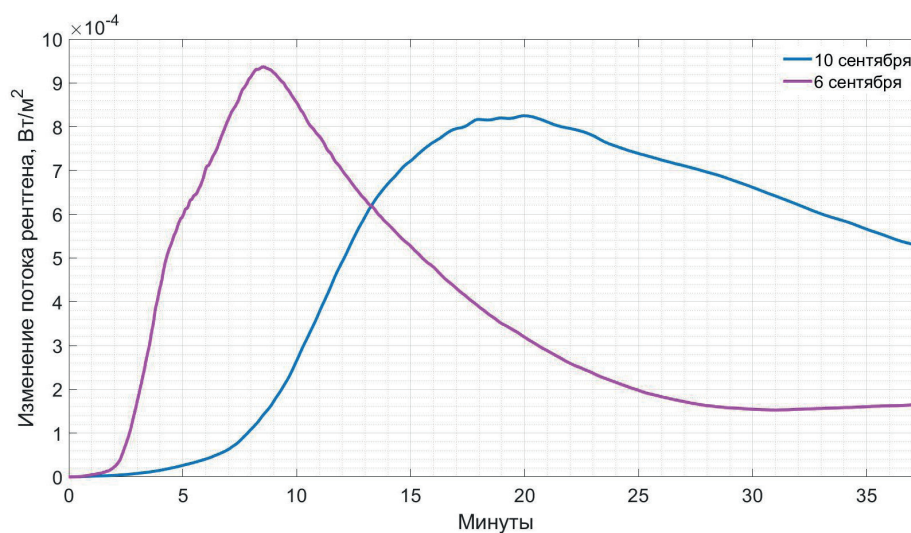


Рис. 5. Поток рентгеновского излучения во время солнечных вспышек 6 и 10 сентября в диапазоне 0.1–0.8 нм (отсчет времени—от начала вспышки)

позволила нам оценить распределение динамики ПЭС ионосферы в максимуме вспышек в зависимости от угла наклонения Солнца (рис. 6). Из графика видно, что изменения ПЭС для вспышек 6 и 10 сентября отличаются примерно в 2 раза, хотя потоки рентгена (диапазон 0.1–0.8 нм) практически идентичны по значению в максимуме (табл. 1).

Таким образом, можно предположить, что основной вклад в динамику ПЭС для этих вспышек оказало излучение в УФ диапазоне. На высотах выше 100 км основным источником ионизации ионосферы является УФ излучение (5–105 нм) [Афраймович, 2006; Stanley C. Solomon, 2005]. С помощью данных, полученных из эмпирической модели FISM2FLARE, мы можем проанализировать зависимость динамики вертикального ПЭС ионосферы от потока УФ излучения для двух солнечных вспышек. На рис. 7 представлены спектры потоков УФ в максимумах вспышек.

Из рис. 7 видно, что именно в диапазоне длин волн 5–40 нм наблюдается различие в спектральной плотности потоков в наиболее сильных линиях для вспышек 6 и 10 сентября примерно в 2 раза. Такая же картина наблюдается при оценке интегрального потока излучения в диапазоне 5–40 нм для этих

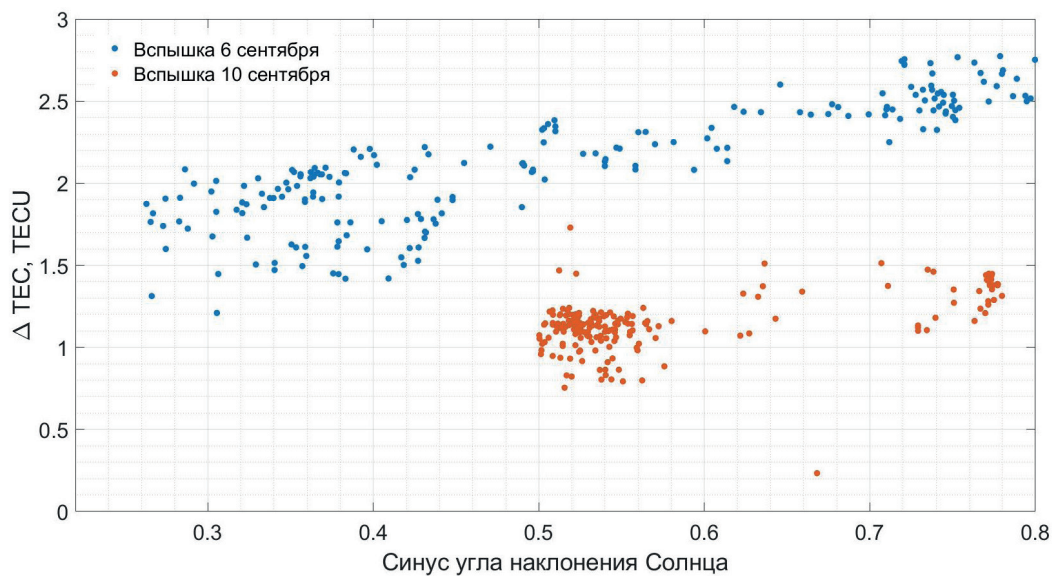


Рис. 6. Зависимость изменения вертикального ПЭС от синуса угла наклона Солнца во время вспышек X класса 6 и 10 сентября

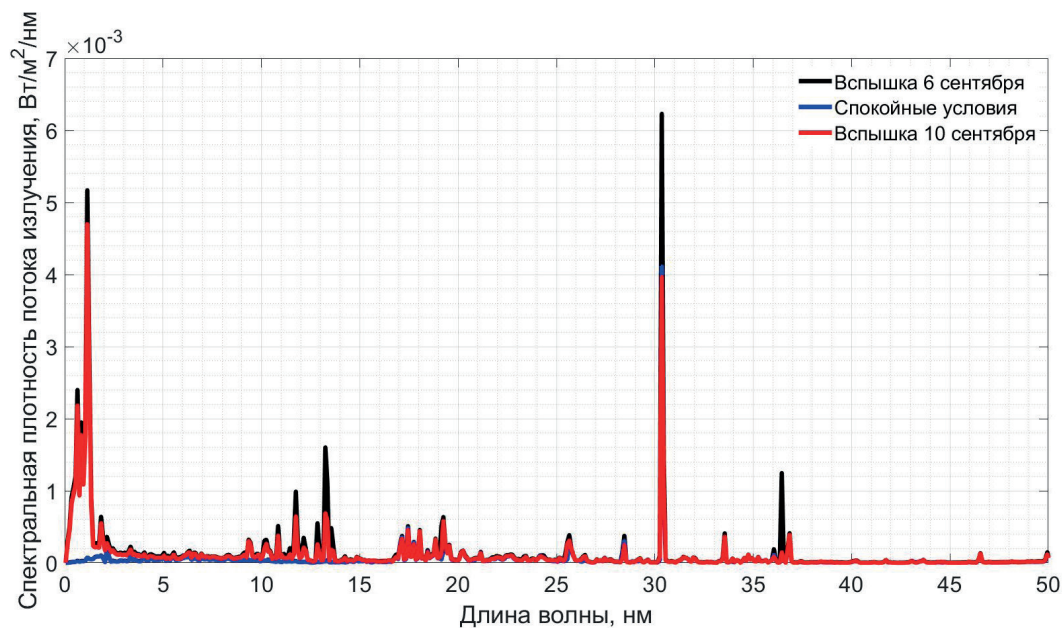


Рис. 7. Спектральный состав потоков УФ излучений в максимумах вспышек 6 (черная кривая) и 10 (красная кривая) сентября 2017 года

вспышек (рис. 8). Таким образом, можно предположить, что разница в динамике ПЭС для этих двух вспышек обусловлена различием в потоках УФ излучения в диапазоне 5–40 нм. Также стоит отметить более длительный фронт (более чем в 2 раза) нарастания потока УФ для вспышки 10 сентября 2017 года.

Большой объем экспериментальных данных позволил нам построить эмпирические зависимости динамики вертикального ПЭС ионосферы от потока УФ излучения в диапазоне от 5 до 40 нм (на фронте вспышек) для 6 и 10 сентября (рис. 9).

Из графика видно, что динамика ПЭС для вспышки 6 сентября в первом приближении линейно зависит от потока УФ излучения. Для вспышки 10 сентября при тех же потоках УФ наблюдается

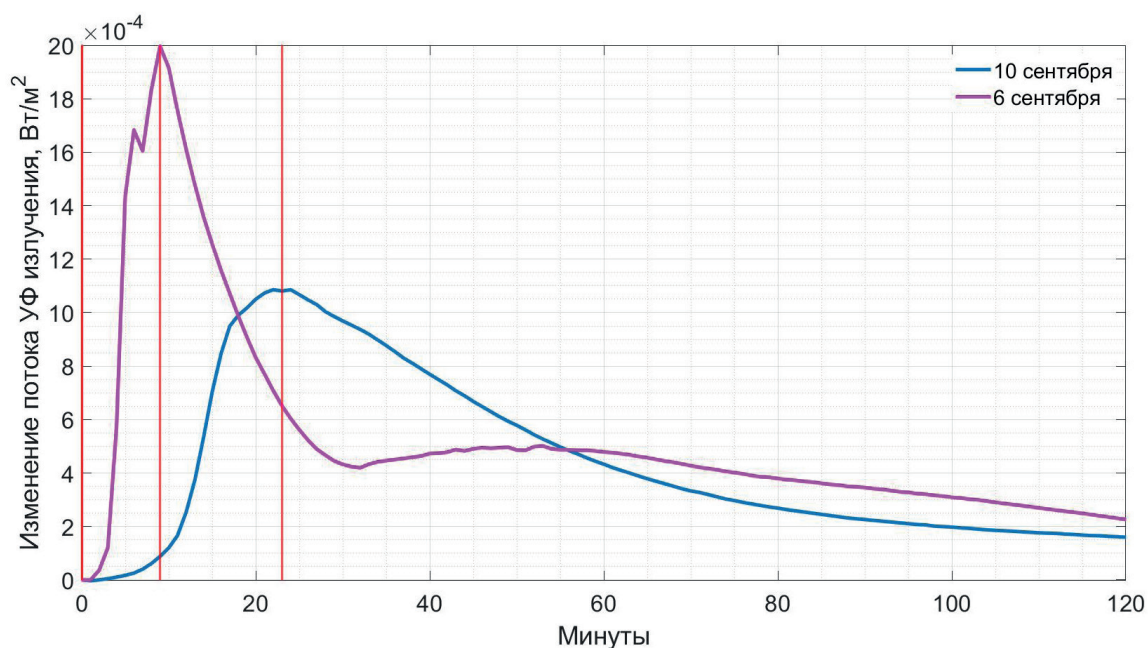


Рис. 8. Поток УФ излучения во время солнечных вспышек 6 и 10 сентября в диапазоне 5–40 нм (отсчет времени—от начала вспышки)

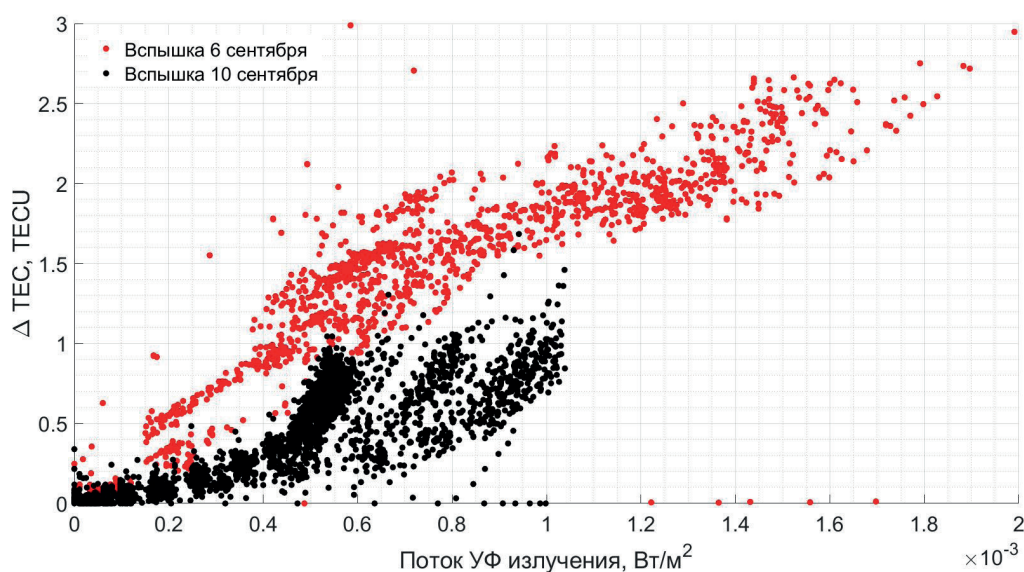


Рис. 9. Зависимости изменения вертикального ПЭС от потока УФ излучения в диапазоне 5–40 нм для вспышек 6 и 10 сентября 2017 года

меньшее приращение ПЭС, что может быть обусловлено более длительным нарастанием фронта и, как следствие, влиянием процессов рекомбинации в верхней ионосфере.

Заключение

Развитие ГНСС позволило существенно продвинуться в вопросах изучения ионосферы Земли, обрабатывать и получать различные данные об ионосфере, которые используются для исследования множества явлений, происходящих в атмосфере.

Большой объем экспериментальных данных и разработанная методика дали возможность оценить

динамику полного электронного содержания ионосферы на освещенной части Земли, а также построить распределения изменения вертикального ПЭС в зависимости от угла наклона Солнца во время вспышек X класса, наблюдаемых 6 и 10 сентября 2017 г. Было обнаружено, что для этих двух вспышек приращения ПЭС (для одинаковых углов наклона Солнца) отличаются примерно в 2 раза, хотя потоки рентгена (диапазон 0.1–0.8 нм) практически идентичны по значению в максимуме.

Комплексный анализ данных с ГНСС приемников, потоков рентгеновского и УФ излучений показал, что основные различия в динамике полного электронного содержания ионосферы для этих двух вспышек были обусловлены потоком электромагнитного излучения в диапазоне 5–40 нм. Была построена эмпирическая зависимость динамики вертикального ПЭС ионосферы от потока излучения 5–40 нм на фронте вспышек для 6 и 10 сентября. Сопоставление результатов для обеих вспышек позволило установить влияние процессов рекомбинации на динамику ПЭС на фронте вспышки.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 122032900175-6).

Список литературы

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS – мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВХВШНЦСО РАМН, 2006. 480 с.

Mitra A. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. Москва. Издательство «МИР». 1977.

Abha Singh, S.S. Rao, V.S. Rathore, Sudesh K. Singh, Singh A.K. Effect of intense solar flares on TEC variation at low-latitude station Varanasi // J. Astrophys. Astr. 2020. 41:19.

Bhuyan P.K., Rashmi Rekha Borah. TEC derived from GPS network in India and comparison with the IRI. Department of Physics, Dibrugarh University, Dibrugarh 786004, Assam, India, (2006).

ChaliIdosa, Kebede Shogile, Effects of solar flares on ionospheric TEC over Iceland before and during the geomagnetic storm of 8 September 2017 // Physics, Jimma University, Jimma, Oromia 378, Ethiopia. 2022.

Ryakhovskii, I.A., Gavrilov, B.G., Poklad, Y.V., Bekker, S., and Ermak, V. The state and dynamics of the ionosphere from synchronous records of ULF/VLF and HF/VHF radio signals at Geophysical Observatory «Mikhnevo» // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2021. 57, p. 718–730.

Sanjay Kumar, Singh A.K. Storm time response of GPS-derived total electron content (TEC) during low solar active period at Indian low latitude station Varanasi // Astrophys Space Sci. 2011. 331:447–458.

Stanley C. Solomon and Liying Qian, Solar extreme-ultraviolet irradiance for general circulation models. High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA (2005).

TEC DYNAMICS DURING X-CLASS SOLAR FLARES

D. A. Taurenis^{1,2*}, N. S. Barabash^{1,3}, I. A. Ryakhovskiy²

¹*Moscow Institute of Physics and Technology (national research institute), Moscow, Russia*

²*Institute of Geosphere Dynamics named after Academician M.A. Sadovsky RAS, Moscow, Russia*

³*Geophysical Center RAS, Moscow, Russia*

**E-mail: taurenis.da@phystech.edu*

The paper presents a comprehensive analysis of the TEC dynamics during X-class solar flares that occurred in September 2017. The increase in the intensity of X-ray and ultraviolet radiation, observed during chromospheric flares on the Sun, causes an immediate increase in the electron density in the entire ionosphere. In this study, we developed a method for estimating the change in the TEC of the ionosphere caused by a burst of solar activity. Based on the results obtained, the wavelength range was determined, which to a greater extent determines the change in the value of the total electron content of the ionosphere during solar flares.

Keywords: Solar flares, TEC, GNSS, ionosphere, x-ray, ultraviolet.