

УДК 550.388

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В СЕНТЯБРЕ 2017 г. И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА ОШИБКИ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2020 г. И. И. Шагимуратов¹, *, И. Е. Захаренкова¹, Н. Ю. Тепеницина¹,
Г. А. Якимова¹, И. И. Ефишов¹

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ЗО ИЗМИРАН), г. Калининград, Россия

*e-mail: shagimuratov@mail.ru

Поступила в редакцию 27.12.2019 г.

После доработки 02.03.2020 г.

Принята к публикации 21.05.2020 г.

Представлен анализ проявления в полном электронном содержании (ПЭС/ТЕС) ионосферы наиболее сильных вспышек класса X9.3 и X8.2, зарегистрированных 6 и 10 сентября 2017 г. соответственно. В качестве исходных данных использовались GPS-наблюдения на среднелинейных станциях, расположенных в условиях освещенной ионосферы. Ионосферный отклик определялся по фазовым измерениям величины ТЕС вдоль спутниковых пролетов над станцией наблюдения. Выявлена высокая линейная корреляция между амплитудой увеличения ТЕС (Δ ТЕС) во время вспышек и зенитным углом Солнца для станций, разнесенных по долготе. Для вспышки класса X9.3 Δ ТЕС превышала 3 ТЕСУ, в то время как для вспышки X8.2 амплитуда была почти в 2 раза меньше. Показано, что это в основном связано с различным положением вспышек на солнечном диске. Пространственно-временная реакция ионосферы на вспышки анализировалась по картам ТЕС, сформированным с временным разрешением 5 мин. Выявлены и оценены ошибки навигационных измерений, которые вызваны эффектами солнечных вспышек.

DOI: 10.31857/S0016794020050132

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение эффектов солнечных вспышек представляет интерес для ионосферных исследований, космической погоды, условий распространения радиоволн, космической навигации [Афраимович и Перевалова, 2006; Ясюкевич и др. 2013; Berdermann et al., 2018; Yamauchi et al., 2018; Yasyukovich et al., 2013, 2018]. Ионосферным эффектам солнечных вспышек посвящено значительное количество работ [Mitra, 1974; Leonovich et al., 2002, 2010; Xiong et al., 2011; Le et al., 2013].

Солнечные вспышки ассоциируются со значительными увеличениями солнечной радиации в большом диапазоне длин волн. Во время солнечных вспышек внезапно увеличиваются жесткое рентгеновское излучение (X-ray), ультрафиолетовое излучение (EUV), которые вызывают увеличение ионизации в земной ионосфере. X-ray излучение глубоко проникает в ионосферу и может вызвать увеличение электронной концентрации в D-области, потоки EUV-излучения увеличивают ионизацию в E- и F-областях ионосферы. Для интенсивной солнечной вспышки 7 сентября

2005 г. средний процент увеличения электронной плотности, вызванный вспышкой, составил более 200% вблизи пика E-области и только 10% в F-области [Xiong et al., 2011]. Наблюдается слабая корреляция между интенсивностью X-ray и EUV-излучениями, которая составляет только 0.66 [Mahajan et al., 2010].

Для анализа эффектов солнечных вспышек широко привлекаются ТЕС-измерения, полученные с помощью навигационных систем GPS/ГЛОНАСС [Afraimovich et al., 2001; Tsurutani et al., 2005; Liu et al., 2006; Leonovich et al., 2010; Zhang and Xiao, 2005; Shagimuratov et al., 2018; Berdermann et al., 2018]. Двухчастотные GPS/ГЛОНАСС-наблюдения обеспечивают ТЕС-измерения с высоким пространственно-временным разрешением. Методы обнаружения и выделения эффекта солнечных вспышек по данным GPS/ГЛОНАСС-измерениям были представлены рядом авторов [Afraimovich, 2000; Liu et al., 2004; Nazarika et al., 2016]. Многочисленная и широко разветвленная сеть GPS/ГЛОНАСС-станций позволяет получить глобальный отклик ТЕС на

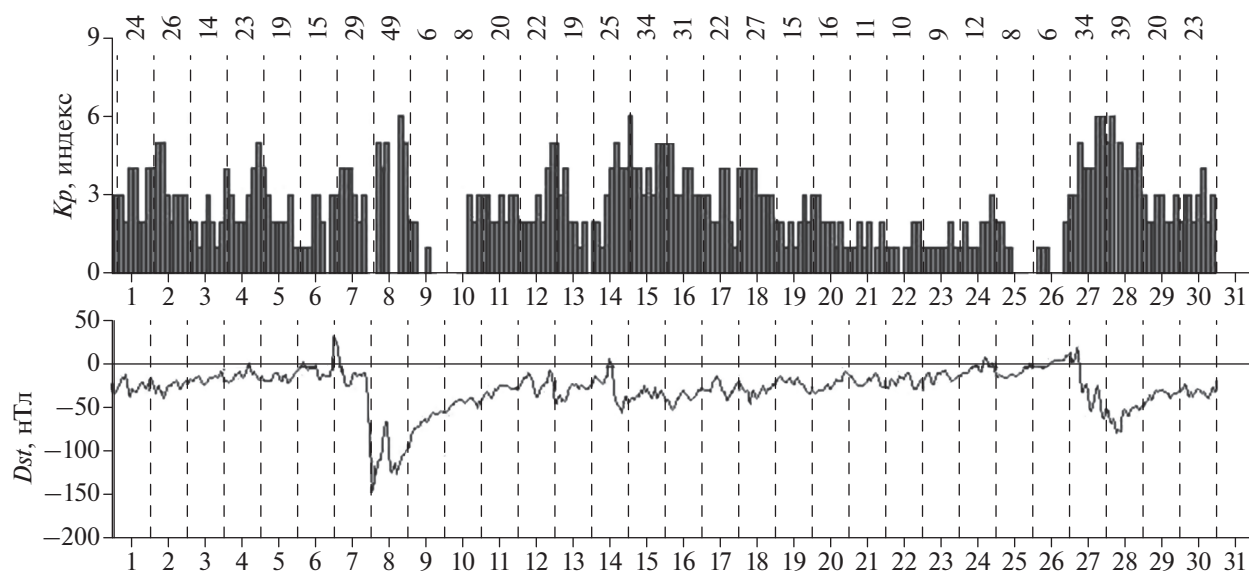


Рис. 1. Вариации Dst - и Kp -индексов для сентября 2017 г.

солнечные вспышки. Отклик ионосферы зависит от зенитного угла Солнца, амплитуда отклика уменьшается с уменьшением зенитного угла Солнца [Krankowski et al., 2003; Garsia-Rigo et al., 2007]. Этот достаточно очевидный результат контрастирует с ранним исследованием [Mendillo et al., 1974], который не обнаружил явную корреляцию амплитуды отклика с зенитным углом Солнца. Амплитуда отклика ТЕС существенно зависит от положения вспышки на диске Солнца — амплитуда отклика зависит от расстояния вспышки до центрального солнечного расстояния (Central Meridian Distance — CMD). Максимальная амплитуда регистрируется, когда вспышка приходится на центральный меридиан Солнца ($CMD = 0^\circ$) [Leonovich et al., 2002; Le et al., 2013].

С повышением требований к точности GPS/ГЛОНАСС навигационных измерений проявляется интерес к вопросу оценки влияния солнечных вспышек на точность позиционирования. В настоящее время разработан метод и алгоритмы определения координат потребителя с точностью до сантиметров по измерениям одного приемника, не привлекая измерения опорных станций. Метод получил название Precise Point Positioning (PPP) [Zumberge et al., 1997; Kouba and Héroux, 2001]. В последние годы метод получил дальнейшее развитие.

Анализ показал, что ионосферные эффекты различаются от вспышки к вспышке. В частности, даже вопрос степени корреляции абсолютной величины отклика с зенитным углом Солнца требует своего уточнения. Актуальными становятся исследования, касающиеся оценки влияния солнечных вспышек на точность навига-

онных измерений. Особый интерес представляет реакция среднеширотной ионосферы северного полушария, так как в данной зоне находится наибольшее количество станций и пользователей в Европейском и Американском секторах. В данной работе проведен анализ эффекта солнечных вспышек на вариации ТЕС и на абсолютные ошибки точности позиционирования по данным GPS/ГЛОНАСС. Представлены результаты анализа сентябрьских событий 2017 г. Упор сделан на анализ самой сильной вспышки (X9.3) 6 сентября 2017 г. Проведен детальный анализ влияния вспышек на ошибки определения координат для репрезентативных GPS-станций.

2. ГЕОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Геомагнитная обстановка 6 сентября 2017 г. (рис. 1) была спокойная, индекс Kp не превышал величины 3, индекс Dst не превышал -22 нТл. Геомагнитная буря стартовала 7 сентября, активная фаза приходилась на 8 сентября. Максимальная величина Dst составляла -120 нТл. Солнечная вспышка 10 сентября была зарегистрирована на восстановительной фазе бури.

3. ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Основные параметры вспышек даны в табл. 1. Временное развитие интенсивности вспышек 6 и 10 сентября 2017 г. в диапазоне длин волн $0.1-50$ нм (X-ray), измеренные спутником GOES-13 (<http://satdat.ngdc.noaa.gov>), представлены на рис. 2.

Таблица 1. Параметры солнечных вспышек

№	Класс вспышки	Дата	Начало, UT	Максимум, UT	Окончание, UT	CMD, град
1	X9.3	06.09.2017	11:53	12:02	12:10	42° В
2	X8.2	10.09.2017	15:35	16:06	16:31	91° В

4. МЕТОД

Данные о вариациях полного электронного содержания ионосферы (TEC) получены на основе методики, представленной в работе Шагимуратов и др. [2016]. Абсолютные величины TEC определялись по высокоточным фазовым GPS-измерениям. Для разрешения фазовой неоднозначности для каждого спутника использовались измерения всех пролетов спутников над станцией наблюдения на суточном интервале. Ошибка определения абсолютного значения TEC оценивается величиной 0.1–0.2 TECU (1 TECU = 10¹⁶ эл м⁻²). Отклик TEC на вспышку определялся по измерениям вертикального TEC вдоль пролета спутника. Амплитуда отклика определялась как разность между значением TEC до вспышки и пиком в единицах TECU (рис. 3).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Проявление вспышки в вариациях TEC вдоль пролета спутника

Эффекты солнечных вспышек в измерениях TEC вдоль пролета спутника явно проявляются на станциях, расположенных в условиях освещенной области ионосферы. Особенно хорошо вспышка проявляется в производной – изменение TEC на 1-минутном интервале (ΔTEC). На рисунке 4, в качестве примера, показан отклик TEC и величина ΔTEC на вспышку для отдельных спутниковых пролетов над станциями, расположенными на разных долготах.

Для сравнения здесь показаны пролеты для вспышек 6 (класс X9.3) и 10 (класс X8.2) сентября 2017 г. Вспышка 6 сентября 2017 г. (далее вспышка № 1) по продолжительности составляла ~20 мин, в то время как вспышка 10 сентября (далее вспышка № 2) длилась почти один час. Это различие проявляется в скорости длительности изменения полного электронного содержания ΔTEC.

Репрезентативные станции подобраны с примерно одинаковыми зенитными углами для обеих вспышек. Задержка максимума отклика TEC относительно максимума вспышки составила ~1 мин для вспышки № 1 и 2–2.5 мин для вспышки № 2.

Амплитуды откликов TEC на вспышки (ΔTEC) даны в табл. 2.

Амплитуды откликов для обеих вспышек различаются более чем в два раза.

5.2. Зависимость отклика TEC от зенитного угла Солнца

Как известно, ионизация ионосферы определяется солнечной радиацией. Солнечная вспышка сопровождается увеличением солнечной радиации в широком диапазоне длин волн. Излучение, вызванное вспышкой, создает дополнительную ионизацию, что хорошо проявляется в увеличении TEC во время вспышки. В целом отклик TEC увеличивается с уменьшением зенитного угла. В то же время результаты анализа зависимости отклика TEC от зенитного угла Солнца носят разноречивый характер.

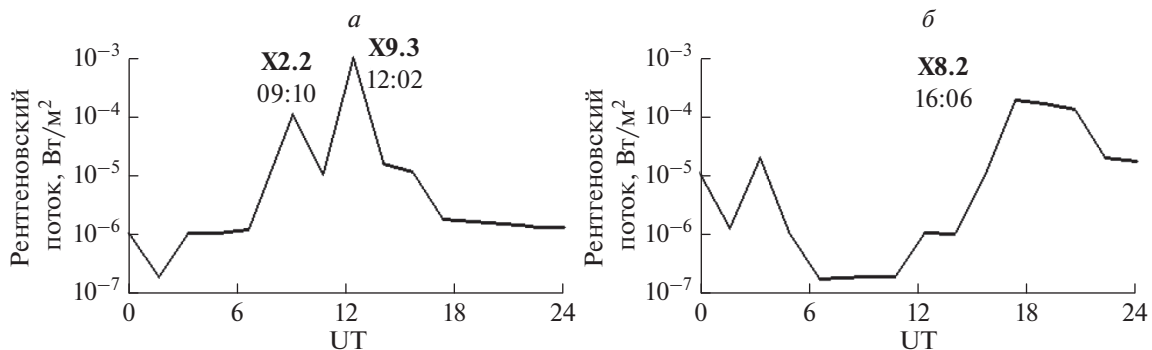


Рис. 2. Вариации рентгеновского излучения для 6 и 10 сентября 2017 г. Здесь показаны класс вспышки и момент (UT) максимума излучения.

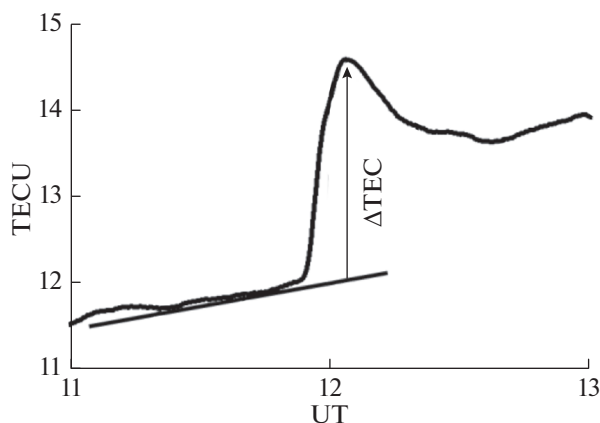


Рис. 3. Определение амплитуды отклика ТЕС на вспышку по измерениям ТЕС вдоль пролета спутника.

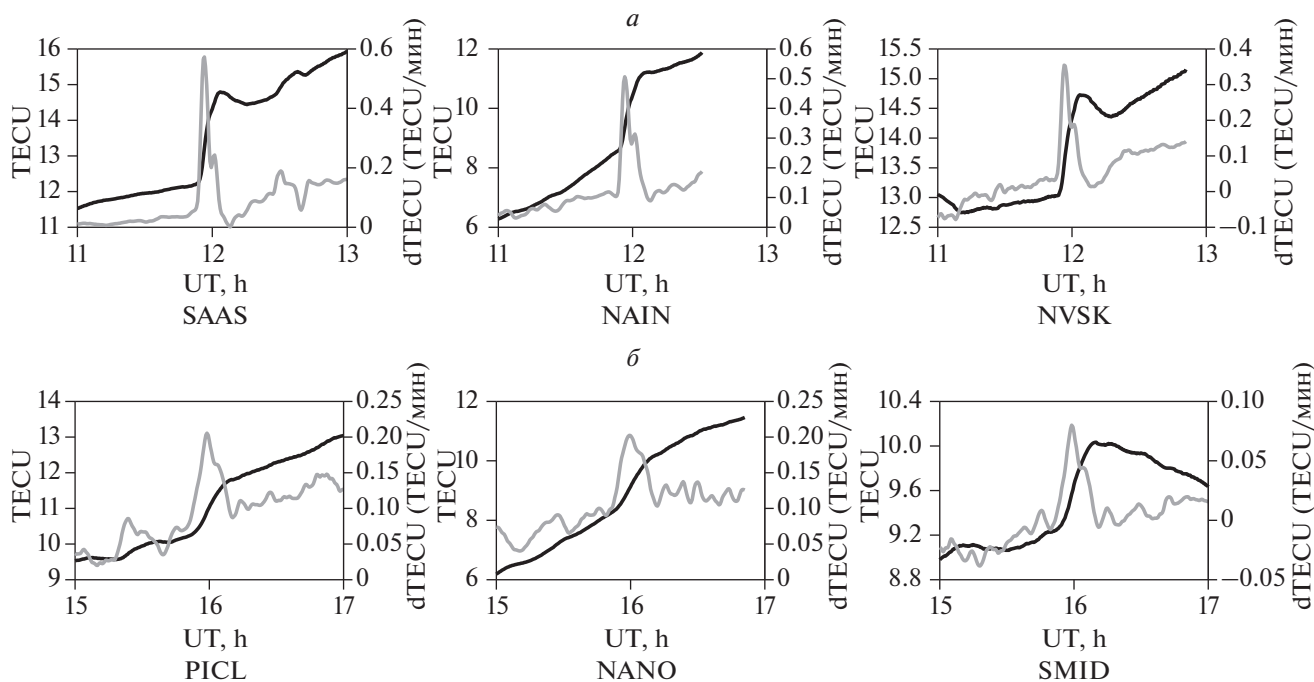


Рис. 4. Вариации ТЕС для отдельных спутниковых пролетов на станциях SAAS (54.3° N, 13.6° E), NAIN (56.3° N, 61.7° W), NVSK (54.6° N, 83.2° E), PICL (51.3° N, 90.2° W), NANO (49.1° N, 124.1° W), SMID (55.5° N, 9.6° E), для вспышки X9.3 (а), и вспышки X8.2 (б).

Как показано в работе [Lui et al., 2004], для вспышки 14 июля 2000 г. в зависимости Δ ТЕС от зенитного угла регистрируется большой разброс (рассеяние) измерений, говорить о корреляции между двумя величинами здесь не приходится. Возможно, это обусловлено тем, что при получении данной зависимости привлекались измерения с различных широт. Mendillo et al. [1974] также не обнаружили явную корреляцию амплитуды отклика с зенитным углом Солнца.

Для получения детальной картины зависимости отклика ТЕС от зенитного угла мы отобрали наиболее репрезентативные GPS-станции (рис. 5), которые находились в достаточно узком диапазоне широт, что позволило исключить возможные вариации амплитуды отклика абсолютной величины ТЕС в зависимости от широты. Стоит отметить, что для вспышки № 1 сентября можно было выбрать больше станций, которые размещались на материках, чем для вспышки № 2.

Таблица 2. Амплитуды откликов TEC на вспышки (ΔTEC) и параметры положения вспышки

Станция	SASS	NAIN	NVSK	Станция	PICL	NANO	SMID
№ спутника	27	7	27	№ спутника	17	19	3
Зенитный угол	48°	68°	76°	Зенитный угол	51°	66°	76°
ΔTEC , (TECU)	2.48	2.09	1.61	ΔTEC , (TECU)	1.15	0.92	0.64
Вспышка 6 сентября 2017 г. (CMD = 42°)				Вспышка 10 сентября 2017 г. (CMD = 91°)			

Для обеих вспышек явно просматривается линейная зависимость отклика от зенитного угла Солнца (χ). Уравнение регрессии для обеих вспышек описывается следующим соотношением:

$$\Delta\text{TEC} = -0.041\chi + 4.61, \quad R = 0.93,$$

$$\Delta\text{TEC} = -0.024\chi + 2.64, \quad R = 0.92.$$

Была выявлена высокая линейная корреляция (R) между двумя величинами. Это свидетельствует о том, что на средних широтах в условиях равенства определяющим фактором реакции ионосферы на вспышку является зенитный угол Солнца в местоположении, где регистрируется вспышка. Наблюдаемая нами высокая линейная корреляция зависимости отклика TEC от зенит-

ного угла (рис. 6) для представленных вспышек несколько расходится с результатами работы [Mendillo et al., 1974]. В работе [Ruzhin et al., 2004] для вспышки 28 октября 2003 г. (класса X17) обнаружена TEC-аномалия на зенитных углах 60°–70°. Подобная аномалия может привести к ухудшению корреляции, которая выявлена Mendillo.

Амплитуда отклика ионосферы на вспышку 10 сентября оказалась почти в 2 раза меньше, чем для вспышки 6 сентября. Хотя интенсивность ультрафиолетового излучения 10 сентября почти в 2 раза больше, чем для вспышки 6 сентября (рис. 7).

Это обстоятельство обусловлено тем, что амплитуда отклика TEC существенно зависит от

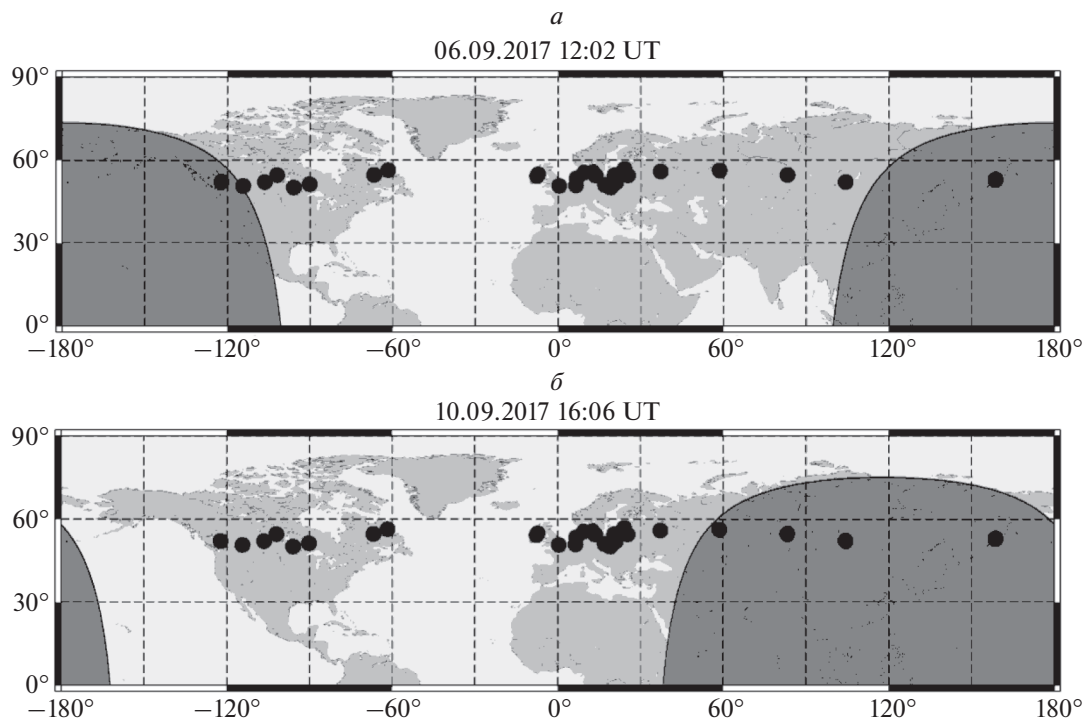


Рис. 5. Карты расположения репрезентативных наземных станций, GPS-данные которых были использованы для анализа вспышек 6 (а) и 10 (б) сентября. Затемненная область показывает положение утреннего и вечернего терминатора и ночной зоны.

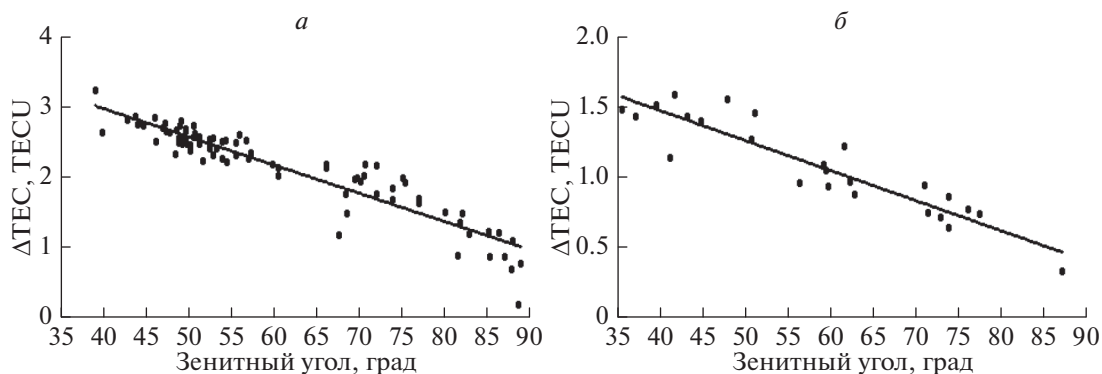


Рис. 6. Зависимость ΔTEC от зенитного угла для вспышки 6 сентября (а) и 10 сентября (б) 2017 г.

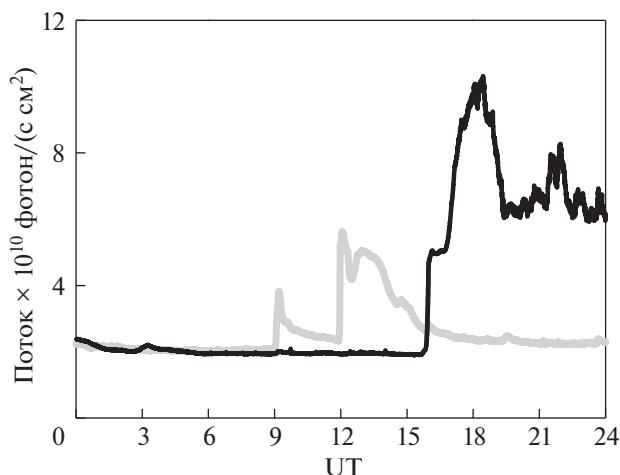


Рис. 7. Интенсивность EUV для вспышки 6 сентября (серая кривая) и 10 сентября (черная).

расстояния вспышки до центрального солнечного расстояния (CMD) и ее максимум регистрируется, когда вспышка приходится на центральный меридиан Солнца. Величина CMD для вспышки 6 сентября составляла 42° и 92° для 10 сентября 2017 г. (рис. 8).

5.3. Пространственно-временная динамика реакции TЕС на вспышку

Для получения пространственно-временного поведения полного электронного содержания во время вспышки нами были построены карты TЕС с высоким разрешением над Европой. Карты формировались для интенсивной вспышки 6 сентября. Использовался алгоритм построения карт, обеспечивающий пространственное разрешение 1° и временное разрешение 5 мин [Шагимуратов и др., 2013]. При построении карт использовались одновременные GPS-наблюдения 130–150 европейских станций. На рисунке 9 представлены карты TЕС для 5 и 6 сентября и разностные карты между 6 и 5 сентября, для времени до и после

вспышки. Во время вспышки 6 сентября в районе 12–13 UT наблюдается явное повышение величины полного электронного содержания. Величина TЕС растет к южным широтам. В целом дневная величина TЕС 6 сентября была несколько выше, чем 5 сентября. Разностные карты также показывают, что полное электронное содержание после 12 UT для дня вспышки было выше по сравнению с условиями 5 сентября, когда Солнце было спокойным. Максимальная величина разности наблюдается на долготах 15° – 25° E, на которые приходятся минимальные зенитные углы. Разностные карты показывают динамику отклика TЕС на вспышку. Из характера поведения разности TЕС можно предположить, что превышение TЕС, обусловленное вспышкой, продолжалось до 12:35–12:45 UT.

5.4. Оценка ошибок позиционирования во время вспышек

В последнее время повышаются требования к точности навигационных GPS/ГЛОНАСС изме-

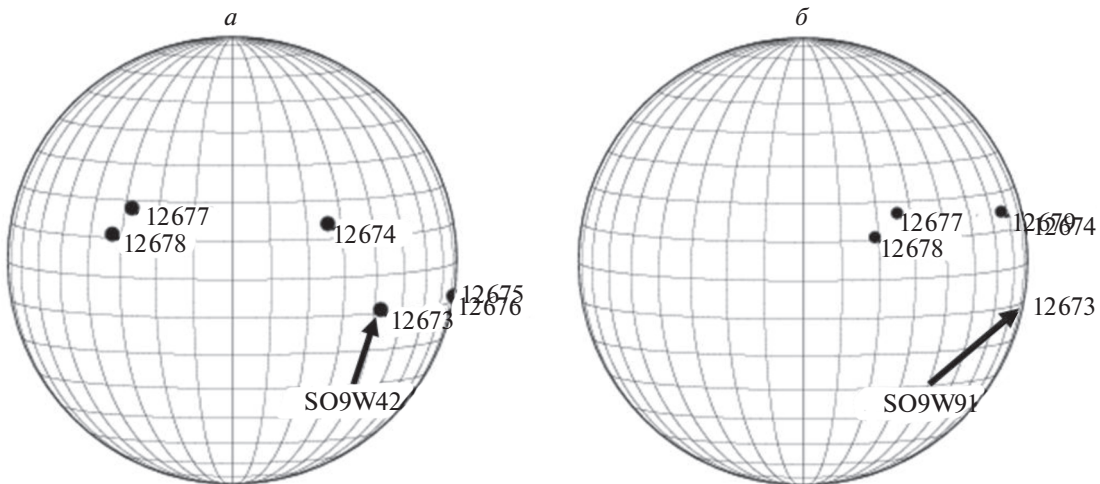


Рис. 8. Положение вспышек на солнечном диске для 6 сентября (а) и 10 сентября (б) 2017 г.

рений. Известно, что ионосфера является основным фактором, негативно влияющим на точность космической и спутниковой навигации, особенно это касается различного рода ионосферных возмущений. К таким факторам естественно относятся и солнечные вспышки. Упомянутый выше метод определения координат потребителя по измерениям одного приемника Precise Point Positioning (PPP) [Zumberge et al., 1997; Kouba and Héroux, 2001] в последние годы получил дальнейшее развитие и использован нами.

Мы проанализировали связь между интенсивностями TEC-флуктуаций и PPP-ошибками, используя программу GIPSY, разработанную NASA Jet Propulsion Laboratory (<http://apps.gdgps.net>). Для этих целей определялись 3D ошибки (P_{3D}) как детрендрованные координаты от средних значений (x_0, y_0, z_0) на каждую эпоху [Jacobsen and Andalsvik, 2016]. Ошибки 3D определялись с интервалом 30 с.

$$P_{3D}(i) = \sqrt{(x(i) - x_0)^2 + (y(i) - y_0)^2 + (z(i) - z_0)^2},$$

где x_0, y_0, z_0 – осредненные координаты точки наблюдения.

Алгоритм PPP апробирован на GPS-наблюдениях высокоширотных станций во время авроральных возмущений. Во время этих событий проявляются интенсивные флуктуации GPS/ГЛОНАСС-сигналов, что приводит к значительному увеличению ошибок позиционирования. В частности 3D ошибка позиционирования достигала более 10 м, что превышает на 1–2 порядка номинальные значения, соответствующие спокойным условиям.

Высокая корреляция между ошибками позиционирования и ROTI-индексом интенсивности TEC флуктуаций [Pi et al., 1997] была обнаружена в работах [Jacobsen and Dahnn, 2014; Jacobsen and Andalsvik, 2016]. Индекс ROTI широко используется для оценки интенсивности ионосферных неоднородностей и плазменных градиентов, влияющих на фазовые измерения навигационных сигналов. Было выявлено, что ошибки позиционирования увеличиваются экспоненциально с ростом ROTI [Shagimuratov et al., 2018].

На рисунке 10 показаны, в качестве примера, 3D ошибка и индекс ROTI по станциям KLG1(54.5° N, 20.5° E), JOSE (51.9° N, 21.0° E), SASS (54.3° N, 13.6° E). Для индекса ROTI точками показаны значения всех пролетов спутников над станцией наблюдения на каждую 30-секундную эпоху. Абсолютные ошибки позиционирования, полученные по двухчастотным GPS измерениям, составляют не более 10 см. Ошибки, обусловленные вспышкой класса X9.3, увеличиваются в 2–10 раз, по сравнению со средним значением на рассматриваемом временном интервале.

Детальный анализ показал, что величина ошибок зависит от многих факторов и различается для индивидуальных станций. В частности, данная величина напрямую зависит от интенсивности флуктуаций и в большей мере от числа наблюдаемых спутников, которые одновременно подтверждены флуктуациям на трассе спутник–приемник.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено детальное исследование реакции среднеширотной ионосферы на солнечные вспышки 6 сентября (X9.3) и 10 сентября (X8.2) 2017 г. Отклик (Δ ТЕС) на вспышку определялся по ТЕС-измерениям вдоль каждого индивидуаль-

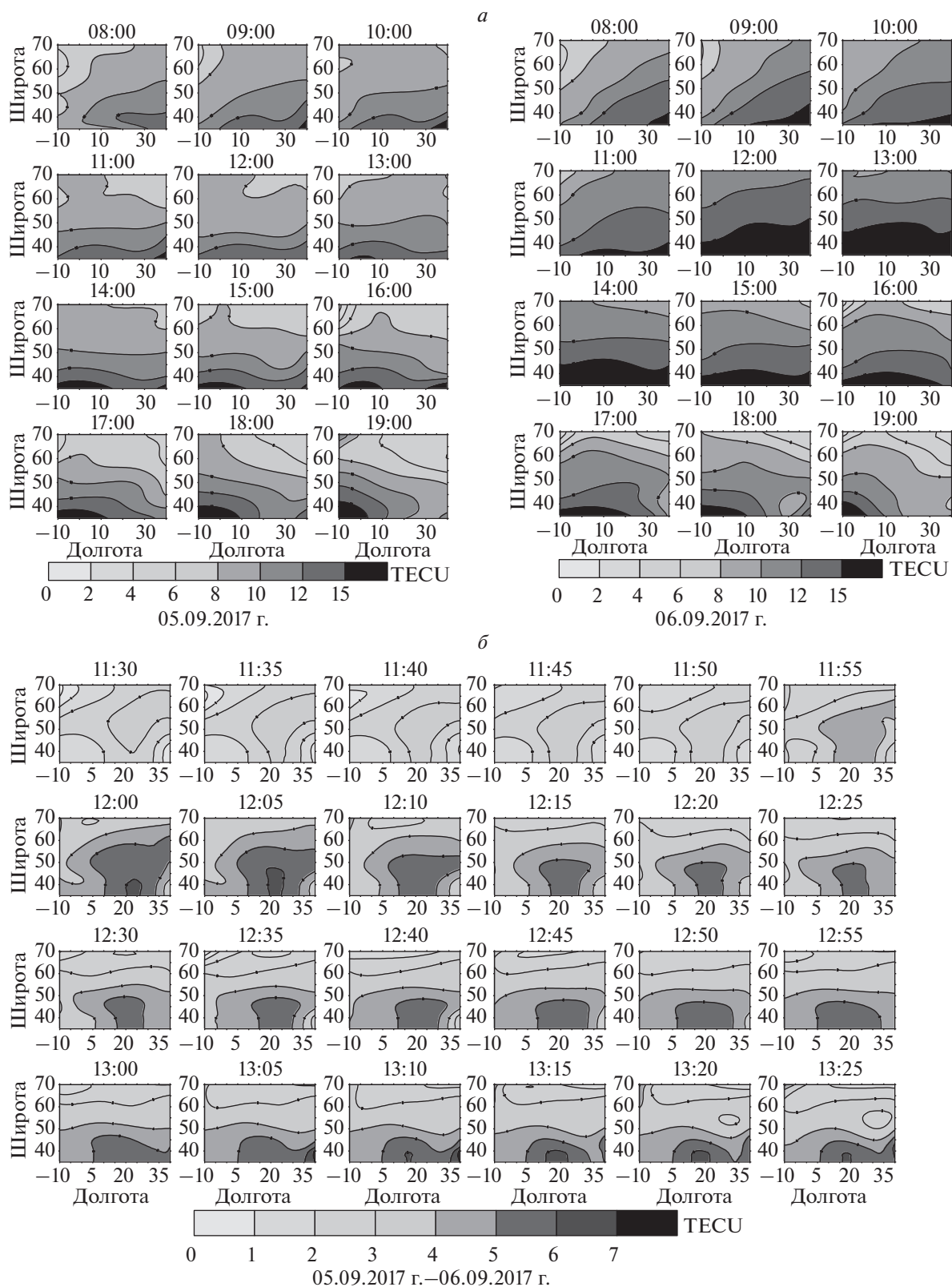


Рис. 9. Карты ТЕС для дня до вспышки и в день вспышки (а), разностные карты (б) между 5 и 6 сентября 2017 г.

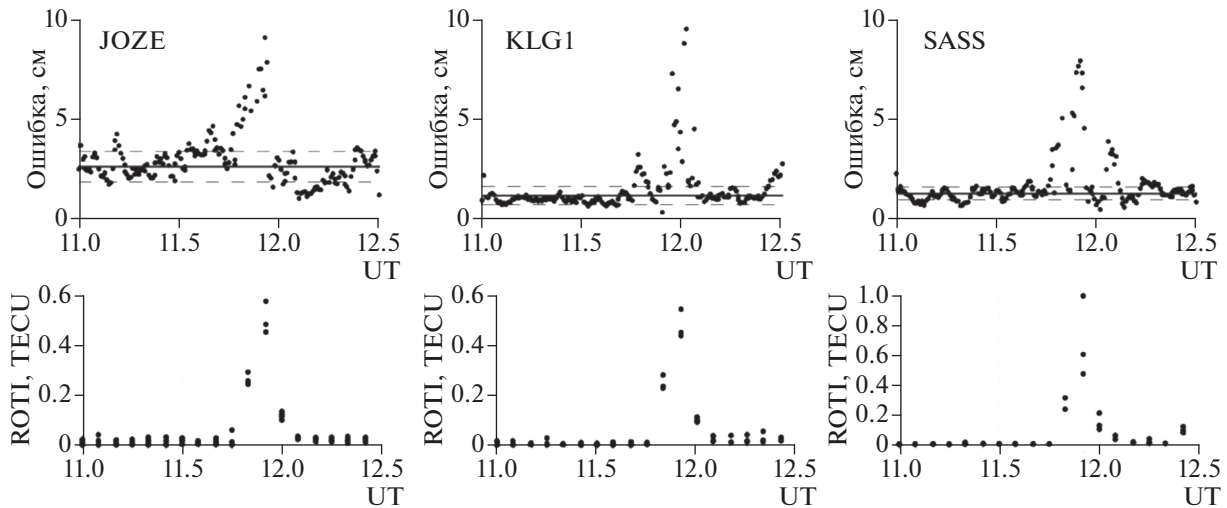


Рис. 10. Вариации ошибок позиционирования и индекса ROTI на отдельных станциях.

ного спутникового пролета. Выявлена высокая линейная корреляция между амплитудой отклика ТЕС (Δ ТЕС) и зенитным углом Солнца для наиболее репрезентативных среднеширотных GPS-станций. Амплитуда отклика для вспышки X9.3 оказалась в 2 раза больше по сравнению со вспышкой класса X8.2. В то время как амплитуда ультрафиолетового излучения, ответственного за ионизацию F области, для вспышки X8.2 была почти в 2 раза больше по сравнению со вспышкой X9.3 (рис. 7). Анализ показал, что это обусловлено различием в положении вспышек на солнечном диске. Вспышка X9.3 располагалась ближе к центральному меридиану ($\text{CMD} = 42^\circ$), а вспышка X8.2 располагалась на краю диска ($\text{CMD} = 91^\circ$).

Пространственно-временная динамика проявления вспышки X9.3 в полном электронном содержании получена по картам ТЕС, которые формировались для европейского региона. На картах в день вспышки 6 сентября хорошо проявляется повышение ионизации по сравнению с предыдущим спокойным днем. Для анализа динамики проявления вспышки формировались разностные карты ТЕС между 6 и 5 сентября с пятиминутным интервалом. Разностные карты демонстрируют превышение ТЕС 6 сентября в окрестности 12–13 UT, а также высокую динамику отклика ТЕС на вспышку.

Получены оценки ошибок 3D позиционирования, обусловленные эффектами вспышки для двухчастотных GPS-приемников. На отдельных станциях ошибки достигают 10 см, что на 1–2 порядка превышает величину ошибок до вспышки.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-05-00570-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Институт солнечно-земной физики СО РАН: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 479 с. 2006.
- Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А., Тепеницына Н.Ю., Ефишов И.И. Интернет-сервис по созданию GPS/ГЛОНАСС карт полного электронного содержания ионосферы для Европейского региона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 1. С. 197–209. 2016.
- Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А. Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы // Хим. физика. Т. 32. № 9. С. 81–88. 2013.
- Ясюкевич Ю.В., Воейков С.В., Живетьев И.В., Косогооров Е.А. Отклик ионосферы на солнечные вспышки C и M классов в январе – феврале 2010 г. // Космич. иссл. Т. 51. № 2. С. 125–135. 2013.
- Afraimovich E.L. GPS global detection of the ionospheric response to solar flares // Radio Sci. V. 35. P. 1417–1424. 2000.
- Afraimovich E.L., Altynev A.T., Kosogorov E.A., Larina N.S., Leonovich L.A. Ionospheric effects of the solar flares of September 23, 1998 and July 29, 1999 as deduced from global GPS network data // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 63. № 17. P. 1841–1849. 2001.
- Berdermann J., Kriegel M., Banys D. et al. Ionospheric response to the X9.3 Flare on 6 September 2017 and its implication for navigation services over Europe // Space Weath-

- er. V. 16. № 10. P. 1604–1615. 2018.
<https://doi.org/10.1029/2018SW001933>
- *Garcia-Rigo A., Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J.* Solar flare detection system based on global positioning system data: First results // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 889–895. 2007.
- *Hazarika R., Bitap R.K., Pradip K.B.* Ionospheric response to X-class solar flares in the ascending half of the subdued solar cycle 24 // *J. Earth Syst. Sci.* V. 125. № 6. P. 1235–1244. 2016.
<https://doi.org/10.1007/s12040-016-0726-6>
- *Jacobsen K.S., Dähnn M.* Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes // *J. Space Weather Spac.* V. 4. № 27. 2014.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2014024>
- *Jacobsen K.S., Andalsvik Y.L.* Overview of the 2015 St. Patrick's day storm and its consequences for RTK and PPP positioning in Norway // *J. Space Weather Spac.* V. 6. № 9. 2016.
<https://doi.org/10.1051/swsc/2016004>
- *Kouba J., Héroux P.* Precise point positioning using IGS orbit and clock products // *GPS Solutions.* V. 5. № 2. P. 12–28. 2001.
<https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- *Krankowski A., Shagimuratov I.I., Baran L.W., Ruzhin Ya., Tepenitsyn N.Ya.* Response of the ionosphere to the great solar flare on October 28, 2003 // Poster in: European Geosciences Union, General Assembly. 2003.
- *Le H., Liu L., Chen Y., Wan W.* Statistical analysis of ionospheric responses to solar flares in the solar cycle 23 // *J. Geophys. Res.* – Space. V. 118. № 1. P. 576–582. 2013.
- *Leonovich L.A., Afraimovich E.L., Romanova E.B., Tashchilin A.V.* Estimating the contribution from different ionospheric regions to the TEC response to the solar flares using data from the international GPS network // *Ann. Geophysicae.* V. 20. № 12. P. 1935–1941. 2002.
- *Leonovich L.A., Tashchilin A.V., Portnyagina O.Yu.* Dependence of the ionospheric response on the solar flare parameters based on the theoretical modeling and GPS data // *Geomagn. Aeronomy.* V. 50. № 2. P. 201–210. 2010.
- *Liu J.Y., Lin C.H., Tsai H.F., Liou Y.A.* Ionospheric solar flare effects monitored by the ground-based GPS receivers: Theory and observation // *J. Geophys. Res.* V. 109. № A 01307. 2004.
<https://doi.org/10.1029/2003JA009931>
- *Liu J.Y., Lin C.H., Chen Y.I., Lin Y.C. et al.* Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content // *J. Geophys. Res.* V. 111. № A5. A05308. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005JA011306>
- *Mahajan K.K., Lodhi N. K., Upadhayaya A.K.* Observations of X-ray and EUV fluxes during X-class solar flares and response of upper ionosphere // *J. Geophys. Res.* V. 115. № A12. A12330. 2010.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015576>
- *Mendillo M., Klobuchar J.A., Fritz R.B., da Rosa A.V., Kersley L., Yeh K.C. et al.* Behavior of the ionospheric F region during the great solar flare of August 7, 1972 // *J. Geophys. Res.* V. 79. P. 665–672. 1974.
<https://doi.org/10.1029/JA079i004p00665>
- *Mitra A.P.* Ionospheric effects of solar flares. Norwell, MA: D. Reidel. 1974.
- *Pi X., Mannucci A. J., Lindqwister U.J., Ho C.M.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophys. Res. Lett.* V. 24. № 18. P. 2283–2286. 1997.
<https://doi.org/10.1029/97GL02273>
- *Ruzhin Yu., Sinelnikov V., Shagimuratov I., Kanonidi Kh.* Solar flare injection as analog of active experiment in an ionosphere // 35th COSPAR Scientific Assembly. Held 18–25 July 2004, Paris, France. P. 2667. 2004.
- *Shagimuratov I.I., Yakimova G.A., Tepenitsyna N.Yu., Koltunen L.M., Efshov I.I.* The Effect of the Solar Flare on September 2017 // Atmosphere, Ionosphere, Safety. Proceedings of VI international conference. Part 2. Kaliningrad. P. 119–123. 2018.
- *Tsurutani B.T., Judge D.L., Guarnieri F.L. et al.* The October 28, 2003 extreme EUV solar flare and resultant extreme ionospheric effects: Comparison to other Halloween events and the Bastille Day event // *Geophys. Res. Lett.* V. 32. № 3. L03S09. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004GL021475>
- *Xiong B., Wan W., Liu L. et al.* Ionospheric response to the X-class solar flare on 7 September 2005 // *J. Geophys. Res.* V. 116. № A11. A11317. 2011.
<https://doi.org/10.1029/2011JAA016961>
- *Yamauchi M., Sergienko T., Enell C.-F. et al.* Ionospheric response observed by EISCAT during the 6–8 September 2017 space weather event: Overview // *Space Weather.* V. 16. № 9. P. 1437–1450. 2018.
- *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.* V. 16. № 8. P. 1013–1027. 2018.
- *Yasyukevich Y.V., Voeykov S.V., Zhivetiev I.V., Kosogorov E.A.* Ionospheric response to solar flares of C and M classes in January–February 2010 // *Cosmic Research.* V. 51. № 2. P. 114–123. 2013.
- *Zhang D.H., Xiao Z.* Study of ionospheric response to the 4B flare on 28 October 2003 using International GPS Service network data // *J. Geophys. Res.* V. 110. № A3. A03307. 2005.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010738>
- *Zumberge J., Heflin M., Jefferson D., Watkins M., Webb F.* Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // *J. Geophys. Res.* V. 102(B3). P. 5005–5017. 1997.