

Влияние солнечных вспышек на ионосферу Земли в 24-ом цикле солнечной активностиС. В. Сыроватский^{1,2,*}, Ю. В. Ясюкевич^{1,2,†}, А. М. Веснин², И. К. Едемский², С. В. Воейков², И. В. Живетьев^{2,3}¹*Иркутский государственный университет,
физический факультет,
кафедра радиофизики и радиоэлектроники**Россия, 664003, Иркутск, бул. Гагарина, д. 20*²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Россия, Россия, 664003, ул. Лермонтова, д. 126-а*³*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
Россия, 684034, пос. Паратунка, ул. Мирная, д. 7*

(Статья поступила 14.05.2018; Подписана в печать 02.07.2018)

В работе проведено исследование ионосферных эффектов по данным глобальных навигационных спутниковых систем ряда солнечных вспышек различных классов мощности (X-, M-, C-класс) в период с 2014 по 2017 гг. Наши результаты демонстрируют, что алгоритм усреднения производной вариаций полного электронного содержания по всем станциям на освещенной стороне Земли точно может идентифицировать наличие вспышек X-класса и с достаточной для практики точностью наличие вспышек M-класса в автоматическом режиме (ошибка «пропуска сигнала» составляет примерно 2.76%). Так же показано, что в отдельных случаях варибельность ионосферного отклика является следствием отличия динамики солнечного излучения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах.

PACS: 94.20.-y. УДК: 537.86.

Ключевые слова: ионосфера, солнечные вспышки, полное электронное содержание.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные вспышки являются одним из самых значимых событий, которые происходят на поверхности Солнца. По своему существу хромосферная вспышка представляет собой внезапное быстрое выделение энергии, которое генерируется в области солнечного пятна и проявляется в виде рентгеновского и ультрафиолетового (УФ) излучений, а так же в виде потока частиц (электронов, протонов, тяжелых ядер), которые достигают Земли за 8 минут и примерно за 1-2 дня, соответственно.

Как правило, детектирование и классификация солнечных вспышек осуществляется по потоку излучения в рентгеновском диапазоне [1], получаемому, например, с помощью системы геостационарных спутников GOES (от англ. Geostationary Operational Environmental Satellite) [2]. В соответствии с этим, выделяют 3 основных класса вспышек, приведенных в табл. 1, которые оказывают заметное воздействие на состояние околоземного космического пространства. Однако с точки зрения вопросов качества работы радиотехнических систем в ряде случаев более важными могут являться ионизирующее УФ-излучение [3] и радиоизлучение [4].

С развитием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как GPS (от англ. Global Position System) и ГЛОНАСС (от рус. ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система), появилась возможность исследования и детектирования солнечных

Таблица I: Классификация солнечных вспышек по потоку рентгеновского излучения

Класс вспышки	Поток рентгеновского излучения, Вт·м ⁻²
X-класс	$> 10^{-4}$
M-класс	$10^{-5} \div 10^{-4}$
C-класс	$10^{-6} \div 10^{-5}$

вспышек по отклику ионосферы Земли [5]. Это обусловлено тем, что солнечные вспышки приводят к резкому квазисинхронному увеличению ионизации во всех слоях ионосферы на освещенной стороне Земли, что влечет за собой увеличение полного электронного содержания (ПЭС). При этом увеличение ПЭС в слое D и нижней части слоя E обусловлено увеличением рентгеновского излучения, в то время как в слое F — увеличением УФ-излучения.

ПЭС является интегральной характеристикой ионосферы, которую получает ГНСС, и определяется как количество электронов в столбе единичного сечения вдоль луча «приемник-спутник». Единицей измерения ПЭС служит специально введенная величина TECU (от англ. Total Electron Content Unit), равная 10^{16} электронов·м⁻².

Обширная сеть ГНСС-приемников, расположенных по всему миру, позволяет получать данные ПЭС в планетарном масштабе с достаточным временным разрешением для изучения ионосферных эффектов, вызванных быстропротекающими процессами на поверхности Солнца.

Интерес исследования солнечных вспышек по ионосферному отклику объясняется рядом явлений, к ко-

*E-mail: semen_syrovatskii@iszf.irk.ru†E-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

торым они приводят [6]: замирания коротких радиоволн, внезапное усиление атмосфериков на очень низких и низких частотах, внезапное поглощение космических шумов, внезапные фазовые аномалии радиосигналов, внезапные девиации частоты.

Задачами настоящей работы являются исследование ионосферных эффектов солнечных вспышек, их влияния на сигналы ГНСС, а так же оценка надежности их детектирования по данным ГНСС в автоматическом режиме.

1. МЕТОДИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГНСС-сетей

Методика использования данных GPS для изучения солнечных вспышек была разработана в работах Э. Л. Афраймовича [5, 7]. В качестве индикатора изменения состояния ионосферной плазмы могут выступать вариации ПЭС. На основании этого в настоящей работе используется усреднение вариаций ПЭС по всем доступным станциям на освещенной стороне Земли, регистрирующих одновременно несколько спутников.

Данная методика является аналогом алгоритма когерентного накопления сигнала [7]. В связи с тем, что фоновые колебания флуктуаций ПЭС являются статистически независимыми, то при суммировании они начинают гасить друг друга. Это приводит к тому, что амплитуда отклика вариаций ПЭС будет увеличиваться только в районе квазисинхронного глобального импульсного скачка ионизации. При этом чувствительность детектирования отклика возрастает в \sqrt{N} раз (N — число независимых лучей «приемник-спутник») и делает возможным исследование даже слабых событий не заметных на индивидуальных зависимостях ПЭС.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ГНСС

Исследование в настоящей работе основано на использовании данных международной (IGS [8]) и региональных ГНСС-сетей (NGS, CHAIN [9], SONEL, UNAVCO, KASI GDC, Geoscience Australia GNSS Network, GeoNet). По общей совокупности задействовано ~4200 приемных станций.

3. АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЭС

В общем виде формула расчета ПЭС имеет вид:

$$I_s = \int_l N_e(r) dl, \quad (1)$$

где $N_e(r)$ — локальная электронная концентрация, l — траектория луча «приемник-спутник».

Однако $N_e(r)$ не является напрямую измеряемой величиной, поэтому исходными данными необходимыми

для расчета ПЭС являются фазовые и кодовые измерения, которые формируются в навигационном приемнике в файлах с универсальным международным аппаратно-независимым форматом RINEX (от англ. Receiver INdependent EXchange format).

Алгоритм определения ПЭС по фазовым и кодовым измерениям двухчастотного навигационного приемника хорошо известен и выражается следующими формулами [5]:

$$I_s = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + \sigma L + \text{const}], \quad (2)$$

$$I_s = \frac{1}{40.38} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_1 - P_2) + \sigma P]. \quad (3)$$

Здесь f_1 и f_2 — рабочие частоты (для системы GPS $f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.6$ МГц, для системы ГЛОНАСС $f_1 = 1600$ МГц и $f_2 = 1250$ МГц); $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ — приращения фазового пути радиосигнала, обусловленные фазовым запаздыванием в ионосфере; L_1 и L_2 — фазовые измерения навигационного приемника (число оборотов фазы); λ_1 и λ_2 — рабочие длины волн; P_1 и P_2 — псевдодалности; const — постоянная величина, определяемая неоднозначностью фазовых измерений; σL — ошибка фазовых измерений; σP — ошибка кодовых измерений.

Значение ПЭС, рассчитанное по формулам (1), (2) и (3), называют наклонным. Оно пропорционально расстоянию между приемником и передатчиком и имеет интегральный характер. В ряде случаев при исследовании ионосферных возмущений возникает необходимость нормировки и локализации величины ПЭС в пространстве. Для этого на основании теории фазового экрана, согласно которой ионосферу в первом приближении можно рассматривать как слой нулевой толщины на некоторой высоте h_{max} , было установлено, что основной вклад ПЭС формируется в ионосферной точке — точке пересечения луча «приемник-спутник» с максимумом слоя F2 ионосферы. Эквивалентное при этом значение ПЭС называют вертикальным, которое с учетом сферичности Земли имеет вид [5]:

$$I_v = I_s \cos \left[\arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\text{max}}} \cos \theta_s \right) \right], \quad (4)$$

где $R_E = 6371$ км — радиус Земли; $h_{\text{max}} = 300$ км — высота максимума слоя F2 ионосферы; θ_s — угол места луча «приемник-спутник».

4. АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ГНСС

Начальными данными являются ряды наклонного ПЭС $I_s(t)$, полученные по фазовым измерениям, а так же соответствующие им ряды угла места $\theta_s(t)$ и азимута $\alpha_s(t)$ луча «приемник-спутник».

Расчет ПЭС по фазовым измерениям обусловлен тем, что применение кодовых измерений из-за высокого

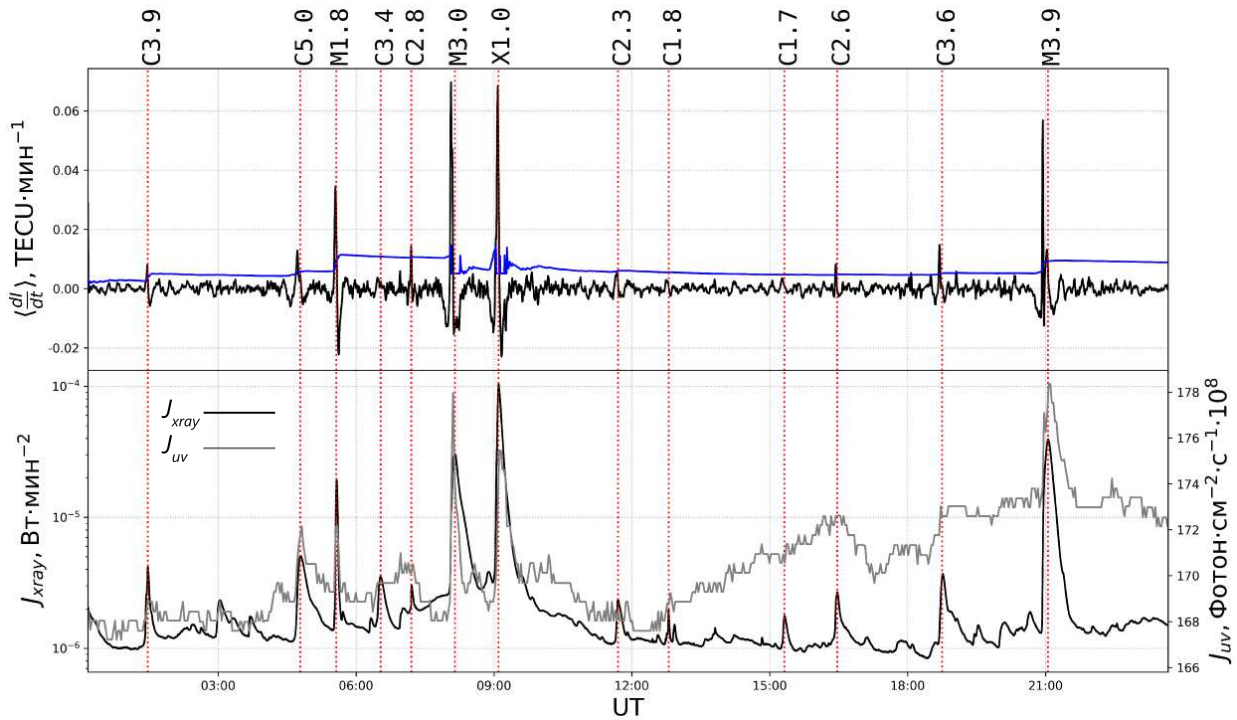


Рис. 1: Отклик ионосферы Земли на солнечные вспышки 11.06.2014. Верхняя панель — динамика усредненной производной вариаций ПЭС (вариации ПЭС отфильтрованы в диапазоне периодов $(2 \div 20)$ нм). Нижняя панель: черная линия (J_{xray}) — динамика потока рентгеновского излучения ($0.1 \div 0.8$ нм), серая линия (J_{uv}) — динамика потока УФ-излучения ($26 \div 34$ нм). Сплошная синяя линия — порог детектирования. Красные пунктирные линии — моменты максимумов солнечных вспышек по данным архива SpaceWeather

уровня их шума делает практически невозможным выделение вариаций ПЭС. При стандартной дискретности работы навигационного приемника в 30 с ошибка определения ПЭС по кодовым измерениям может достигать $30 \div 50\%$ (а в отдельных случаях $\sim 100\%$) [10]. В то же время ошибка определения вариаций ПЭС по фазовым измерениям составляет менее 0.1% к фоновой концентрации. Однако при этом абсолютное значение ПЭС остается неизвестным и требует разрешения фазовой неоднозначности.

Первым этапом обработки является коррекция исходных рядов ПЭС, а именно устранение в них срывов фазы и добавление константы для оптимального удаления тренда.

На следующем этапе, согласно формуле (4), происходит преобразование наклонного ПЭС в эквивалентное вертикальное ПЭС, среднее квадратичное отклонение (СКО) которого из-за вышеупомянутой константы будет минимальным.

После чего, путем использования фильтра скользящего среднего из временных рядов ПЭС удаляется тренд (с окном 20 мин) и производится сглаживание вариаций (с окном 2 мин).

Затем отбираются такие измерения вариаций ПЭС, для которых угол места Солнца в ионосферной точке превышает некий минимальный порог. Для основной обработки величина порога была установлена 0° , что

соответствует расчету только на освещенной стороне Земли:

$$\theta_{solar}(lat_{ion}, lon_{ion}, t) > 0^\circ, \quad (5)$$

где lat_{ion} — широта ионосферной точки; lon_{ion} — долгота ионосферной точки.

На заключительном этапе осуществляется расчет усредненной производной вариаций ПЭС:

$$\left\langle \frac{dI}{dt} \right\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{I_{i+1} - I_i}{t_{i+1} - t_i}, \quad (6)$$

где i — номер луча «приемник-спутник»; N — общее количество лучей «приемник-спутник», удовлетворяющих условию (5).

5. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ВСПЫШЕК X-, M- И C-КЛАССА В ПЕРИОД 2014–2017 гг.

В ходе работы было проанализировано более двухсот (224) солнечных вспышек по данным архива SpaceWeather (<https://www.spaceweatherlive.com/en/archive>) различных классов мощности (X-, M-, C-класс) в период с 2014 по 2017 гг.

На рис. 1 приведен отклик ионосферы Земли на солнечные вспышки 11.06.2014. На верхней

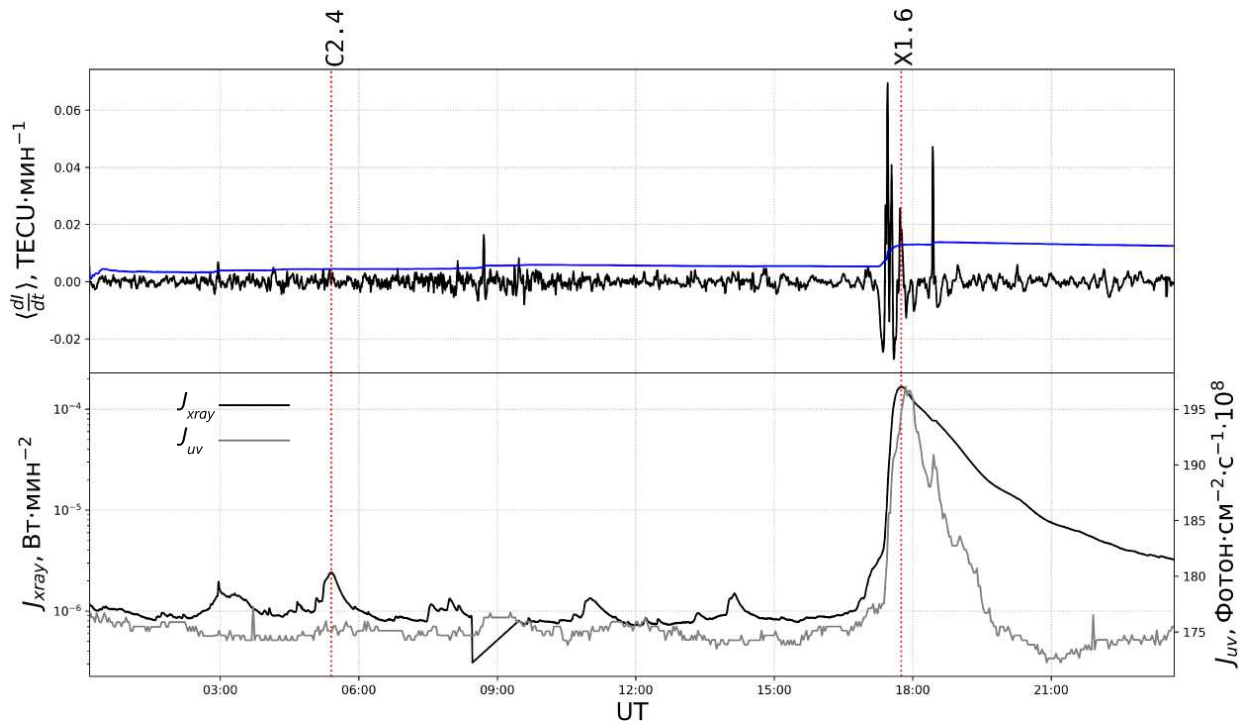


Рис. 2: Отклик ионосферы Земли на солнечные вспышки 10.09.2014. Верхняя панель — динамика усредненной производной вариаций ПЭС (вариации ПЭС отфильтрованы в диапазоне периодов $2 \div 20$ мин). Нижняя панель: черная линия (J_{xray}) — динамика потока рентгеновского излучения ($0.1 \div 0.8$ нм), серая линия (J_{uv}) — динамика потока УФ-излучения ($26 \div 34$ нм). Сплошная синяя линия — порог детектирования. Красные пунктирные линии — моменты максимумов солнечных вспышек по данным архива SpaceWeather

панели изображена динамика усредненной производной вариаций ПЭС. Для сопоставления момента и геоэффективности вспышки были использованы данные потока «мягкого» рентгеновского излучения ($0.1 \div 0.8$ нм) с геостационарного спутника GOES-15 (<https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/full>), а так же потока УФ-излучения ($26 \div 34$ нм) со спутника SOHO (от англ. Solar and Heliospheric Observatory) (<https://dornsifecms.usc.edu/space-sciences-center/download-sem-data>). Соответствующие динамики изображены на нижней панели.

Величина порога детектирования вычислялась на основе трехкратного текущего СКО по соответствующим рекурсивным формулам [11]:

$$\langle b \rangle_i = \langle b \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (b_i - \langle b \rangle_{i-1}),$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(b_i - \langle b \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2],$$

где b_i — i -ое измерение величины b ; $\langle b \rangle_i$ — i -ое текущее среднее значение величины b .

В качестве начальных значений $\langle b \rangle_0$ и σ_0^2 были выбраны среднее и СКО производной вариаций ПЭС в спокойный (невозмущенный) день, а именно: $\langle b \rangle_0 = 8.72 \cdot 10^{-6} \text{ TECU} \cdot \text{мин}^{-1}$, а $\sigma_0^2 = 2.89 \cdot$

$10^{-6} \text{ TECU}^2 \cdot \text{мин}^{-2}$. В связи с чувствительностью текущего СКО к мощным вспышкам, вероятность пропуска вслед идущих более слабых вспышек резко возрастает. Поэтому при выполнении условия $\sigma_i > 3\sigma_0$ текущее среднее и СКО заменялись начальными значениями $\langle b \rangle_0$ и σ_0^2 , а статистический вес последующих измерений увеличивался путем сброса счетчика итераций ($i = 1$).

Широкий спектр мощности вспышек в этот день позволяет установить наличие вариабельности ионосферного отклика, который крайне затрудняет составление регрессионной связи для автоматизации процесса классификации вспышки.

Величина производной вспышки C3.6 в 18:45 UT составляет порядка $0.26 \cdot 10^{-3} \text{ TECU} \cdot \text{с}^{-1}$, в то время как близкая по мощности вспышка C3.4 в 06:32 UT не дает заметного вклада и остается на уровне шума. Также амплитуда отклика на вспышку M3.0 ($1.15 \cdot 10^{-3} \text{ TECU} \cdot \text{с}^{-1}$ в 08:09 UT оказывается больше, чем на более сильную вспышку X1.0 ($1.13 \cdot 10^{-3} \text{ TECU} \cdot \text{с}^{-1}$) в 09:06 UT.

На рис. 2 приведен отклик ионосферы на солнечные вспышки 10.09.2014. Можно заметить, что отклик на вспышку X1.6 в 17:45 UT сопровождается вслед идущими дополнительными импульсными скачками в значении величины производной вариаций ПЭС, в то время как поток рентгеновского излучения уменьшается.

Таблица II: Статистика ошибок детектирования солнечных вспышек

Тип ошибки	«Ложная тревога»		«Пропуск сигнала»		
Класс вспышки	-		X-класс	M-класс	C-класс
Количество/вероятность, %	67/14.23		0/0	13/2.76	256/54.35

Данные факты, по-видимому, связаны с отличием динамики солнечного излучения в различных частотных диапазонах. Т.к. влияние ультрафиолетовой части спектра на ионизованную компоненту ионосферы больше, чем рентгеновской, в связи с тем, что первая поглощается в F-области, а вторая — в D-области, то, несмотря на высокий уровень корреляции, оценка «солнечного» класса вспышки становится затруднительной. С другой стороны, рассчитанный параметр показывает «ионосферный» класс вспышки.

Чтобы оценить работоспособность системы, по итогу постобработки данных ГНСС была получена статистика ошибок детектирования солнечных вспышек. Ее результат представлен в табл. 2.

Как можно видеть, алгоритм усреднения производной вариаций ПЭС по всем станциям на освещенной стороне Земли точно может идентифицировать наличие вспышек X-класса и с достаточной для практики точностью наличие вспышек M-класса в автоматическом режиме (ошибка «пропуска сигнала» составляет примерно 2.76%).

Стоит отметить, что вероятность в данном случае вычислялась на основе данных спутника GOES-15, как отношение общего количества детектирований к общему числу вспышек (471) за весь период наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено исследование ионосферных эффектов по данным ГНСС ряда солнечных вспышек раз-

личных классов мощности в период 24-го цикла солнечной активности. Характерный уровень производной вариаций ПЭС в диапазоне периодов 2–20 мин менялся приблизительно от 0 TECU·мин⁻¹ до 0.6 TECU·мин⁻¹.

Показано, что алгоритм усреднения производной вариаций ПЭС по всем станциям на освещенной стороне Земли точно может идентифицировать наличие вспышек X-класса и с достаточной для практики точностью наличие вспышек M-класса в автоматическом режиме (ошибка «пропуска сигнала» составляет примерно 2.76%).

Обнаружено, что в отдельных случаях отклик на достаточно сильную по потоку рентгеновского излучения вспышку может практически не проявить себя, или наоборот, отклик на более слабую вспышку может оказаться больше, чем на более сильную. Данный факт крайне затрудняет составление регрессионной связи для автоматизации процесса классификации вспышки и указывает на наличие вариабельности ионосферного отклика, который является следствием отличия динамики солнечного излучения в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-1097.2017.5, а так же поддержана фондом РФФИ, проект 18-35-00218 мол_а.

- [1] *Svetska Z.* Flare observations. Gordon and Breach Science Publishers, 1981.
- [2] GOES I-M Databook. Space System Loral, 1996. P. 184.
- [3] *Ясюкевич Ю. В., Воейков С. В., Живетьев И. К., Косогооров Е. А.* Космические исследования. 2013. **51**, № 2. С. 125.
- [4] *Afraimovich E. L., Demyanov V. V., Smolkov G. Ya.* Earth Planets Space. 2009. **61**. P. 637.
- [5] *Афраимович Э. Л., Перевалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. Иркутск, 2006.
- [6] *Митра А.* Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М.: Мир, 1977.
- [7] *Афраимович Э. Л., Алтынцева А. Т., Косогооров Е. А., Ларина Н. С., Леонович Л. А.* Геомагнетизм и аэрономия. 2001. **41**, № 2. С. 208.
- [8] *Dow J. M., Neilan R. E., Rizos C. J.* of Geodesy. 2009. **83**, N3. P. 191.
- [9] *Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., Mushini S. C., Pokhotelov D., Hamza A. M., Mann I. R., Kale Z. C., Chadwick R., Kelly T.* et al. *Radio Science*. 2009. **44**.
- [10] *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
- [11] *Blewitt G.* Geophys. Res. Lett. 1990. **17**, N3. P. 199.

The effect of solar flares on the ionosphere of the Earth during 24th cycle of solar activity

S. V. Syrovatskiy^{1,2,a}, Yu. V. Yasyukevich^{1,2,b}, A. M. Vesnin², I. K. Edemskiy², S. V. Voeykov²,
I. V. Zhivetiev^{2,3}

¹Department of Radiophysics and Radioelectronics, Faculty of Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, 664003, Russia

²Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, 664003, Russia

³Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, 684034, Russia

E-mail: ^asemen_syrovatskii@iszf.irk.ru, ^byasyukevich@iszf.irk.ru

This work describes of ionospheric effects from the data of global navigation satellite systems of a number of solar flares of different power classes (X-, M-, C-class) during 2014–2017. Our results demonstrate that the algorithm of averaging the derivative of the variations of the total electron content for all stations on the illuminated side of the Earth can exactly detect of X-class flares and with sufficient accuracy for practice detect of M-class flares in the automatic mode (the «signal skip» error is approximately 2.76%). Also shown that in some cases the variability of the ionospheric response is a consequence of the difference in the dynamics of solar radiation in the X-ray and ultraviolet frequency ranges.

PACS: 94.20.-y.

Keywords: ionosphere, solar flares, total electron content.

Received 14 May 2018.

Сведения об авторах

1. Сыроватский Семён Владиславович — инженер, студент; e-mail: semen_syrovatskii@iszf.irk.ru.
2. Ясюкевич Юрий Владимирович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: yasyukevich@iszf.irk.ru.
3. Веснин Артём Михайлович — вед. инженер–программист; e-mail: artem-vesnin@iszf.irk.ru.
4. Едемский Илья Константинович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: ilya@iszf.irk.ru.
5. Воейков Сергей Викторович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: serg3108@iszf.irk.ru.
6. Живетьев Илья Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: i.zhivetiev@gmail.com.